

В.М. Сойфер

**ВЫПЛАВКА СТАЛИ
В КИСЛЫХ
ЭЛЕКТРОПЕЧАХ**



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 2009

В.М. Сойфер

**ВЫПЛАВКА СТАЛИ
В КИСЛЫХ
ЭЛЕКТРОПЕЧАХ**



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 2009

УДК 669.187.5

ББК 31.292-5

С58

Сойфер В. М.

С58 Выплавка стали в кислых электропечах. — М.: Машиностроение, 2009. — 480 с., ил.

ISBN 978-5-217-03450-5

Изложены требования к качеству кислой электростали для оливок, теоретические основы выплавки стали кислым процессом, описаны конструкции и футеровка кислых дуговых и индукционных печей, технологии выплавки и разливки стали. Описаны особенности дуговых сталеплавильных печей постоянного тока, сертификация дуговых и индукционных печей, приведены современные стандарты, касающиеся уже новой электроплавки стали, результаты последних исследований, описана технология получения продукта прямого восстановления железа в качестве шихты для электроплавильных печей, результаты исследований напряженности магнитного поля индукционных печей, прогрессивные технологические процессы выплавки стали и футеровки печей.

Предназначена для инженерно-технических работников машиностроительных и металлургических предприятий, научных работников, может быть полезна студентам вузов.

УДК 669.187.5

ББК 31.292-5

© Сойфер В. М., 2009

ISBN 978-5-217-03450-5

© Издательство «Машиностроение», 2009

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения информации, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Термины и определения	5
Предисловие	7
Глава 1. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ КИСЛОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ ДЛЯ ОТЛИВОК	10
1.1 Назначение и контроль кислой электростали	10
1.2 Химический состав стали	32
1.3 Механические свойства, методы испытаний и микроструктура отливок	50
1.4 Газы и неметаллические включения	66
1.5 Специальные свойства	68
Глава 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ КИСЛОЙ СТАЛИ	70
2.1 Современные представления о структуре и свойствах жидкой стали	70
2.2 Физико-химические свойства и строение кислых шлаков Жидкотекучесть кислых шлаков	74
2.3 Особенности кислородно-восстановительных процессов в кислых электропечах	77
2.4 Роль кремния при выплавке стали в кислых электропечах	81
2.5 Конечное раскисление электростали. Модифицирование стали	89
2.6 Поведение водорода и азота при выплавке кислой электростали	97
Глава 3. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ	99
3.1 Конструкция дуговых печей	99
3.2 Особенности конструкции дуговых электрических печей производства ведущих мировых фирм	103
Глава 4. ФУТЕРОВКА ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ	117
4.1 Требования к огнеупорам для кислых дуговых печей	117
4.2 Монолитная футеровка дуговых сталеплавильных печей	141
4.3 Зерновая основа огнеупорных масс	144
4.4 Спекливающие огнеупорные массы	159
4.5 Технологические свойства огнеупорных масс	174
4.6 Огнеупорность масс	184
4.7 Рациональные составы огнеупорных масс для розартовых установок производства	196
4.8 Технология футеровки печей	208
4.9 Повышение стоимости футеровки	217

Глава 5. КОНСТРУКЦИЯ И ФУТЕРОВКА ИНДУКЦИОННЫХ СТАЛЕПЛАВильНЫХ ПЕЧЕЙ	234
5.1 Конструкции индукционных печей	234
5.2 Футеровка индукционных печей	258
Глава 6. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ	274
6.1 Требования к исходным материалам, загрузка и плавление шихты	274
6.2 Продукт прямого восстановления железа — ингулы для электросталеплавильных печей	309
6.3 Окисление углерода	315
6.4 Поведение фосфора и серы в конце дутья	317
6.5 Особенности активного и кремниезависимостаночного процессов	319
6.6 Раскисление и выдиффирование стали	321
6.7 Легирование стали	323
Глава 7. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ И ПОВЫШЕНИЕ ЕЕ КАЧЕСТВА	326
7.1 Технологии выплавки стали в кислых электростепках с повышенным содержанием кремния и титана	326
7.2 Повышение качества кислой электростали	337
7.3 Раскок литейной стали ферромарганезом в ковше	352
7.4 Особенности выплавки стали в индукционных печах	358
7.5 Напряженность магнитного поля индукционных печей	364
Глава 8. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЛИВКИ КИСЛОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ	372
8.1 Способы разлива	372
8.2 Подготовка ковшей к разливу	375
8.3 Технологии разлива	389
8.4 Ресурсосберегающая технология футеровки ковшей	391
Глава 9. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	409
Глава 10. ДУГОВЫЕ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	420
Глава 11. МИНИ-ЗАВОДЫ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ	433
Глава 12. СЕРТИФИКАЦИЯ ДУГОВЫХ И ИНДУКЦИОННЫХ СТАЛЕПЛАВильНЫХ ПЕЧЕЙ	443
Список литературы	471

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ*

Азот – элемент V группы Периодической системы

Включения – инородные твердые, жидкие и газообразные вещества в жидких и твердых металлах и сплавах

Водород – элемент I группы Периодической системы

Восстановление – присоединения электронов атомом, молекулой или ионом, приводящее к понижению степени окисления

Дуговая сталеплавильная печь – печь для планки стали с использованием электрической дуги

Индуктор – электромагнитное устройство для индукционного нагрева или плавления металла нагреваемыми токами, возбуждаемыми переменным магнитным полем

Железо – элемент VIII группы Периодической системы

Жидкотекучесть – свойство жидкого расплава, характеризующее его способность заполнять литейную форму

Кислород – элемент VI группы Периодической системы

Кремнезем – SiO_2 в форме минерала кварца и других разновидностей

Кремний – элемент IV группы Периодической системы

Легирующие – изменение состава металлических сплавов введением легирующих элементов

Огнеупоры – материалы, изделия, изготовленные преимущественно из минерального сырья и имеющие огнеупорность не менее 1580 °С

Окисление металлов – процесс взаимодействия твердого или жидкого металла (сплава) с кислородом

Пески – мелкообломочная рыхлая осадочная горная порода, состоящая из округлых и угловатых зерен (песчинок)

Разливка металла – процесс получения полупродукта для дальнейшей обработки

Раскисление – удаление кислорода из жидких металлов

Сера – элемент VI группы Периодической системы

Сплавы – однородные системы из двух или более элементов

Сталь – сплав железа с углеродом, содержащий от 0,025 до 2,14% С

Термодинамическая активность – величина, характеризующая стремление вещества выделиться из раствора

* Энциклопедический словарь по металлургии. В 2 т. / гл. ред. Н.П. Лыткин. М.: Интермет Инжиниринг. 2000.

Технология — совокупность приемов и способов получения, обработки и переработки сырья, материалов или изделий в различных отраслях промышленности

Углерод — первый элемент IV группы Периодической системы

Ферросплавы — сплавы железа с одним или несколькими элементами

Фосфор — элемент V группы Периодической системы

Футеровка — защитная внутренняя облицовка (обычно из огнеупорных материалов) агрегатов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Кремний — химический элемент IV группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. По распространению в земной коре кремний (27,6 % по массе) занимает второе место после кислорода (47,0 %) [1]. По другим данным распространение кремния в составе земной коры составляет 29,5 % [2]. Кремний составляет около 15 % массы всей нашей планеты, занимая третье место после железа и кислорода.

В природных системах кремний практически всегда находится в соединении с кислородом в виде кремнезема SiO_2 и его гидратированных форм — силикатов и алюмосиликатов металлов. Структурной основой всех природных соединений кремния являются кремнекислородные тетраэдры SiO_2 , образующие многообразные пространственные конструкции путем соединения через общие атомы кислорода на их вершинах. Земная кора на 62 % составлена из кремнезема [2].

SiO_2 имеет минимум восемь кристаллических (минеральных) фаз: α -кварц, β -кварц, α -кристобалит, β -кристобалит, α -тридимит, β -тридимит, коэзит и ститовит.

В металлургическом производстве кремнезем находит применение прежде всего в форме динасового кирпича (динаса) — коксового, металлургического (для футеровки электросталеплавильных печей, пудочных агрегатов доменных печей и др.) и динаса для стекловаренных печей, в том числе для электровакуумной промышленности. Футеровки плавильных печей выполняют из кремнезема также на основе кварцита (огнеупорные массы для футеровки индукционных печей) и на основе кварцевого песка (огнеупорные массы для футеровки дуговых и индукционных плавильных печей). Динас — это огнеупорный материал, содержащий не менее 93 % SiO_2 (для футеровки электросталеплавильных печей не менее 95 % SiO_2), кварцит — не менее 95 % SiO_2 ; кварцевый песок — не менее 95 % SiO_2 .

Для футеровки электросталеплавильных печей применяют первоуральские, овручские (Украина) и анджеро-судженские (Сибирь) кварциты; кварцевые пески — вишневогорский, миллеровский, люберецкий, ореховский, вольногорский, гомельский, великодворский, тамбовский, кичигинский, орловский и многие др.

Сталеплавильные печи с футеровкой, содержащей высокую процент SiO_2 , называют печами с кислой футеровкой или кислыми печами, дуговые и индукционные печи — кислыми электропечами.

Кислый процесс характеризуется также повышенным содержанием SiO_2 в шлаке, достигающим к концу плавления 50 %, сумма концентраций оксидов железа и марганца составляет обычно 30...50 %. Состав кислого шлака в значительной степени определяется растворимостью в нем кремнезема, которая может достигать 57 % при содержании в шлаке 12 % СаО. Для кислых шлаков характерна целая гамма непрерывно разрушающихся и вновь создающихся кремнекислородных комплексов, основой которых является тетраэдр с расположенным в его центре ионом кремния и кислорода — в четырех вершинах. С увеличением кислотности сложность комплексов возрастает, что приводит к увеличению вязкости шлака. Природу кислых шлаков наиболее полно отражает молекулярно-ионная теория, допускающая наличие как ионной, так и ковалентной связи, преобладающей в расплавах, обогащенных кремнеземом.

В кислых электропечах получают заготовки высокого качества для машиностроения. Кислая сталь имеет меньшую газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями, а кислые шлаки — меньшую газопроницаемость для азота и водорода и более низкую тепло- и электропроводность (как и кислые огнеупоры). Производительность печей с кислой футеровкой по сравнению с печами с основной футеровкой больше в 1,3—1,5 раза при меньшем удельном расходе электроэнергии и электродов [5]. Кислые печи характеризуются упрощенным технологическим процессом плавки, более высокой стойкостью и меньшей стоимостью футеровки. Сталь, выплавленная в кислых электропечах, имеет хорошие литейные свойства. Кислый процесс можно использовать в самых современных металлургических производствах [6].

Теоретические основы кислого процесса достаточно полно разработаны известными учеными Е.Е. Симсом и Ф.Б. Далем [7], Ю.А. Шульте [8, 9], Н.М. Чуйко [10], А.Д. Крамаровым [11, 12], В.И. Явойским [13], М.Я. Меджибожским [14] и другими. Вопросы кислой электроплавки стали (теория, технология, оборудование, футеровка) разработаны и обобщены в известных специалистам-металлургам монографиях [15—19] и докторской диссертации [20].

Наибольшее распространение кислые электропечи нашли в литейных цехах. В СНГ работает свыше 1000 электросталеплавильных печей. В среднем по СНГ и по России распространение электропечей с кислой футеровкой составляет около 70 %, а по Украине — около 90 %.

По существу, кислая электропечь является основным плавильным агрегатом в сталелитейном производстве СНГ, выпускавшем к 1990 г. более 6 млн т стального литья (главным образом из углеродистой стали).

Одним из путей повышения экономичности выплавки стали в кислых электропечах является увеличение в шихте содержания кремния, что в конечном итоге приводит к экономии ферросплавов (ферросилиция и ферромарганца), сокращению длительности плавки, экономии электроэнергии, повышению стойкости футеровки, улучшению качества стали.

Значительная экономия огнеупоров при выплавке стали в кислых электропечах достигается при применении молибдитной (набивной) футеровки стен электропечей (взамен кирпичной), которая особенно эффективна при применении технологии выплавки стали с повышенным содержанием кремния в шихте.

Существенный экономический эффект дает раскисление кислой стали ферромарганцем в ковше, применение индукционных сталеплавильных электропечей, использование сталеразливочных ковшей рациональной вместимости, молибдитная футеровка сталеразливочных ковшей. Технологические процессы выплавки и разлива стали, футеровки печей и ковшей взаимосвязаны между собой и должны рассматриваться в комплексе.

Глава 1

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ КИСЛОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ ДЛЯ ОТЛИВОК

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

Наибольшее распространение электропечи получили в тракторном, сельскохозяйственном, строительно-дорожном, угольном, химическом, транспортном, энергетическом и тяжелом машиностроении, автомобильной и электротехнической промышленности. В качестве примеров деталей, изготовленных из кислой электростали, можно привести катки коловых и гусеничных тракторов, корпуса редукторов, звездочки и шестерни экскаваторов, блоки башенных кранов; буксы вагонов, головки автосцепки, стрелочные переводы, кронштейны секционных поездов и станины посадочных стоек угольных шахт, стульцы грузовых автомобилей, остова, щиты и коллекторные втулки тяговых электродвигателей электропозов, тепловозов и многие другие детали.

ГОСТ 977—88 «Отливки из конструкционной нелегированной и легированной стали» в зависимости от назначения и требований, предъявляемых к литым деталям, предусматривает разделение отливок на три группы.

К первой относятся отливки общего назначения для деталей, конфигурация и размеры которых определяются только конструктивными и технологическими соображениями. Эти отливки оцениваются по внешнему виду, размерам и химическому составу.

Ко второй группе относятся отливки ответственного назначения для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при статических нагрузках. Эти отливки оцениваются по внешнему виду, размерам, химическому составу и механическим свойствам: пределу текучести или временному сопротивлению и относительному удлинению.

К третьей группе относятся отливки особо ответственного назначения для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при циклических и динамических нагрузках. Эти отливки оцениваются по внешнему виду, размерам, химическому составу и механическим свойствам: пределу текучести или временному сопротивлению, относительному удлинению и ударной вязкости.

ГОСТ 977–88 разрешает в зависимости от назначения отливок вводить дополнительные показатели (не предусмотренные требованиями стандарта), но они должны быть указаны в конструкторской или нормативно-технической документации: твердость, излом металла, механические свойства для отливок со стенкой толщиной свыше 100 мм, механические свойства при пониженных и повышенных температурах, герметичность, микроструктура, плотность, коррозионная стойкость, жаростойкость, стойкость против межкристаллитной коррозии и др. Все эти показатели могут быть введены в техническую документацию по требованию потребителя.

Кроме того, ГОСТ 977–88 разрешает проведение дополнительных испытаний:

- для отливок третьей группы, работающих при пониженных температурах, подвергающихся динамическим нагрузкам и предназначенных для изделий, подлежащих приемке представителем заказчика, при наличии указания в конструкторской или нормативно-технической документации, ударная вязкость определяется при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нормы ударной вязкости при этом указывают в конструкторской или нормативно-технической документации на конкретную продукцию,

- относительное сужение контролируется вместо относительного удлинения с указанием этой замены в конструкторской или нормативно-технической документации;

- испытания на прочность по увеличенным нормам при соответствующем снижении норм пластичности и вязкости с соответствующим указанием в конструкторской или нормативно-технической документации;

- испытания по сниженному уровню механических свойств на образцах, вырезанных из отливок, с соответствующим указанием в конструкторской документации;

- для отливок второй и третьей групп, предназначенных для изделий, подлежащих приемке представителем заказчика, допускается замена контролируемого показателя «Предел текучести» показателем «Временное сопротивление» только по требованию представителя заказчика.

При поточно-массовом производстве разделение отливок по группам не производят, перечень контролируемых показателей указывают на чертеже отливки.

ГОСТ 977–88 определяет следующую классификацию марок стали, которые могут выплавляться в дуговых электропечах: конструкционные не легированные; конструкционные легированные; легированные со специальными свойствами, в том числе классов: мартенситного (коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные, быстрорежущие), мартенситно-ферритного (коррозионно-стойкая), ферритного (коррозионно-стойкая),

аустенитно-мартенситного (коррозионно-стойкие), аустенитно-ферритного (коррозионно-стойкие, жаростойкие), аустенитного (коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие).

В табл. 1 показана область применения конструкционной легированной стали, а в табл. 2 — область применения легированной стали со специальными свойствами.

1. Область применения конструкционной легированной стали

Марка стали	Область применения
20ГЛ	Диски, звездочки, зубчатые венцы, барабаны и другие детали, к которым предъявляются требования по прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
35ГЛ	Диски, звездочки, зубчатые венцы, барабаны, шкивы и другие тяжело нагруженные детали экскаваторов, крышки подшипников, цапфы
20ГСЛ	Корпусные детали гидротурбин, работающие при температуре до 450 °С
30ГСЛ	Зубчатые колеса, ролики, обоймы, зубчатые венцы, рычаги, фланцы, шкивы, сектора, конусы, конусные колеса и другие детали
20Г1ФЛ	Рамы, балки, корпуса и др. детали вагонов
20ФЛ	Литые детали вагонов, металлургического и горнодобывающего оборудования
30ХГСФЛ	Литые детали экскаваторов
45ФЛ	Износостойкие литые детали для тракторов и металлургического оборудования
32Х6БЛ	Кронштейны, балансиры, катки, другие ответственные детали со стенкой толщиной до 50 мм и общей массой детали до 80 кг
40ХЛ	Детали повышенной прочности, а также работающие на износ
30ХМЛ	Шестерни, крестовины, втулки, зубчатые колеса, цилиндры, обоймы и другие корпусные детали, работающие при температуре до 500 °С
30ХМФЛ	Детали арматуры, корпусные детали, цилиндры, работающие при температуре до 540 °С
20ГНМФЛ	Сварные конструкции больших сечений, бандаж цементных печей

Продолжение табл. 1

Марка стали	Область применения
35ХМЛ	Шестерни, крестовины, итулки, зубчатые колеса, печные детали и другие ответственные детали, к которым предъявляются требования высокой прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
30ХНМЛ	Ответственные нагруженные детали, к которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре до 400 °С
35ХГСЛ	Зубчатые колеса, звездочки, оси, валы, муфты и другие ответственные детали, от которых требуется повышенная износостойкость
34НГМЛ 20ДХЛ	Ответственные нагруженные детали, к которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
08ГДНФЛ	Сварные конструкции, ответственные детали со стенкой толщиной до 700 мм, к которым предъявляются требования высокой вязкости и достаточной прочности, работающие при температурах не более 350 °С
13ХНДФЛ	Сварные конструкции, ответственные нагруженные детали, к которым предъявляются требования достаточной прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре до 500 °С
12ДН2ФЛ	Сварные конструкции, ответственные нагруженные детали, к которым предъявляются требования достаточной прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре до 400 °С
12ДХН1МФЛ	Сварные конструкции, ответственные нагруженные детали, которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
23ХГС2МФЛ	Детали ответственного назначения со стенкой толщиной до 30 мм, работающие в условиях циклических и ударных нагрузок и в условиях ударно-абразивного износа
12Х7Г3СЛ	Ответственные высоконагруженные детали со стенкой толщиной до 100 мм, работающие в условиях статических и динамических нагрузок

Описание табл. 1

Марка стали	Область применения
25Х2ГНМФЛ	Детали ответственного назначения со стенкой толщиной до 50 мм, работающие в условиях статических и динамических нагрузок
27Х5ГСМЛ	Высоконагруженные детали ответственного назначения со стенкой толщиной до 50 мм, работающие в условиях ударных нагрузок и ударно-абразивного износа
30Х3С3ГМЛ	Высоконагруженные детали ответственного назначения со стенкой толщиной до 30 мм, к которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости
03Н12Х5М3ТЛ 03Н12Х5М3ТЮЛ	Высоконагруженные детали ответственного назначения со стенкой толщиной до 200 мм

2. Область применения легированной стали со специальными свойствами

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Мартенситный	20Х13Л	Несколько менее коррозионно-стойкая в атмосферных условиях по сравнению со сталью марки 15Х13Л	Детали, подвергнутые ударным нагрузкам (турбинные лопатки, клапаны гидравлических прессов, арматура крекинг-установок, сегменты сопел, формы для стекла, рамы сидельных окон, предметы домашнего обихода и др.), а также изделия, подвергнутые действию относительно слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, влажный пар, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре)

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Мартенситный	08X14HДЛ	Коррозионно-стойкая в морской воде и атмосферных условиях. Коррозионная стойкость выше, чем у стали марок 15X13Л и 20X13Л	Детали, работающие в морской воде (гребные винты и другие)
	09X16H4БЛ	Коррозионно-стойкая. Высокопрочная при нормальной температуре, устойчива против окисления в атмосферных условиях при температуре до 500 °С	Детали повышенной прочности для авиационной, химической и других отраслей промышленности
	109X17H3СЛ	Коррозионно-стойкая сталь. Высокопрочная при нормальной температуре	Детали повышенной прочности для авиационной, химической и других отраслей промышленности, работающие в средах средней агрессивности (азотная и слабые органические кислоты, растворы солей органических и неорганических кислот)
	20X5МЛ	Жаростойкая в горячих нефтяных средах, содержащих сернистые соединения. Жаростойкость до 600 °С	Детали арматуры нефтеперерабатывающих установок, печные двойники, корпуса насосов, другие детали, работающие в нефтяных средах под давлением при температуре до 550 °С
	20ХМВЛ	Жаростойкая в более агрессивных сернистых средах по сравнению со сталью марки 20X5МЛ, жаростойкость до 600 °С	Те же детали, работающие в условиях сильно сернистых нефтяных сред под давлением при температуре до 575 °С

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Мартенситный	40X9C2H	Жаростойкая при температуре до 800 °С, жаропрочная при температуре до 700 °С	Детали, работающие длительное время под нагрузкой при температуре до 700 °С (клапаны моторов, колосники, крепежные детали)
	10X12H3H	Кавитационно-стойкая. Коррозионно-стойкая и эрозивно-стойкая в условиях проточной воды. Сталь не склонна к отпускной крупности, не флокеночувствительна	Элементы сварных конструкций рабочих колес гидротурбин, детали гидротурбин (лопатки, детали проточной части), работающие в условиях кавитационного разрушения
	20X12BHMFH	Коррозионно-стойкая, жаропрочная до 650 °С	Литые детали турбин (цилиндры, сопла, диафрагмы и арматура) с рабочей температурой до 600 °С
	85X4M5Ф2B6H (P6M5H)	Высокая износостойкость, тепло-стойкая	Литые заготовки для инструмента, получаемого последующим методом горячей пластической деформации (ковка, горячее выдавливание) и для литого металлорежущего инструмента (применяются для отливок I-й группы)
	90X4M4Ф2B6H (P6M4Ф2H)	Высокая износостойкость, тепло-стойкая	То же

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Мартенситно-ферритный	15X13Л	Коррозионно-стойкая в атмосферных условиях, в речной и водопроводной воде. Наибольшая коррозионная стойкость достигается термической обработкой и полировкой	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам (турбинные лопатки, клапаны гидравлических прессов, арматура крекинг-установок и другие), а также изделия, подвергающиеся действию относительно слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, влажный пар, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре)
Ферритный	15X25Л	Коррозионно-стойкая, жаростойкая при температуре до 1100°C, обладает удовлетворительной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии	Детали, не подвергающиеся действиям постоянных и переменных нагрузок (аппаратура для дымящейся азотной или фосфорной кислот), многие детали химического машиностроения, в том числе работающие в условиях контакта с мочевиной, печная арматура, плиты и другие
Аустенитно-мартенситный	08X15H4ДМЛ	Коррозионно-стойкая в морской воде и атмосферных условиях. По сравнению с 08X14HДЛ менее чувствительна к концентраторам напряжений	Детали, работающие в морской воде (тяжелонагруженные гребные винты ледоколов и др.)

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Аустенитно-мартенситный	08X14H7MЛ	Коррозионно-стойкая	Детали изделий, работающих при комнатных и низких (до минус 196 °С) температурах
	14X18H9ГЛ	Коррозионно-стойкая. Обладает большей, чем сталь марки 10X18H9Л, склонностью к межкристаллитной коррозии	Арматура для химической промышленности, коллекторы выхлопных систем, детали печной арматуры и др.
	12X25H5TMФЛ	Коррозионно-стойкая, жаростойкая при температуре до 600 °С	Арматура химической промышленности, детали авиационной и других отраслей промышленности, а также детали, работающие под высоким давлением до 30 МПа (300 атм)
Аустенитно-ферритный	16X18H12C4TiOЛ	Коррозионно-стойкая	Сварные изделия, работающие в агрессивных средах, в частности для концентрированной азотной кислоты при температуре 105 °С
	35X23H7CЛ	Коррозионно-стойкая в сернистых средах, жаростойкая при температуре до 1000 °С	Детали трубчатых печей нефтемазодов и другие детали, работающие при температуре до 1000 °С. Рекомендуется взамен стали марки 40X24H12CЛ
	40X24H12CЛ	Коррозионно-стойкая, жаростойкая при температуре до 1000 °С, жаропрочная	Детали, работающие при высокой температуре и давлении (лопатки компрессоров и сопловых аппаратов, печные конвейеры, шнеки, крепежные детали и др.)

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Аустенитно-ферритный	20X20H14C2Л	Сталь жаростойкая до 1000...1050 °С, устойчива в науглероживающей среде	Печные конвейеры, шнеки для цементации и другие детали, работающий при высоких температурах в нагруженном состоянии
	10X18H3Г3ДЛ	Кавитационно-стойкая, имеет повышенную стойкость от песчаной эрозии по сравнению со сталью марки 10X12НДЛ	Литые лопатки и сварные детали рабочей части гидротурбин, работающих при напорах, не превышающих 80 м/ч и сечениях до 300 мм
	10X18H9Л	Коррозионно-стойкая, жаростойкая до 750 °С. Не стойкая в сернистых средах. При содержании углерода в стали не более 0,07 % стойкая против межкристаллической коррозии	Арматура для химической промышленности, коллекторы выхлопных систем, детали печной арматуры, плиты для трапециевидных корзин и другие детали, работающие при температуре до 400 °С
Аустенитный	12X18H9ТЛ	Коррозионно-стойкая, жаростойкая до 750 °С, жаропрочная при температуре до 600 °С. Обладает высокой стойкостью против газовой и межкристаллической коррозии	Арматура для химической промышленности, коллекторы выхлопных систем, детали печной арматуры, ящики и крышки для трапециевидных корзин и другие детали
	ЮХ18Н11БЛ	Коррозионно-стойкая, жаропрочная при температуре до 800 °С. Нечувствительна к межкристаллической коррозии	Те же детали, а также детали газовых турбин разного назначения, детали турбокомпрессоров, работающих при малых нагрузках. Детали аппаратов целлюлозной, азотной, пищевой и мясоваренной промышленности

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Аустенитный	07X17H16Tl	Коррозионно-стойкая. Обладает малой магнитной восприимчивостью, высокой стойкостью против газовой и межкристаллитной коррозии, хорошей обрабатываемостью резанием	Литые фасонные детали ответственного назначения, к которым предъявляются требования по малой магнитной восприимчивости, высокой коррозионной стойкости и хорошей обрабатываемости резанием
	12X18H12M3Tl	Коррозионно-стойкая, жаропрочная, не подвержена межкристаллитной коррозии при температуре до 800 °С	Детали, устойчивые к воздействию сернистой кипящей, фосфорной, муравьиной, уксусной и других кислот, а также детали, длительно время работающие под нагрузкой при температуре до 800 °С
	55X18Г14С2Тl	Коррозионно-стойкая сталь, жаростойкая до температуры 950 °С. В среде сернистой кислоты нестойкая	Те же детали, которые изготавливают из стали марки 40X24H12Сl
	15X23H18l	Жаропрочная до 900 °С. При температуре 600...800 °С склонна к острению из-за образования сигма-фазы	Детали установок для химической, нефтяной и автомобильной промышленности, газопроводы, камеры сгорания сопловых аппаратов. Детали печной арматуры, не требующие высокой механической прочности (может применяться для нагревательных элементов сопротивления)

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Аустенитный	20X25H19C2Л	Коррозионно-стойкая, жаростойкая при температуре до 1100 °С	Реторты для отжига, части печей и ящики для цементации
	18X25H19CЛ	Коррозионно-стойкая, кислотоупорная, жаростойкая	Детали газовых и газовых турбин, котельных установок, лопаток и венцов компрессоров и сопловых аппаратов турбин и другие детали, работающие при высоких температурах
	45X17Г13Н3ЮЛ	Коррозионно-стойкая, стойкая против коррозии в сернистых средах. Жаростойкая при температуре до 900 °С, жаропрочная	Детали отпусковых, закалочных и цементационных печей, подовые плиты, короба, тигли для соляных ванн и другие детали, работающие при высоких температурах. Рекомендуется как заменитель стали марки 40X24H12CЛ
	35X18H24C2Л	Коррозионно-стойкая, жаростойкая при температуре до 1100...1200 °С, жаропрочная	Детали, работающие при высоких температурах в сильнонагретом состоянии (печные конвейеры, шнеки, крепежные детали)
	31X19H9MBEЛ	Сталь жаропрочная	Рабочие колеса турбины турбокомпрессоров, турбинные и направляющие аппараты

Продолжение табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Аустенитный	12X18H12B1	Коррозионно-стойкая, жаропрочная до 650 °С	Литые детали энергоустановок с длительным сроком работы при 600...650 °С и ограниченным при 700 °С
	08X17H34B5T1 Ю2РЖ	Жаростойкая при температуре до 1000 °С	Сопловые и рабочие лопатки газовых турбин, мельничные роторы и другие детали, работающие при температуре до 800 °С
	15X18H22B6M2РЖ	Жаростойкая при температуре до 1000 °С, жаропрочная при температуре до 800 °С	Детали двигателей авиационной промышленности (рабочие и сопловые лопатки газовых турбин и др.)
	20X21H46B8РЖ	Жаростойкая при температуре до 1000 °С, жаропрочная при температуре до 800 °С	Детали двигателей авиационной промышленности (рабочие и сопловые лопатки газовых турбин и др.)
	110Г13Л	Высокое сопротивление износу при одновременном воздействии высоких давлений или ударных нагрузок	Корпуса вихревых и шаровых мельниц, щеки дробилок, трамвайные и железнодорожные стрелки и крестовины, гусеничные траки, звездочки, зубья ковшей экскаваторов и другие детали, работающие на ударный износ

Окончание табл. 2

Класс стали	Марка стали	Основное свойство	Область применения
Аустенитный	110Г13ФТЛ	Высокое сопротивление ударно-абразивному изнашиванию, высокая хладостойкость	Корпуса вихревых и шаровых мельниц, щеки дробилок, трамвайные и железнодорожные стрелки и крестовины, гусеничные траки, звездочки, зубья ковшей экскаваторов и другие детали, работающие на ударный износ; детали металлургического и горно-обогатительного оборудования
	130Г14ХМФАЛ	Высокое сопротивление износу при одновременном воздействии высоких давлений или ударных нагрузок. Высокая стойкость против абразивного изнашивания, высокая хладостойкость. Сохраняет высокое значение ударной вязкости в упрочненном состоянии (в процессе эксплуатации деталей)	Корпуса вихревых и шаровых мельниц, щеки дробилок, трамвайные и железнодорожные стрелки и крестовины, гусеничные траки, звездочки, зубья ковшей экскаваторов и другие детали, работающие на ударный износ
	120Г10ФЛ	Высокое сопротивление абразивному износу	Звенья гусениц тракторов и другие детали, работающие в условиях абразивного износа
	110Г13Х2БРЛ	Высокое сопротивление износу при одновременном воздействии высоких давлений или ударных нагрузок	Для спецпродукции

Достижению в литых деталях требуемых свойств способствует термическая обработка отливок, режимы которой приведены в табл. 3 и 4.

3. Режимы термической обработки конструкционной нелегированной и легированной стали

Марка стали	Нормализация и отпуск, °С		Закалка и отпуск, °С	
	Нормализация	Отпуск	Закалка	Отпуск
15Л	910...930	—	—	—
	910...930	670...690	—	—
20Л	880...900	—	—	—
	880...900	630...650	—	—
25Л	880...900	610...630	870...890	610...630
30Л	880...900	610...630	860...880	610...630
35Л	860...880	600...630	860...880	600...630
40Л	860...880	600...630	860...880	600...630
45Л	860...880	600...630	860...880	600...630
50Л	860...880	600...630	860...880	600...630
20ГЛ	880...900	600...650	870...890	620...650
35ГЛ	880...900	600...650	850...860	600...650
20ГСЛ	870...890	570...600	—	—
30ГСЛ	870...890	570...600	920...950	570...650
20Г1ФЛ	930...970	600...650	—	—
20ФЛ	920...960	600...650	—	—
30ХГСФЛ	900...930	600...650	900...920	630...670
45ФЛ	880...920	600...650	880...920	600...650
32Х06Л	—	—	890...910	620...660
40ХЛ	—	—	850...870	600...650
20ХМЛ	880...890	600...650	—	—
20ХМФЛ	970...1000	710...740	—	—
	960...980	—	—	—

Окончание табл. 3

Марка стали	Нормализация и отпуск, °С		Закалка и отпуск, °С	
	Нормализация	Отпуск	Закалка	Отпуск
20ГНМФЛ	910...930	600...650	910...930	640...660
35ХМЛ	860...880	600...650	860...870	600...650
30ХНМЛ	860...880	600...650	860...870	600...650
35ХГСЛ	870...890	570...600	870...880	630...670
35НГМЛ	—	—	860...880	600...650
20ДХЛ	880...890	560...600	880...890	560...600
08ГДНФЛ	920...950	—	—	—
	920...950	590...650		
13ХНДФЛ	950...970	—		
	900...920	530...560		
12ДН2ФЛ	910...930	530...560		
	или		Окончательная обработка	
	Предварительная обработка		890...910	560...600
12ДХН1МФЛ	940...950	—	—	—
	940...960	—	—	—
	890...910	520...630	890...910	520...630
23ХГС2МФЛ	Предварительная обработка		Окончательная обработка	
	1000...1040	720...740	1000...1020	180...220
12Х7Г3СЛ	Предварительная обработка		Окончательная обработка	
	940...960	650...720	880...900	200...250
25Х2ГНМФЛ	Предварительная обработка		Окончательная обработка	
	900...950	650...700	880...920	630...700
25Х2ГНМФЛ	Предварительная обработка		Окончательная обработка	
	900...950	660...680	900...950	260...300
27Х5ГСМЛ	Предварительная обработка		Окончательная обработка	
	970...990	700...720	980...1000	200...220
30Х3С3ГМЛ	Предварительная обработка		Окончательная обработка	
	970...990	700...720	980...1000	200...220

Для стали марки 40ХФЛ допускается применять отпуск после нормализации. Для стали марки 23ХГС2МФЛ приведенные режимы предварительной термической обработки могут заменяться закалкой с отпуском, отжигом или отпуском. Для стали марок 03Н12Х5М3ТЛ и 03Н12Х5М3ТЮЛ рекомендуется применять термическую обработку по режиму: гомогенизация при температуре 1180...1200 °С; закалка с 1000 °С; старение при температуре 500 °С.

4. Режимы термической обработки легированной стали со специальными свойствами

Класс стали	Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки
Мартенситный	20Х5МЛ	Отжиг при 940...960 °С, нормализация при 940...960 °С, охлаждение на воздухе; отпуск при 680...720 °С, охлаждение на воздухе
	20Х8ВЛ	То же
	20Х13Л	Отжиг при 940...960 °С; закалка с 1040...1060 °С, охлаждение в масле или на воздухе; отпуск при 740...760 °С, охлаждение на воздухе
	08Х14Н4Л	Закалка с 1000...1200 °С, охлаждение на воздухе; отпуск при 660...700 °С, охлаждение на воздухе
	09Х16Н4БЛ	Нормализация при 1040...1060 °С, охлаждение на воздухе; отпуск при 600...620 °С, охлаждение на воздухе; закалка с 950...1050 °С, охлаждение в масле или на воздухе; отпуск при 600...620 °С, охлаждение на воздухе
	09Х16Н4БЛ	Нормализация при 1040...1060 °С, охлаждение на воздухе; отпуск при 600...620 °С, охлаждение на воздухе; закалка с 950...1050 °С, охлаждение в масле; отпуск при 290...310 °С, охлаждение на воздухе
	09Х17Н3СЛ	Отжиг при 660...670 °С; закалка с 1040...1060 °С, охлаждение в масле; отпуск при 300...350 °С, охлаждение на воздухе
	09Х17Н3СЛ	Закалка с 1040...1060 °С, охлаждение в масле; отпуск при 540...560 °С, охлаждение на воздухе

Продолжение табл. 4

Класс стали	Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки
Мартенситный	09X17H3CII	Отпуск при 670...690 °С, охлаждение на воздухе
	40X9C2II	Без термической обработки
	10X12ЦДЛ	Нормализация при 940...960 °С, охлаждение на воздухе или закалка с 950...1050 °С, охлаждение со скоростью 30 °С/ч; отпуск при 650...680 °С
	20X12ВНМФЛ	Отжиг, отпуск при 710...730 °С, 10...15 ч, охлаждение с печью до 200 °С; двойная нормализация: 1100 и 1050 °С, охлаждение со скоростью не менее 300 °С/ч, обдувка воздухом; отпуск при 710...730 °С, 10...15 ч, охлаждение с печью до 200 °С. Мелкие отливки (толщина стенки до 5 мм) могут подвергаться одной нормализации при температуре 1070...1090 °С
	85X4M5Ф2В6Л (P6M5II)	Отжиг при 860...880 °С, выдержка, охлаждение с печью до 740...760 °С, выдержка, охлаждение с печью до 500 °С, охлаждение на воздухе
Мартенситно-ферритный	90X4M4Ф2В6Л (P6M4Ф2II)	Отжиг при 860...880 °С, выдержка, охлаждение с печью до 740...760 °С, выдержка, охлаждение с печью до 500 °С, охлаждение на воздухе
	15X13Л	Отжиг при 940...960 °С; закалка с 1040...1060 °С, охлаждение в воде, масле или на воздухе; отпуск при 740...760 °С, охлаждение на воздухе
Ферритный	15X25ТЛ	Без термической обработки
Аустенитно-мартенситный	08X15H4ДМЛ	Закалка с 1030...1050 °С, охлаждение на воздухе. Отпуск при 600...620 °С, охлаждение на воздухе

Продолжение табл. 4

Класс стали	Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки
Аустенитно-мартенситный	08X14H7MЛ	Закалка с 1090...1110 °С, нагрев в защитной среде, охлаждение на воздухе; обработка холстом при минусе 50...70 °С; отпуск при 250...350 °С, охлаждение на воздухе
	14X18H4ГЛ	Закалка с 1020...1070 °С, охлаждение в воде
	12X25H5TMФЛ	Закалка с 1140...1160 °С, охлаждение с печью до 970...990 °С, далее в масле
	35X23H7СЛ	Без термической обработки
Аустенитно-ферритный	40X24H12СЛ	Закалка с 1040...1060 °С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
	20X20H14С2Л	Нормализация при 1100...1150 °С, охлаждение на воздухе
	16X18H12С4ТЮЛ	Закалка с 1150...1200 °С, охлаждение на воздухе
	10X18H3Г3Д2Л	Нормализация при 1070...1100 °С, охлаждение на воздухе. Отпуск первый при 790...810 °С, охлаждение до 20 °С. Отпуск второй при 590...610 °С
	10X18H9Л	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
	07X17H16ТЛ	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде
Аустенитный	12X18H9ТЛ	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
	10X18H11БЛ	Закалка с 1100...1150 °С, охлаждение в воде
	12X18H12M3ТЛ	Закалка с 1100...1150 °С, охлаждение в воде
	55X18Г14С2ТЛ	Без термической обработки
	15X23H18Л	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде
	20X25H19С2Л	Закалка с 1090...1110 °С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
	18X25H19СЛ	Закалка с 1090...1110 °С, охлаждение в воде, масле или на воздухе

Описание табл. 4

Класс стали	Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки
	45X17Г13Н3ЮЛ	Без термической обработки
	15X18Н23В6М2РЛ	Старение при 790...810 °С, 12...16 ч, охлаждение на воздухе
	08X17Н34В5Т3Ю2РЛ	Закалка с 1140...1160 °С, охлаждение на воздухе; старение при 740...760 °С, 32 ч, охлаждение на воздухе
	20X21Н46В8РЛ	Старение при 890...910 °С, 5 ч, охлаждение на воздухе
	35X18Н34С2Л	Закалка с 1140...1160 °С, охлаждение в воде
Аустенитный	31Х19Н9МВБТЛ	Закалка с 1150...1180 °С, охлаждение в воде; старение при 700...800 °С
	12X18Н12БЛ	Закалка с 1170...1190 °С, охлаждение на воздухе; двойное старение: 790...810 °С, 10 ч и 740...760 °С, 16 ч
	110Г13Х2БРЛ	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде
	110Г13ФЛ	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде
	130Г14ХМФАЛ	Закалка с 1120...1150 °С, охлаждение в воде
	120Г10ФЛ	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде
	110Г13Л	Закалка с 1050...1100 °С, охлаждение в воде

ГОСТ 977—88 разрешает по согласованию изготовителя с потребителем не производить термическую обработку отливок I-й группы из конструкционных нелегированных и легированных сталей и отливок I—3-й групп из легированных сталей со специальными свойствами при обеспечении механических и специальных свойств стали технологией выплавки и формообразования.

Число допустимых полных термических обработок отливок должно быть не более трех, а отливок из аустенитных и аустенитно-ферритных легированных сталей со специальными свойствами — не более двух.

Назначение стали для хладостойких отливок указано в табл. 5. При этом должна производиться термическая обработка отливок по технологии, указанной в табл. 6 (рекомендация ГОСТ 21357—87).

5. Назначение марок стали для износостойких отливок

Марка стали	Назначение
08Г2ДНФЛ	Крупногабаритные корпусные отливки: верхние части рам картеров, постели подшипников, литые детали экскаваторов большой грузоподъемности и другие сваривающиеся детали повышенной прочности
12ХГФЛ	Ответственные литые детали тракторов, сварно-литые несущие конструкции
20ГЛ, 20ФЛ	Ответственные литые детали автосцепного устройства и тележки грузовых вагонов
14ХГМРЛ, 14ХГСФЛ, 25Х2НМЛ	Ответственные сварно-литые конструкции больших сечений карьерных и шпалочных экскаваторов
35ХМФЛ, 35ХМЛ	Ответственные литые детали горно-металлургического оборудования
27ХН2МФЛ	Печельнолитые зубья и элементы их крепления (скобы, клинья) шпильковых экскаваторов
27ХГСНМЛЛ	Наконечники рычажителей мерзлых грунтов, опорные катки тяжелых бульдозеров, ведущие шестерни, звездочки гусеничных машин и др.
30ГЛ, 30ХЛ	Корпуса поворачивающих аппаратов грузовых вагонов
30ХГ2СТЛ	Башмаки гусеничных машин, угловые ножи бульдозеров, кремальерные шестерни экскаваторов, опорные ролаки дражных цепей, рабочие органы шахтных машин, рычаги, зубчатые колеса
110Г1Л, 110Г13ХБРЛ	Зубья ковшей экскаваторов, гусеничные звенья, рабочие органы дробильного оборудования

6. Режимы термической обработки износостойкой и износостойкой стали

Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки
08Г2ДНФЛ	Нормализация при 930...970 °С Нормализация при 920...950 °С, отпуск при 590...630 °С
12ХГФЛ	Нормализация при 930...950 °С

Описание табл. 6

Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки
14Х2ГМРЯ	Закалка с 920...930 °С в воде, отпуск при 630...650 °С
20ГЛ	Нормализация при 920...940 °С Закалка с 920...940 °С в воде, отпуск при 600...620 °С
20ФЛ	Нормализация при 940...960 °С Закалка с 930...950 °С в воде, отпуск при 600...650 °С
20ХГСФЛ	Нормализация при 900...920 °С, отпуск при 630...650 °С Закалка с 900...920 °С в воде, отпуск при 650...670 °С
25Х2НМЛ	Закалка с 860...880 °С в воде, отпуск при 580...600 °С
27ХН2МФЛ	Закалка с 880...920 °С в воде, отпуск при 570...590 °С
27ХГСНМДЛ	Нормализация при 910...930 °С, отпуск при 590...610 °С Закалка с 910...930 °С в воде, отпуск при 640...660 °С Закалка с 910...930 °С в воде, отпуск при 200...220 °С
30ГЛ	Закалка с 920...950 °С в воде, отпуск при 600...650 °С
30ХГ2СГО	Нормализация при 890...910 °С, отпуск при 640...660 °С Закалка с 870...890 °С в воде, отпуск при 640...660 °С Закалка с 870...890 °С в воде, отпуск при 200...220 °С
30ХЛ	Закалка с 920...950 °С в воде, отпуск при 600...650 °С
35ХМФЛ	Нормализация при 900...920 °С, отпуск при 640...670 °С Закалка с 890...910 °С в воде, отпуск при 650...670 °С
35ХМЛ	Закалка с 890...910 °С в масле, отпуск при 620...640 °С
110Г13Л	Закалка с 1050...1100 °С в воде*
110Г13ХБРЯ	Закалка с 1050...1100 °С в воде*

* Применяют как износостойкие.

Примечание. Структура стали марок 110Г13Л и 110Г13ХБРЯ после термообработки должна быть чисто пустельной

1.2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТАЛИ

Химический состав конструкционной нелегированной и легированной стали приведен в табл. 7, а легированной стали со специальными свойствами - в табл. 8.

Для конструкционных нелегированных и легированных сталей допустимое содержание и необходимость контроля элементов, не являющихся легирующими, устанавливается в конструкторской или нормативно-технической документации. По требованию потребителя содержание серы и фосфора в легированных конструкционных сталях может быть установлено не более 0,03 %. При выплавке легированной стали в печах с кистой футеровкой допустимая массовая доля серы и фосфора может быть увеличена на 0,01 % каждого при условии обеспечения остальных требований стандарта.

Для стали марки 40ХНЛ допускается введение титана до 0,15 % для повышения ее механических свойств. В стали марки 20Х5МЛ молибден может быть заменен титаном в количестве не более 0,1 % при условии работы деталей при температуре не более 425 °С. В стали марки 10Х18Н9Л при необходимости обеспечения большей стойкости против межкристаллитной коррозии содержание углерода может быть установлено не более 0,07 %. В стали марки 20Х13Л допускается при выплавке в индукционной печи повышение массовой доли серы до 0,03 %.

В стали марки 12Х18Н12БЛ суммарная массовая доля серы и фосфора должна быть не более 0,04 %. В стали марок 12Х21Н5Г2СТЛ и 15Х18Н10Г2С2М2ТЛ допускается для стабилизации вместо титана использовать ниобий с танталом в количестве от (8+С) до 1,20 %. В стали марок 08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ, 15Х18Н22В6М2РЛ, 20Х21Н46В8РЛ содержание и необходимость контроля бора и церия устанавливается в конструкторской и нормативно-технической документации.

В обозначении марок стали первые цифры указывают среднюю или максимальную (при отсутствии нижнего предела) массовую долю углерода в сотых долях процента; буквы за цифрами означают: А — азот, Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, М — молибден, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Ю — алюминий, Л — литейная. Цифры, стоящие после букв, указывают примерную массовую долю легирующего элемента в процентах.

Допускаемые отклонения легирующих элементов от норм химического состава, приведенных в табл. 7, не должны превышать значений, указанных в табл. 9.

7. Химический состав конструкционной нелегированной и легированной стали

Марка стали	Массовая доля элемента, %												
	Углерод	Марганец	Кремний	Фосфор не более	Сера не более	Хром	Никель	Молибден	Ванадий	Медь	Титан	Бор	Алюминий
Стали конструкционные нелегированные													
15Л	0,12... 0,20	0,45... 0,90	0,20... 0,52	См. табл. 10	См. табл. 10	—	—	—	—	—	—	—	—
20Л	0,17... 0,25	0,45... 0,90	0,20... 0,52	То же	То же	—	—	—	—	—	—	—	—
25Л	0,22... 0,30	0,45... 0,90	0,20... 0,52	»	»	—	—	—	—	—	—	—	—
30Л	0,27... 0,35	0,45... 0,90	0,20... 0,52	»	»	—	—	—	—	—	—	—	—
35Л	0,32... 0,40	0,45... 0,90	0,20... 0,52	»	»	—	—	—	—	—	—	—	—
40Л	0,37... 0,45	0,45... 0,90	0,20... 0,52	»	»	—	—	—	—	—	—	—	—
45Л	0,42... 0,50	0,45... 0,90	0,20... 0,52	»	»	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 7

Марка стали	Массовая доля элемента, %												
	Углерод	Марганец	Кремний	Фосфор	Сера	Хром	Никель	Мошблен	Ванадий	Медь	Титан	Бор	Алюминий
50Л	0,47...	0,45...	0,20...	не более	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,55	0,90	0,52										
Сталь конструкционные легированные													
20ГЛ	0,15...	1,20...	0,20...	0,040	0,040	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,25	1,60	0,40										
35ГЛ	0,30...	1,20...	0,20...	0,040	0,040	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,40	1,60	0,40										
20ГСЛ	0,16...	1,00...	0,60...	0,030	0,030	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,22	1,30	0,80										
30ГЛ	0,25...	1,10...	0,60...	0,040	0,040	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,35	1,40	0,80										
20Г1ФЛ	0,16...	0,90...	0,20...	0,050	0,050	—	—	—	0,06...	—	Не более	—	—
	0,25	1,40	0,50						0,12	0,05			

20ФД	0,14... 0,25	0,70... 1,20	0,20... 0,52	0,050	0,050	—	—	—	—	0,06... 0,12	—	—	—
30ХГСФД	0,25... 0,35	1,00... 1,50	0,40... 0,60	0,050	0,050	0,30... 0,50	—	—	—	0,06... 0,12	—	—	—
45ФД	0,42... 0,50	0,40... 0,90	0,20... 0,52	См. табл. 9	См. табл. 9	—	—	—	—	0,05... 0,10	He более 0,03	—	—
32Х06Д	0,25... 0,35	0,40... 0,90	0,20... 0,40	0,050	0,050	0,50... 0,80	—	—	—	—	—	—	—
40ХД	0,35... 0,45	0,40... 0,90	0,20... 0,40	0,040	0,040	0,80... 1,10	—	—	—	—	—	—	—
20ХМД	0,15... 0,25	0,40... 0,90	0,20... 0,42	0,040	0,040	0,40... 0,70	—	—	0,40... 0,60	—	—	—	—
20ХМФД	0,18... 0,25	0,60... 0,90	0,20... 0,40	0,025	0,025	0,90... 1,20	—	—	0,50... 0,70	0,20... 0,30	—	—	—
20ГНМФД	0,14... 0,22	0,70... 1,20	0,20... 0,40	0,030	0,030	He более 0,30	He более 0,30	0,70... 1,00	0,15... 0,25	0,06... 0,12	—	—	—
35ХМД	0,30... 0,40	0,40... 0,90	0,20... 0,40	0,040	0,040	0,80... 1,10	—	—	0,20... 0,30	—	—	—	—
30ХНМД	0,25... 0,35	0,40... 0,90	0,20... 0,40	0,040	0,040	1,30... 1,60	1,30... 1,60	1,30... 1,60	0,20... 0,30	—	—	—	—

Марка стали	Массовая доля элемента, %												
	Углерод	Марганец	Кремний	Фосфор не более	Сера не более	Хром	Никель	Молибден	Ванадий	Медь	Титан	Бор	Алюминий
35ХГСЛ	0,30... 0,40	1,00... 1,30	0,60... 0,80	0,040	0,040	0,60... 0,90	—	—	—	—	—	—	—
35НГМЛ	0,32... 0,42	0,80... 1,20	0,20... 0,40	0,040	0,040	—	0,80... 1,20	0,15... 0,25	—	—	—	—	—
20ДХЛ	0,15... 0,25	0,50... 0,80	0,20... 0,40	0,040	0,040	0,80... 1,10	—	—	—	1,40... 1,60	—	—	—
08ГДНФЛ	Не более 0,10	0,60... 1,00	0,15... 0,40	0,035	0,035	—	1,15... 1,55	—	По расче- ту 0,10	0,80... 1,20	—	—	—
13ХНДФЛ	Не более 0,16	0,40... 0,90	0,20... 0,40	0,030	0,030	0,15... 0,40	1,20... 1,60	—	0,06... 0,12	0,65... 0,90	0,04... 0,10	—	—
12ДНЭФЛ	0,08... 0,16	0,40... 0,90	0,20... 0,40	0,035	0,035	—	1,80... 2,20	—	0,08... 0,15	1,20... 1,50	—	—	—
12ДХН1МФЛ	0,10... 0,18	0,30... 0,55	0,20... 0,40	0,030	0,030	1,20... 1,70	1,40... 1,80	0,20... 0,30	0,08... 0,15	0,40... 0,65	—	—	—

23XГС2МФЛ	0,18... 0,24	0,50... 0,80	1,80... 2,00	0,025	0,025	0,60... 0,90	—	0,25... 0,30	0,10... 0,15	—	—	—	—
12Х7Г3СЛ	0,10... 0,15	3,00... 3,50	0,80... 1,20	0,020	0,020	7,00... 7,50	—	—	—	—	—	—	—
25Х2ГНМФЛ	0,22... 0,30	0,70... 1,10	0,30... 0,70	0,025	0,025	1,40... 2,00	0,30... 0,90	0,20... 0,50	0,04... 0,20	—	—	—	—
27Х5ГСМЛ	0,24... 0,28	0,90... 1,20	0,90... 1,20	0,020	0,020	5,00... 5,50	—	0,55... 0,60	—	—	—	—	—
30Х3С3ГМЛ	0,29... 0,33	0,70... 1,20	2,80... 3,20	0,020	0,020	2,80... 3,20	—	0,50... 0,60	—	—	—	—	—
03Н12Х5М3ТЛ	0,01... 0,04	Не более 0,20	Не более 0,20	0,015	0,015	4,50... 5,00	12,00... 12,50	2,50... 3,00	—	—	0,70... 0,90	—	—
03Н12Х5М3ТЮЛ	0,01... 0,04	Не более 0,20	Не более 0,20	0,015	0,015	4,50... 5,00	12,00... 12,50	2,50... 3,00	—	—	0,70... 0,90	—	0,25... 0,45

8. Химический состав стали легированной

Класс стали	Марка стали	Массовая доля						
		Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Молибден	Ванадий
Мартенситный	20X13H	0,16... 0,25	0,20... 0,80	0,30... 0,80	12,0... 14,0	—	—	—
	08X14H4ДЛ	Не Более 0,08	Не Более 0,40	0,50... 0,80	13,0... 14,0	1,20... 1,60	—	—
	09X16H4БЛ	0,05... 0,13	0,20... 0,60	0,30... 0,60	15,0... 17,0	3,50... 4,50	—	—
	09X17H3СЛ	0,05... 0,12	0,80... 1,50	0,30... 0,80	15,0... 18,0	2,80... 3,80	—	—
	20X5MЛ	0,15... 0,25	0,35... 0,70	0,40... 0,60	4,0... 6,5	—	0,40... 0,65	—
	20X8ВЛ	0,15... 0,25	0,30... 0,60	0,30... 0,50	7,5... 9,0	—	—	—
	40X9С2Л	0,35... 0,50	2,80... 3,00	0,30... 0,70	8,0... 10,0	—	—	—
	20X12ВНМФЛ	0,17... 0,23	0,20... 0,60	0,50... 0,90	10,5... 12,5	0,50... 0,90	0,50... 0,70	0,15... 0,30
	10X12H4ДЛ	Не Более 0,10	0,17... 0,40	0,20... 0,60	12,0... 13,0	1,00... 1,50	—	—
	85Х1М5Ф2В6Л (Р6МСЛ)	0,82... 0,90	Не Более 0,50	Не Более 0,50	3,8... 4,4	Не Более 0,40	4,80... 5,30	1,70... 2,10
90Х1М4Ф2В6Л (Р6М4Ф2В)	0,85... 0,95	0,20... 0,40	0,40... 0,70	3,0... 4,0	—	3,00... 4,00	2,00... 2,60	
Мартенситно-ферритный	15X13Л	Не Более 0,15	0,20... 0,80	0,30... 0,80	12,0... 14,0	—	—	—

СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

элементы, %

Вольфрам	Титан	Никобин	Бор	Азот	Алюминий	Медь	Церий	Сера	Фосфор
								не более	
—	—	—	—	—	—	—	—	0,025	0,030
—	—	—	—	—	—	0,80.. 1,20	—	0,025	0,025
—	—	0,05 .. 0,20	—	—	—	—	—	0,025	0,030
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	—	—	—	—	—	—	—	0,040	0,040
1,25 .. 1,75	—	—	—	—	—	—	—	0,035	0,040
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
0,70.. 1,10	—	—	—	—	—	—	—	0,025	0,030
—	—	—	—	—	—	0,80.. 1,10	—	0,025	0,025
5,50.. 6,50	—	—	—	—	—	—	—	0,025	0,030
5,00.. 7,00	—	—	—	—	—	—	—	0,040	0,040
—	—	—	—	—	—	—	—	0,025	0,030

Продолжение табл. 8

элементы, %

Вольфрам	Титан	Никобор	Бор	Азот	Алюминий	Медь	Церий	Сера	Фосфор
								не более	
—	0,40... 0,80	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	—	—	—	—	—	1,00... 1,40	—	0,025	0,025
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	0,08... 0,20	—	—	0,08... 0,20	—	—	—	0,030	0,030
—	0,40... 0,70	—	—	—	0,13... 0,35	—	—	0,030	0,030
—	—	—	—	—	—	—	—	0,035	0,035
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030
—	—	—	—	—	—	—	—	0,025	0,035
—	—	—	—	—	—	1,80... 2,20	—	0,030	0,030

Класс стали	Марка стали	Массовая доля						
		Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Молибден	Ванадий
Аустенитный	ЮХ18Н9Л	Не более 0,14	0,20... 1,00	1,00... 2,00	17,0... 20,0	8,00... 11,00	—	—
	12Х18Н9ТЛ	Не более 0,12	0,20... 1,00	1,00... 2,00	17,0... 20,0	8,00... 11,00	—	—
	ЮХ18Н11БЛ	Не более 0,10	0,20... 1,00	1,00... 2,00	17,0... 20,0	8,00... 12,00	—	—
	07Х17Н16УЛ	0,04... 0,10	0,20... 0,60	1,00... 2,00	16,0... 18,0	15,00... 17,00	—	—
	12Х18Н12М3ТЛ	Не более 0,12	0,20... 1,00	1,00... 2,00	16,0... 19,0	11,00... 13,00	3,00... 4,00	—
	55Х18Г14С2ТЛ	0,45... 0,65	1,50... 2,50	12,00... 16,00	16,0... 19,0	—	—	—
	15Х23Н18Л	0,10... 0,20	0,20... 1,00	1,00... 2,00	22,0... 25,0	17,00... 20,00	—	—
	20Х25Н19С2Л	Не более 0,20	2,00... 3,00	0,50... 1,50	23,0... 27,0	18,00... 20,00	—	—
	18Х25Н19СЛ	Не более 0,18	0,80... 2,00	0,70... 1,50	22,0... 26,0	17,80... 21,00	—	—
	45Х17Г13Н30Л	0,40... 0,50	0,00... 1,50	12,00... 15,00	16,0... 18,0	2,50... 3,50	—	—
	35Х18Н24С2Л	0,30... 0,40	2,00... 3,00	Не более 1,50	17,0... 20,0	23,00... 25,00	—	—

Продолжение табл. 8

элементы, %									
Вольфрам	Титан	Никобий	Бор	Азот	Алюминий	Медь	Церий	Сера	Фосфор
								не более	
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	От (5×С) до 0,70	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	—	0,45 0,90	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	0,005... 0,150	—	—	—	—	—	—	0,020	0,035
—	От (5×С) до 0,70	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	0,10... 0,30	—	—	—	—	—	—	0,030	0,040
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035
—	—	—	—	—	0,60... 1,00	—	—	0,030	0,035
—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,035

Класс стали	Марка стали	Массовая доля						
		Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Молибден	Ванадий
Аустенитный	31X19H9M5BTI	0,26... 0,35	Не Более 0,80	0,80... 1,50	18,0... 20,0	8,00... 10,00	1,00... 1,50	—
	12X18H12БЛ	Не Более 0,12	Не Более 0,55	0,50... 1,00	17,0... 19,0	11,80... 13,00	—	—
	01X17H19M5T302PH	Не Более 0,08	0,20... 0,50	0,30... 0,60	15,0... 18,0	32,00... 35,00	—	—
	15X18H12B6M2PH	0,10... 0,20	0,20... 0,60	0,30... 0,60	16,0... 18,0	20,00... 24,00	2,00... 3,00	—
	30X17H14B8PH	0,10... 0,25	0,20... 0,80	0,30... 0,80	19,0... 22,0	43,00... 48,00	—	—
	110Г13Л	0,90... 1,50	0,30... 1,00	11,50... 15,00	Не Более 1,0	Не Более 1,00	—	—
	110Г13Х2БРH	0,90... 1,50	0,30... 1,00	11,50... 14,50	1,0... 2,0	Не Более 0,50	—	—
	110Г13ФТЛ	0,90... 1,30	0,40... 0,90	11,50... 14,50	—	—	—	0,10... 0,30
	130Г14ХМФАЛ	1,20... 1,40	Не Более 0,60	12,50... 15,00	1,0... 1,5	Не Более 1,00	0,20... 0,30	0,08... 0,12
	120Г10ФЛ	0,90... 1,40	0,20... 0,90	8,50... 12,00	Не Более 1,0	Не Более 1,0	—	0,03... 0,12

Округление табл. 8

элементы, %									
Вольфрам	Титан	Никобил	Бор	Азот	Алюминий	Медь	Церий	Сера	Фосфор
								не более	
1,00... 1,50	0,20... 0,50	0,20... 0,50	—	—	—	—	—	0,020	0,035
—	—	0,70... 1,10	—	—	—	—	—	0,025	0,020
4,50... 5,50	2,60... 3,20	—	Не более 0,05	—	1,70... 2,10	—	Не более 0,01	0,010	0,010
5,00... 7,00	—	—	Не более 0,01	—	—	—	—	0,030	0,035
7,0... 9,0	—	—	Не более 0,06	—	—	—	—	0,035	0,040
—	—	—	—	—	—	—	—	0,050	0,120
—	—	0,08... 0,12	0,001... 0,006	—	—	—	—	0,050	0,120
—	0,01... 0,05	—	—	—	—	—	—	0,050	0,120
—	—	—	—	0,025... 0,050	—	—	—	0,050	0,070
—	Не более 0,15	Не более 0,01	—	Не более 0,03	—	Не более 0,7	—	0,050	0,120

9. Допускаемые отклонения легирующих элементов от норм химического состава

Химический элемент	Массовая доля элемента, %	Допускаемое отклонение, %	
		для нижнего предела содержания	для верхнего предела содержания
Углерод	До 0,25	-0,02	+0,01
	Св. 0,25 до 0,50	-0,03	+0,02
	Св. 0,50	-0,04	+0,03
Кремний	До 0,50	-0,05	+0,01
	Св. 0,50 до 0,90	-0,08	+0,15
	Св. 0,90 до 1,30	-0,15	+0,20
	Св. 1,30	-0,15	+0,25
Марганец	До 0,50	-0,07	+0,10
	Св. 0,50 до 0,90	-0,10	+0,18
	Св. 0,90	-0,12	+0,25
Хром	До 1,00	-0,07	+0,10
	Св. 1,00 до 2,00	-0,10	+0,15
	Св. 2,00	-0,15	+0,20
Никель	До 1,00	-0,10	+0,15
	Св. 1,00 до 2,00	-0,15	+0,20
	Св. 2,00	-0,20	+0,25
Молибден	До 0,20	-0,03	+0,03
	Св. 0,20	-0,05	+0,05
Ванадий	До 0,20	-0,03	+0,03
	Св. 0,20	-0,05	+0,05
Медь	Для всех содержащийся элемент	-0,10	+0,10
Титан	Для всех содержащийся элемент	-0,02	+0,02
Алюминий	Для всех содержащийся элемент	-0,01	+0,01

Массовая доля серы и фосфора в конструкционных нелегированных сталях должна соответствовать требованиям, указанным в табл. 10.

**10. Массовая доля серы и фосфора
в конструкционных нелегированных сталях**

Группа отливок	Массовая доля примесей, %, не более, в стали					
	основ- ной	кислой	основ- ной мар- тенов- ской	основ- ной	кислой	основ- ной мар- тенов- ской
	Сера			Фосфор		
1	0,040	0,060	0,050	0,040	0,060	0,050
2	0,035	0,060	0,045	0,035	0,060	0,040
3	0,030	0,050	0,045	0,030	0,050	0,040

Допускаемые отклонения легирующих элементов от норм химического состава, приведенных в табл. 8, не должны превышать значений, указанных в табл. 11.

**11. Допускаемые отклонения легирующих элементов
от норм химического состава**

Химический элемент	Массовая доля элемента, %	Допускаемое отклонение, %	
		для нижнего предела содержания	для верхнего предела содержания
Углерод	До 0,12	—	+0,01
	Св. 0,12	-0,02	+0,02
Марганец	До 0,90	-0,10	+0,10
	Св. 0,90 до 8,00	-0,12	+0,20
	Св. 8,00	-0,50	+0,50
Кремний	До 0,90	-0,10	+0,10
	Св. 0,90	-0,10	+0,20
Хром	До 5,0	-0,20	+0,20
	Св. 5,00 до 20,00	-0,50	+0,50
	Св. 20,00	-1,00	+1,00

Описание табл. 11

Химический элемент	Массовая доля элемента, %	Допускаемое отклонение, %	
		для нижнего предела содержания	для верхнего предела содержания
Никель	До 1,00	-0,10	+0,10
	Св. 1,00 до 2,00	-0,15	+0,10
	Св. 2,00 до 3,00	-0,20	+0,20
	Св. 3,00 до 6,00	-0,25	+0,20
	Св. 6,00	-0,50	+0,50
Молибден	Для всех содержаний элемента	-0,02	+0,02
Титан	До 0,50	-0,03	+0,03
	Св. 0,50 до 1,0	-0,05	+0,05
	Св. 1,0	-0,10	+0,10
Ванадий	Для всех содержаний элемента	-0,02	+0,03
Вольфрам	Для всех содержаний элемента	-0,05	+0,05
Ниобий	Для всех содержаний элемента	-0,02	+0,02
Медь	Для всех содержаний элемента	-0,10	+0,10

Для стали марки 85Х4М5Ф2В6Л (Р6М5Л) допускаются отклонения по массовой доле ванадия $\pm 0,1$ %. Для стали марки 90Х4М4Ф2В6Л (Р6М4Ф2Л) допускаются отклонения по массовой доле ванадия: $-0,2$ %; $+0,1$ %.

В отдельных случаях химический состав сталей уточняется техническими условиями и требованиями чертежей. Так, например, в электротехнической промышленности с целью улучшения качества литых нижний предел содержания Si в углеродистой и низколегированной стали установлен 0,3 % вместо 0,2 % по ГОСТ 977-88. Для деталей магнитопроводов электродвигателей тепловозов в целях обеспечения требуемых магнитных свойств верхний допустимый предел содержания С в стали установлен 0,32 %. На ряде заводов в кислых электропечах выплавляют сталь марок, не предусмотренных ГОСТ 977-88, а специально созданных для конкретных условий эксплуатации отдельных литых деталей. Примером является сталь 25ХГМЛ для отливок коллекторных втулок электродвигателей тепловозов.

Ранее коллекторные втулки отливались из стали 35Л (ГОСТ 977–88). В процессе эксплуатации электродвигателей выявилась необходимость повышения механических свойств стали, применяемой для изготовления коллекторных втулок. Требовалось повысить предел текучести с 274 до 343 МПа при относительном удлинении до 19 %.

Кроме повышенных механических свойств, новая сталь для литья коллекторных втулок должна была обладать обрабатываемостью и качеством литья на уровне стали 35Л (следует учесть, что коллекторные втулки испытываются гидравлически на плотность литья). Показатели механических свойств в пробных образцах и отливках должны быть максимально идентичными (на уровне стали 25Л).

Технологический процесс плавки и термообработки не должен существенно отличаться от технологии, применяемой для стали 25Л, являющейся основной в сталелитейном цехе завода. Выплавка ее производится в дуговых пятитонных печах с кислой набивной футеровкой.

Было предложено применить среднеуглеродистую литую сталь с введением в нее марганца, хрома, молибдена. Химический состав стали приведен в табл. 12.

12. Химический состав, %, стали 25ХГМЛ

С	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Al
					Не более		
0,20... 0,30	0,30... 0,50	0,70... 1,10	0,60... 0,90	0,20... 0,30	0,06	0,06	0,05... 0,10

Режим термической обработки остался таким же, как и для стали 35Л, т. е. нормализация при 890 °С и отпуск при 640 °С.

Механические свойства стали 35Л и предложенной легированной стали (ей присвоена марка 25ХГМЛ) приведены в табл. 13.

Внедренная сталь 25ХГМЛ удовлетворяет всем требованиям, поставленным условиями эксплуатации коллекторных втулок.

13. Механические свойства стали марок 35Л и 25ХГМЛ

Марка стали	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа не менее	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
35Л	490	274	15	25
25ХГМЛ	490	343	19	25

Важнейшим показателем качества кислой электростали является содержание в ней остаточного элемента — раскиспителя, в большинстве случаев Al, содержание которого находится в пределах 0,02...0,08 %.

Вредными примесями в кислой электростали являются цветные металлы (кроме приведенных в ГОСТ 977—88), например олово, вызывающее хрупкость стали.

Химический состав хладостойкой и износостойкой стали для отливок должен соответствовать ГОСТ 21357—87 «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали» (табл. 14), особенностью которой является низкое содержание S и P ($\leq 0,02$ % каждого).

ГОСТ 21357—87 рекомендует выплавлять хладостойкую и износостойкую сталь в электропечах и мартеновских печах с основной футеровкой, однако, по-видимому, не исключена возможность выплавки этих сталей и в кислых электропечах при условии применения ковшей-печей, тем более, что уже имеется информация [21, 22] о применении ковшей-печей в литейном производстве.

1.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И МИКРОСТРУКТУРА ОТЛИВОК

Механические свойства конструкционной нелегированной и легированной стали, а также стали со специальными свойствами определены ГОСТ 977—88 (табл. 15, 16), механические свойства хладостойкой и износостойкой стали — ГОСТ 21357—87 (табл. 17). Механические свойства по ГОСТ 977—88 характеризуют отливки с толщиной стенок до 100 мм.

Определение механических свойств металла отливок проводят на образцах, взятых от пробных брусков, или, при отсутствии пробных брусков, от отливок. Пробные бруски рекомендуется отливать в середине разливки каждой плавки. Рекомендуемые конфигурации, размеры пробных брусков и схемы вырезки образцов показаны на рис. 1—3. Определение ударной вязкости проводят по ГОСТ 9454—78 (рис. 4). Допускается применять приливной пробный брусок, размеры и место расположения которого устанавливают в конструкторской или нормативно-технической документации. Отделение приливных брусков от отливок производится после окончательной термической обработки. Утежняя изготовления пробных брусков и отливок должны быть одинаковыми. Пробные бруски или вырезанные из них заготовки для определения механических свойств должны проходить термическую обработку вместе с отливками данной партии. Для толстостенных отливок допускается вырезать образцы на расстоянии не более 30 мм от внешней поверхности отливки. При изготовлении крупногабарит-

14. Химический состав хладостойкой и износостойкой стали

Марка стали	Содержание химических элементов в процентах по массовой доле										
	Углерод	Марганец	Кремний	Хром	Никель	Молибден	Ванадий	Медь	Титан	Бор	Никобин
08Г2ДНФЛ	0,05... 0,10	1,30... 1,70	0,15... 0,40	Не более 0,30	1,15... 1,55	—	0,02... 0,08	0,80... 1,10	—	—	—
12ХГФЛ	0,10... 0,16	0,90... 1,40	0,30... 0,50	0,20... 0,60	Не более 0,30	—	0,05... 0,10	Не более 0,30	—	—	—
14Х2ГМРЛ	0,10... 0,17	0,90... 1,20	0,20... 0,42	1,40... 1,70	Не более 0,30	0,45... 0,55	—	Не более 0,30	—	По расчету 0,004	—
20ГЛ	0,17... 0,25	1,10... 1,40	0,30... 0,50	Не более 0,30	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—	—	—
20ФТЛ	0,17... 0,25	0,80... 1,20	0,30... 0,50	Не более 0,30	Не более 0,30	—	0,01... 0,06	Не более 0,30	0,010... 0,025	—	—
20ХГСФЛ	0,14... 0,22	0,90... 1,30	0,50... 0,70	0,30... 0,60	Не более 0,40	—	0,07... 0,13	Не более 0,30	—	—	—
25Х2НМЛ	0,22... 0,30	0,50... 0,80	0,20... 0,40	1,60... 1,90	0,60... 0,90	0,20... 0,30	—	Не более 0,30	—	—	—
27ХН2МФЛ	0,23... 0,30	0,60... 0,90	0,20... 0,42	0,80... 1,20	1,65... 2,00	0,30... 0,50	0,08... 0,15	Не более 0,30	—	—	—

Марка стали	Содержание химических элементов в процентах по массовой доле										
	Углерод	Марганец	Кремний	Хром	Никель	Молибден	Ванадий	Медь	Титан	Бор	Ниобий
27ХГСНМДТЛ	0,22... 0,31	0,90... 1,50	0,70... 1,30	0,70... 1,30	0,70... 1,20	0,10... 0,30	—	0,30... 0,50	0,03... 0,07	—	—
30ГЛ	0,25... 0,35	1,20... 1,60	0,20... 0,50	Не более 0,30	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—	—	—
30ХГ2СТЛ	0,25... 0,35	1,50... 1,80	0,40... 0,80	0,60... 1,00	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	0,01... 0,04	—	—
30ХЛ	0,25... 0,35	0,50... 0,90	0,20... 0,50	0,50... 0,80	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—	—	—
35ХМФЛ	0,30... 0,40	0,40... 0,60	0,20... 0,40	0,80... 1,10	Не более 0,30	0,08... 0,15	0,06... 0,12	Не более 0,30	—	—	—
35ХМЛ	0,30... 0,40	0,40... 0,90	0,20... 0,40	0,90... 1,10	Не более 0,30	0,20... 0,30	—	Не более 0,30	—	—	—
110Г13Л	0,90... 1,20	11,5... 14,5	0,40... 0,90	Не более 0,30	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—	—	—
110Г13ХБРЛ	0,90... 1,30	11,5... 14,5	0,30... 0,90	0,80... 1,50	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—	0,002... 0,005	0,06... 0,10

15. Механические свойства конструкционной нелегированной и легированной стали

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_m , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_m , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²
	Не менее					Не менее				
	Нормализация или нормализация с отпуском					Закалка и отпуск				
Стали конструкционные нелегированные										
15Л	196	192	24	35	491	—	—	—	—	—
20Л	216	412	22	35	491	—	—	—	—	—
25Л	235	441	19	30	392	294	491	22	33	343
30Л	255	471	17	30	343	294	491	17	30	343
35Л	275	491	15	25	343	343	540	16	20	294
40Л	294	520	14	25	294	343	540	14	20	294
45Л	314	540	12	20	294	392	589	10	20	245
50Л	334	569	11	20	245	392	736	14	20	294
Стали конструкционные легированные										
20ГЛ	275	540	18	25	491	334	530	14	25	383
35ГЛ	294	540	12	20	294	343	589	14	30	491

Марка стали	Предел текучести σ_s , МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²	Предел текучести σ_s , МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, кДж/м ²
	Не менее					Не менее				
	Нормализация или нормализация с отпуском					Закалка и отпуск				
20ГСЛ	294	540	18	30	294	—	—	—	—	—
30ГСЛ	343	589	14	25	294	392	638	14	30	491
20Г1ФЛ	314	510	17	25	491	—	—	—	—	—
20ФЛ	294	491	18	35	491	—	—	—	—	—
30ХГСФЛ	392	589	15	25	343	589	785	14	25	441
45ФЛ	392	589	12	20	294	491	687	12	20	294
32Х06Л	—	—	—	—	—	441	638	10	20	491
40ХЛ	—	—	—	—	—	491	638	12	25	392
20ХМЛ	245	441	18	30	294	—	—	—	—	—
20ХМФЛ	275	491	16	35	294	—	—	—	—	—
20ГНМФЛ	491	589	15	33	491	589	687	14	30	589
35ХМЛ	392	589	12	20	294	540	687	12	25	392

30XHMЛ	540	687	12	20	294	638	785	10	20	392
4XTCЛ	343	589	14	25	294	589	785	10	20	392
35HГMJ	—	—	—	—	—	589	736	12	25	392
20ДХЛ	392	491	12	30	294	540	638	12	30	392
08ГДНФЛ	343	441	18	30	491	—	—	—	—	—
13XНДФТЛ	392	491	18	30	491	—	—	—	—	—
12ДН2ФЛ	540	638	12	20	294	638	785	12	25	392
12ДХН1МФЛ	638	785	12	20	294	735	981	10	20	294
23XTC2МФЛ	—	—	—	—	—	1079	1275	6	24	392
12X7Г3СЛ	—	—	—	—	—	1079	1324	9	40	589
25X2ГНМФЛ	—	—	—	—	—	491	638	12	30	589
25X2ГНМФЛ	—	—	—	—	—	1079	1275	5	25	392
27X5ГСМЛ	—	—	—	—	—	1177	1472	5	20	392
30X3С3ГМЛ	—	—	—	—	—	1472	1766	4	15	196
03Н12Х5М3ТЛ	—	—	—	—	—	1275	1324	8	45	491
03Н12Х5М3ТЮЛ	—	—	—	—	—	1422	1472	8	35	294

16. Механические свойства стали легированной со специальными свойствами

Класс стали	Марка стали	Предел текучести σ_s , МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU , кДж/м ²
				Не менее		
Мартенситный	20Х5МЛ	392	589	16	10	392
	20Х8ВЛ	392	589	16	30	392
	20Х1Л	441	589	16	40	392
	08Х14НДЛ	510	648	15	40	590
	09Х16Н4БЛ	785	932	10	—	392
	09Х16Н4БЛ	883	1128	8	—	245
	09Х17Н3СЛ	736	981	8	15	196
	09Х17Н3СЛ	736	932	8	20	245
	09Х17Н3СЛ	638	834	6	10	—
	40Х9С2Л	Не нормируются				
	10Х12НДЛ	441	638	14	10	294
	20Х12ВНМФЛ	491	589	15	10	294
	85Х4М5Ф2В6Л (Р6М5Л)	Не регламентируются				

Мартенситный	90Х4М4Ф2В6Л (Р6М4Ф2Л)	Не регламентируются				
Мартенситно-ферритный	15Х13Л	392	540	16	45	491
Ферритный	15Х25ТЛ	275	441	—	—	—
Аустенитно-мартенситный	08Х15Н4ДМЛ	589	736	17	45	981
	08Х14Н7МЛ	687	981	10	25	294
Аустенитно-ферритный	14Х18Н4Г4Л	245	441	25	15	981
	12Х25Н5ТМФЛ	392	540	12	40	294
	35Х23Н7СЛ	245	540	12	—	—
	40Х24Н12СЛ	245	491	20	28	—
	20Х20Н14С2Л	245	491	20	25	—
	16Х18Н12С4ТЮЛ	245	491	15	30	275
	10Х18Н3Г3Д2Л	491	687	12	25	294
	10Х18Н9Л	177	441	25	35	981
	12Х18Н9ТЛ	196	441	25	32	590
	10Х18Н11БЛ	196	441	25	35	590
Аустенитный	07Х17Н16ТЛ	196	441	40	55	392
	12Х18Н12М3ТЛ	216	441	25	30	590

Класс стали	Марка стали	Предел текучести σ_s , МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость K_{CU} , кДж/м ²
Аустенитный	55X18Г14С2ТЛ	—	638	6	—	147
	15Х23Н18Л	294	540	25	40	981
	20Х25Н19С2Л	245	491	25	28	—
	18Х25Н19СЛ	245	491	25	28	—
	45Х17Г13Н3ЮЛ	—	491	10	18	981
	15Х18Н22В6М2РЛ	196	491	5	—	—
	08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ	687	785	3	3	—
	20Х21Н46В8РЛ	—	441	6	8	294
	55Х18Н24С2Л	294	549	20	25	—
	31Х19Н9МВБТЛ	294	540	12	—	294
	12Х18Н12БЛ	196	392	13	18	196
	110Г13Х2БРЛ	491	—	22	30	1962
	130Г14ХМФАЛ	441	883	50	40	2453

17. Механические свойства хладостойкой и износостойкой стали

Марка стали	Предел текучести σ_T	Временное сопротивление σ_b	Относительное удлинение δ	Относительное сужение ψ	Ударная вязкость		Твердость
					KCV-60	KCU-60	
					кДж/м ²		
08Г2ДНФЛ	400	500	20	45	2,5	4,0	—
12ХГФЛ	340	470	20	35	2,0	3,0	—
14Х2ГМРЛ	600	700	14	25	3,0	5,0	—
20ГЛ	300	500	20	35	2,0	3,0	—
	400	550	15	30	2,0	3,0	—
20ФТЛ	320	520	20	35	2,0	3,0	—
20ФТЛ	450	570	15	30	2,0	3,0	—
20ХГСФЛ	320	500	18	30	2,0	3,0	—
	450	600	14	25	2,0	3,0	—
25Х2НМЛ	700	800	12	25	2,5	3,0	—
27ХН2МФЛ	800	1000	10	22	2,0	3,0	265
27ХГСНМДТЛ	650	800	12	20	3,0	5,0	—
	700	850	12	25	3,5	5,0	—
	1150	1400	8	12	2,5	4,0	390

Марка стали	Предел текучести σ_T	Временное сопротивление σ_B	Относительное удлинение δ	Относительное сужение ψ	Ударная вязкость		Твердость
					KCV-60	KCU-60	
					МПа	МПа	%
30ГЛ	490	660	10	20	2,0	3,0	—
30ХГ2СТЛ	600	700	12	40	2,0	3,5	—
	650	750	15	40	2,5	3,5	—
	1300	1600	4	15	2,0	3,0	400
30ХЛ	550	660	10	20	2,0	3,0	—
35ХМФЛ	420	630	12	20	1,8	2,5	—
	550	700	12	25	2,0	3,0	—
35ХМЛ	600	700	10	18	2,0	3,0	—
110Г13Л	400	800	25	35	7,0	—	190
110Г13ХБРЛ	480	750	20	30	5,0	—	190

Примечание. Механические свойства стали марок 110Г1Л, 110Г13ФЛ и 120Г10ФЛ устанавливаются по согласованию изготовителя с потребителем.

ных отливок, требующих индивидуального контроля механических свойств, применяют приливные пробные бруски с толщиной, равной или близкой к преобладающей толщине стенок отливки.

Следует отметить, что даже при равной толщине стенок отливки и пробного бруска механические свойства отливок (прежде всего пластические), зависящие от химического состава стали, конфигурации отливок, литейной технологии, условий кристаллизации и других факторов, могут существенно отличаться от механических свойств пробных брусков. Испытания образцов, вырезанных из них, не характеризуют механических свойств самих отливок, а дают представление только о свойствах металла, помещенного на заливку данной детали, и качестве термообработки. При этом механические свойства могут различаться как в разных отливках, залитых металлом одной плавки, так и в отдельных частях одной отливки в пределах 10...45 % от среднего значения.

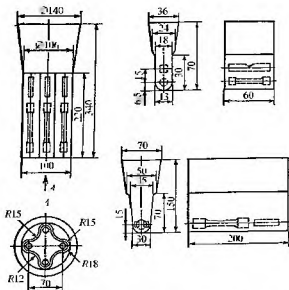


Рис. 1. Образцы для механических испытаний стали по ГОСТ 977-88

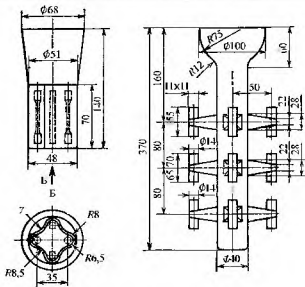


Рис. 2. Образцы для механических испытаний стали по ГОСТ 977-88

Исследованиями Б.Б. Гуляева установлено, что наименьшие пластические свойства соответствуют неплотностям в центральной зоне отливок, связанным с образованием в момент кристаллизации твердой фазы, размеры которой растут с увеличением содержания углерода в стали.

Незнание закономерностей распределения механических свойств в различных сечениях отливок, влияния их конфигурации, химического состава и других факторов на эти свойства приводит в одних случаях к неоправданно высокой массе отдельных деталей и узлов, в других — к неожиданным «слабым» местам в конструкциях. Поэтому изучение действительных механических свойств стальных отливок и установление объективных требований к ним таит в себе большие резервы.

Примером может служить проведенное автором исследование распределения механических свойств в различных сечениях отливок щек полюсов гидрогенераторов (рис. 5). Изначально эти отливки в

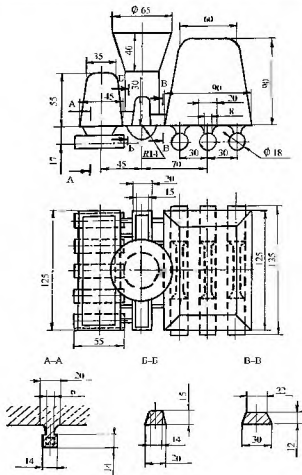


Рис. 3. Схема отливки литых образцов для механических испытаний стали по ГОСТ 977-88

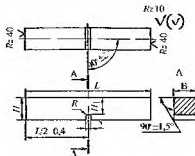


Рис. 4. Образец для определения ударной вязкости по ГОСТ 9454-78

соответствии с чертежом отливали из стали 35Л по ГОСТ 977-88. В отдельно заливаемых пробах все механические свойства соответствовали ГОСТ 977-88. В то же время имелись случаи выхода из строя шек полюсов при эксплуатации, в том числе поломки хвостовиков.

Исследования, проведенные на образцах, вырезанных из отливок, показали, что в наиболее ответственном месте отливки — хвостовике (рис. 5, А) показатели относительного удлинения колебались в пределах от 10 до 24,5 %, причем 40 % испытаний показывали результаты ниже уровня требований ГОСТа ($\delta \geq 15\%$). Это объяснялось тем, что в зоне хвостовика, расположенного в верхней части отливки, расположились усадочные рыхлоты и скопления неметаллических включений. Учитывая, что размеры твердой фазы при кристаллизации отливок увеличиваются с повышением содержания углерода в стали, отливки шек полюсов гидрогенераторов были переведены на сталь 25Л, в результате чего значительно (более чем в 2 раза) ускорилось затвердевание отливок и все 100 % отливок имели относительное удлинение $\geq 19\%$. Поломки хвостовиков шек полюсов прекратились.

Надежная работа литых деталей в значительной степени связана с их трещиностойкостью. Как показали исследования авторов работы [23], одной из причин образования трещин в кислой электростали является межкристаллитное разрушение, связанное со значительным скоплением сульфидов в центральной зоне и в термических узлах литых изделий (сульфиды II типа).

Пленкообразные сульфиды и оксиды, располагающиеся по границам зерен, ослабляют межзеренные связи. Кроме того, на процессы зарождения и развития трещин могут влиять оксиды алюминия, которые

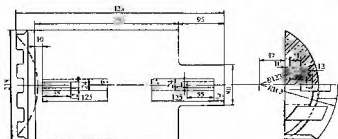


Рис. 5. Схема вырезки образцов для механических испытаний из отливки щеки волана гидротурбины

«не только снижают прочность межзеренных связей, но и создают микролокальную концентрацию напряжений, что способствует возникновению очага разрушения металла» [23]. В качестве одной из мер борьбы с трещинами в отливках, полученных из кислой электростали, было предложено использование отходов алюминиевого производства, содержащих щелочно- и редкоземельные элементы, способствующие образованию глобулярных сульфидных включений I типа [23].

Другой причиной образования трещин в литых деталях в процессе их эксплуатации, как показано в работе [24], является высокий уровень статических и динамических напряжений в наиболее опасных зонах деталей, в результате чего происходит усталостное разрушение деталей. Надежным способом оценки эксплуатационной стойкости является проведение усталостных испытаний натуральных деталей. В целях улучшения эксплуатационных характеристик предлагается модифицирование стали магнием и церием.

Для выбора рациональных марок сталей и установления объективных требований к механическим свойствам отливок целесообразно изучать поведение литых деталей при эксплуатации изделий.

Микроструктура отливок из кислой электростали не регламентируется ГОСТ 977–88, однако она является важным фактором качества стали, так как только при получении определенной микроструктуры стали после термической обработки достигаются требуемые механические свойства. Наиболее распространенные в промышленности углеродистые стали имеют ферритно-перлитную структуру. Количество феррита и перлита в стали определяется содержанием в ней C. Так, например, сталь [51] имеет 80 % феррита и 20 % перлита, а сталь 45Л —

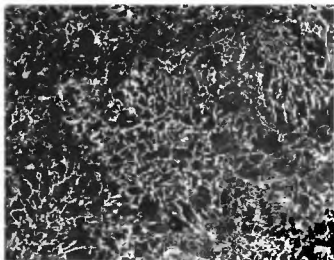


Рис. 6. Микроструктура кислой литой углеродистой стали 25Л после нормализации ($\times 100$)

30 % феррита и 70 % перлита. Характерная микроструктура углеродистой стали 25Л после нормализации и отпуска приведена на рис. 6. Размер зерна в литой углеродистой стали в зависимости от содержания углерода должен быть в пределах 20...30 мкм.

1.4. ГАЗЫ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Комплекс свойств стали в значительной степени определяется плотностью отливок. Газовые раковины, ситовидная пористость и усачочные дефекты, нарушающие сплошность металла, существенно снижают уровень его свойств, надежность и долговечность. Поэтому получение плотных отливок является одной из главных задач.

Газовые дефекты в отливках вызываются их повышенной газонасыщенностью, поэтому кислая электросталь должна содержать минимальное количество H_2 , N_2 и O_2 . По мнению Ю.А. Шульге [9], содержание H_2 в стали для отливок должно быть $\leq 4,5 \cdot 10^{-4} \%$ (4,5 ppm).

Имеются данные о содержании H_2 в кислой электростали в печи перед выпуском в пределах $(2,2...3,3) \cdot 10^{-4}\%$ ($2,2...3,3$ ppm), а N_2 — $6 \cdot 10^{-3}\%$ (60 ppm) [25]. Установлено, что сталь, выплавленная в кислых электропечных печах и обеспечившая высокую плотность отливок, содержала $(3,2...5,6) \cdot 10^{-4}\%$ H_2 (в среднем $4,6 \cdot 10^{-4}\%$ — $4,6$ ppm), $(4...9) \cdot 10^{-3}\%$ N_2 (в среднем $6,9 \cdot 10^{-3}\%$ — 69 ppm) и $2 \cdot 10^{-3}\%$ O_2 (20 ppm)

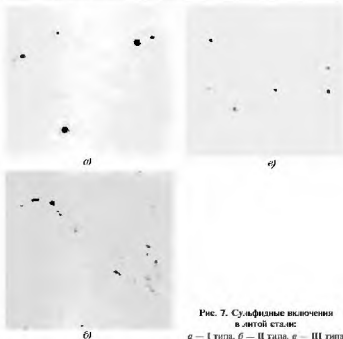
Однако следует отметить, что вопросы плотности отливок и газонасыщенности стали необходимо рассматривать в комплексе с вопросами газотворной способности формы. Большую роль играют влажность облицовочной формовочной смеси (из многолетней практики сталелитейного производства известно, что она должна быть не более 4%), выбор связующего и способ его охлаждения, гигроскопичность применяемой огнеупорной глины и другие факторы.

В достижении требуемых механических свойств и надежности работы литых деталей имеют значение форма, характер расположения и количество неметаллических включений. В общем балансе неметаллических включений в кислой электростали ($0,01...0,02\%$) [26] преобладают сульфиды, так как содержание S в стали обычно более чем в 10 раз превышает содержание O_2 .

Как известно, в литой углеродистой стали могут быть сульфиды трех типов: I — включения глобулярной формы, беспорядочно расположенные в массе стали; II — строчечные эпитаксиальные включения, расположенные по границам зерен; III — мелкораздробленные дезориентированные сульфиды (рис. 7). Тип сульфидов в литой стали определяет ее механические свойства, особенно пластичность и ударную вязкость.

Наиболее высокие механические свойства имеет сталь, содержащая сульфиды I типа. Такие включения, как правило, должны быть в стали, изготавливаемой по ГОСТ 21357—87. Для этой цели предусматривается обработка стали лигатурой редкоземельных и других металлов в количестве $0,10...0,20\%$ от массы металла. В кислой электростали общего назначения, изготавливаемой по ГОСТ 977—88, для обеспечения требуемых механических свойств достаточно устойчиво иметь сульфидные включения III типа, что достигается конечным раскислением стали алюминием, остаточное содержание которого должно быть $\geq 0,02\%$.

На качество кислой электростали (пластические свойства, ударную вязкость, предел усталости) значительное влияние оказывает и количество сульфидных включений, определяемое методом подсчета на шлифах. Этот метод применительно к литым сталям был усовершенствован в Запорожском машиностроительном институте имени В.Я. Чубаря и назван «линейным». По данным работы [9], количество неметаллических включений в стали 35Л, выплавленной в электропечи с кислой футеровкой, определенное линейным методом на четырех



шлифах при длине подсчета 15 см и увеличении 500, составляет протяженность 985 мкм, в том числе 900 мкм — сульфиды и 85 мкм — оксиды. Общий индекс загрязненности кислой электростали неметаллическими включениями составил $6,56 \cdot 10^{-3}$.

1.5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

К кислой электростали в ряде случаев предъявляются требования по специальным свойствам, не оговоренным действующими стандартами, примером которых служат магнитные свойства литых углеродистых сталей, широко применяемых в электротехнической промышленности для отливок магнитопроводов электрических машин.

Так, например, при производстве отливок магнитопроводов электродвигателей для тепловозов ориентиром служат технические условия ВТУ 618—46, регламентирующие магнитные свойства стали. При напряженности магнитного поля 2500, 5000 и 10 000 А/м магнитная индукция насыщения должна быть соответственно 1,45; 1,6 и 1,75 Тл.

В другом случае, при производстве индукторных генераторов, литые детали магнитопроводов должны обладать наилучшим сочетанием противоречивых магнитных свойств; максимально возможной магнитной индукцией насыщения и максимально возможной остаточной магнитной индукцией. В этом случае комплексная оценка магнитных свойств стали может производиться по суммарному проценту уровня магнитной индукции насыщения и остаточной магнитной индукции, принимая за 100 % максимальное значение каждого показателя в ряду рассматриваемых сталей. Другим методом комплексной оценки может быть усредненная магнитная проницаемость сталей

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_{\text{насыщ}} - \bar{\mu}_{\text{остаток}}$$

где $\bar{\mu}_{\text{насыщ}}$ и $\bar{\mu}_{\text{остаток}}$ — соответственно средние магнитные проницаемости на участках намагничивания и размагничивания полупетли гистерезиса.

При этом $\bar{\mu} = B_r / H_s$, где B_r — остаточная магнитная индукция, H_s — напряженность магнитного поля, соответствующая индукции насыщения.

Глава 2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ КИСЛОЙ СТАЛИ

2.1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАХ ЖИДКОЙ СТАЛИ

Жидкости (в том числе жидкая сталь) занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. В жидкостях наблюдается, с одной стороны, достаточно прочное сцепление частиц, а с другой — повышенная их подвижность [27]. Они обладают текучестью и характеризуются броуновским движением — хаотичностью перемещения отдельных частиц.

По своим свойствам и строению жидкости ближе к твердым телам, чем к газам, особенно при температурах, близких к температуре кристаллизации. Расположение частиц в жидкой стали не беспорядочно, а подобно расположению атомов в твердом металле. Основной характеристикой структуры жидкой стали является ближний порядок в отличие от кристаллических тел, обладающих дальним порядком. Понятие ближнего порядка включает в себя межатомные расстояния и число соседних атомов (координационное число).

В процессе расплавления в стали происходит переход от ближних порядков составляющих шихты к однородной атомной структуре, характерной для данного сплава. При этом исходные шихтовые материалы оказывают существенное влияние на строение и физико-химические свойства получаемого расплава, так как при плавлении мало изменяется характер и сила взаимодействия между частицами. Степень влияния шихтовых материалов на структуру ближнего порядка жидкой стали зависит от технологии выплавки стали, в том числе от температурного режима.

Среди примесей железа углерод занимает ведущее место, он определяет тип сплава железа и возможную область применения. Уже сравнительно небольшие колебания концентрации углерода приводят к значительным изменениям разнообразных свойств как жидкого, так и твердого сплава. По строению и свойствам расплавов Fe—C накоплен значительный материал. Тем не менее до сих пор нет единства взглядов на природу и строение расплавов Fe—C [28].

В жидкой стали при содержании от 0,15 % С в расплаве устойчива структура ближнего порядка, приближающаяся к структуре δ -Fe, при концентрации углерода более 0,4 % — γ -Fe. При 0,15...0,4 % С (это содержание характерно для большей части кислой электростали) в расплаве одновременно существуют ближние порядки, подобные структурам δ - и γ -Fe [27].

Строение жидкой стали, степень неоднородности ее структуры, плотность, вязкость, поверхностное натяжение в значительной мере влияют на формирование структуры и механических свойств литого металла.

Вязкость жидкой стали понижается до содержания углерода в ней 0,05...0,06 %, что связано с разрыхлением под влиянием углерода δ -подобной структуры расплава. При содержании углерода 0,06...0,25 % вязкость растет с максимумом при 0,08...0,12 %. При содержании углерода более 0,25 % вязкость жидкой стали понижается, что связано с увеличением удельного объема расплава и разрыхлением γ -подобной структуры под влиянием внедряющегося углерода.

Поверхностное натяжение жидкой стали уменьшается с ростом температуры (минимумы при 0,15 % С и максимумы при 0,35 % С). Это показано в работе А.Н. Усачева, Г.Н. Еланского и В.А. Кудрина [28].

В процессах плавления и кристаллизации существует определенная связь жидкого и твердого состояний металла, каждое из которых несет определенные наследственные признаки другого состояния.

Как уже отмечено, сталь после переплавов сохраняет определенные особенности структуры исходных шихтовых материалов.

В стали сохраняются приобретенные ранее наследственные признаки. Установлена закономерная связь наследственных структурных характеристик шихтовых материалов и стали после многократных переплавов. После неоднократных переплавов сталь не теряет однородности структуры, дисперсность которой повышается [29].

2.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРОЕНИЕ КИСЛЫХ ШЛАКОВ. ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ КИСЛЫХ ШЛАКОВ

Кислый процесс электроплавки стали характеризуется повышенным содержанием SiO_2 в шлаке; по расплавлению шлак содержит обычно, %: 40...50 SiO_2 , 20...35 FeO, 5...10 MnO, 5...15 CaO; перед выпуском 50...60 SiO_2 , 10...20 FeO, 5...15 MnO, 10...20 CaO. Растворимость SiO_2 в шлаке при 12 % CaO составляет 57 %.

В кислой печи в период плавления шихты формируется шлак, составляющими которого являются оксиды железа, образующиеся в результате окисления шихты под действием печной атмосферы, а также содержа-

щесы в шихте в виде окисной пленки металлолома, окалины и руды; продукты взаимодействия оксидов железа с кремнеземом футеровки; оксиды марганца и кремния, сформировавшиеся в период плавления в результате окисления шихты; кремнезем, попавший с шихтой в виде песка. Кроме того, шлак плавления содержит небольшое количество глинозема, образующегося в результате окисления содержащегося в шихте Al как остаточного элемента-раскислителя; небольшое количество оксидов кальция из попавшего в шихту известняка; оксиды хрома, титана и других легирующих элементов, окисленных в период плавления.

Взаимодействие оксидов железа с футеровкой начинается уже при температуре $\sim 1400^\circ\text{C}$, когда большая часть шихты еще не расплавлена (рис. 8). Формирующийся в период расплавления шлак представляет собой насыщенный кремнеземом однородный жидкий расплав железомарганцевых силикатов [30].

По мере расплавления шихты и повышения температуры расплав обогащается кремнеземом, концентрация которого в шлаке к концу периода плавления может достигнуть 50%. Сумма концентраций оксидов железа и марганца в кислом шлаке после расплавления обычно составляет 30...45%, сумма концентраций остальных оксидов не превышает 20%.

В дальнейшем по ходу плавки содержание кремнезема повышается и достигает концентрации насыщения, а во многих случаях и превы-

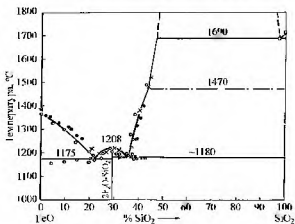


Рис. 8. Диаграмма состояния системы FeO — SiO₂

шает ее, достигая 55...60 % [31]. Содержание оксида железа в шлаке после периода плавления уменьшается, оксида марганца растет за счет окисления марганца, а оксида кальция растет за счет присадки известняка. Сумма всех оксидов шлака, кроме кремнезема, в середине и конце плавки составляет 40...45 %.

Суммарная концентрация (FeO) в кислом шлаке складывается из $(\text{FeO})_{\text{SiO}_2}$ и $(\text{FeO})_{\text{своб}}$, т.е. $\sum (\text{FeO}) = (\text{FeO})_{\text{SiO}_2} + (\text{FeO})_{\text{своб}}$.

С ростом (СаО) в окислительном и восстановительном периодах плавки концентрация кислорода в металле значительно уменьшается [10]. Поэтому в эти периоды плавки целесообразно работать при содержании (СаО) > 20 %.

Состав кислого шлака в значительной степени определяется растворимостью в нем кремнезема. Зависимость растворимости кремнезема в силикатных расплавах от температуры может быть охарактеризована данными, приведенными в табл. 18.

По данным работы [12] растворимость SiO_2 в системе FeO-MnO-SiO₂-Al₂O₃ в интервале температур сталеплавильного процесса составляет 47...50 %. Оксид кальция увеличивает растворимость SiO_2 в шлаке. При увеличении содержания СаО от 0 до 12 % растворимость SiO_2 повышается до 57 %; температура слабо влияет на растворимость SiO_2 .

18. Зависимость растворимости кремнезема в силикатных расплавах от температуры

Расплав	Растворимость (SiO_2) _{рас.} %, при t, °С		
	1475	1600	1650
FeO — SiO ₂	47	48	50
MnO — SiO ₂	47	50	52
MgO — SiO ₂	54	55	58
CaO — SiO ₂	63	66	68
SrO — SiO ₂	64	76	75
BaO — SiO ₂	75	79	83

Шлаки плавления можно считать трехкомпонентной системой SiO-FeO-MnO, они могут характеризоваться соответствующей диаграммой состояния (рис. 9) [30]. Состав кислого шлака после присадки известняка перед раскислением стали ферромарганцем и алю-

минимум может характеризоваться диаграммой состояния системы $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ (рис. 10) [30].

Шлаки сталеплавильных процессов состоят из ионов — положительно или отрицательно заряженных частиц. Эти частицы, а не электронейтральные молекулы, представляют собой простейшие структурные единицы, образующие шлак [26]. Жидкие шлаки электропроводны. Однако ионная теория не отрицает существования свободных и связанных оксидов; существование ионов означает лишь, что простейшими частицами в обычных шлаках являются не нейтральные молекулы, а заряженные ионы. Присутствие в шлаке SiO_2 означает существование ионов SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$, $\text{Si}_3\text{O}_{10}^{8-}$ и др. [27, 26]. При повышении кислотности шлаков, т.е. отношения $(\text{SiO}_2)/(\text{RO})$, кремнекислородные комплексы

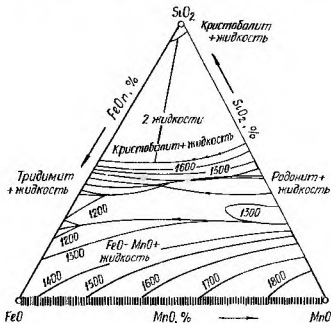


Рис. 9. Диаграмма состояния системы $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{MnO}$

Авторы [31] считают, что кремнекислородные тетраэдры являются стабильными как в жидком диоксиде кремния, так и в силикатных расплавах.

По мнению авторов [37], природу шлаков сталеплавильных процессов лучше всего отражает ионная теория. Авторы [33] считают, что кислые жидкие шлаки представляют собой ионные расплавы, состоящие из одноатомных катионов металлов, вносимых основными оксидами, анионов кислорода O^{2-} и многоатомных кремнекислородных анионов $Si_nO_{2n}^{2-}$ различной степени сложности: от простейшего тетраэдра SiO_4^{4-} при малых концентрациях SiO_2 до цепочек большой протяженности и других сложных образований, получающихся полимеризацией тетраэдров при высоких содержаниях диоксида кремния.

По мнению Н.М. Чуйко, физико-химические свойства шлаковых систем наилучшим образом объясняет молекулярно-ионная теория шлаков, предусматривающая как ионную, так и ковалентную связь, преобладающую в расплавах, богатых SiO_2 . По расчетам О.А. Есина, в кремнеземе на долю ковалентной связи приходится энергия, составляющая лишь 10 % от энергии ионной связи между ионами Si^{2+} и O^{2-} .

При температурах сталеплавильных процессов происходит частичная сублимация и диссоциация кремнезема. Исследованием, проведенным методом высокотемпературной масс-спектрометрии [34], установлено, что пар над SiO_2 содержит 63 % SiO , 26 % O_2 , 8 % O и 3 % SiO_2 . Однако в условиях производства стали SiO образуется не всегда [32].

С точки зрения ионной теории процесс распределения кислорода между шлаком и металлом связан с созданием отрицательного заряда в металле и положительного — в шлаке.

Важной характеристикой кислого шлака является его вязкость. С точки зрения ионной теории строения шлаков с увеличением содержания

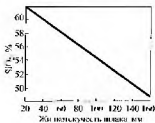
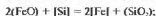


Рис. 11. Зависимость жидкотекучести кислых шлаков от содержания в них кремнезема

жидкотекучести (ионной теории строения шлаков с увеличением содержания (SiO_2), а следовательно, с укрупнением и усложнением кремнекислородных комплексов, вязкость шлака повышается [26, 13]. Содержание (SiO_2) оказывает наибольшее влияние на жидкотекучесть шлака (рис. 11) [12]. При содержании 60–62 % SiO_2 в кислом шлаке (выше предела растворимости) его вязкость резко увеличивается. Это объясняется тем, что при таком содержании SiO_2 шлаки не являются однородными, и значительная часть кремнезема в них находится во взвешенном состоянии [35].

2.3. ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

Период плавления в кислой электропечи характеризуется окислением Mn и Si:



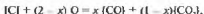
$$K_{\text{Mn}} = (\% \text{MnO}) / (\% \text{FeO}) [\% \text{Mn}];$$

$$K_{\text{Si}} = (\% \text{SiO}_2) / (\% \text{FeO})^2 [\% \text{Si}];$$

$$\lg K_{\text{FeO}} = -5500/t + 1,86;$$

$$\lg K_{\text{Si}} = -19057/t + 11,1$$

Концентрация кислорода в стали должна быть минимальной, ее уровень зависит от химического состава металла, шлака и температуры. В окислительный период плавки количество кислорода определяется концентрацией углерода в металле [36]. В соответствии с термодинамическими данными работы [37] процесс обезуглероживания описывается реакцией:



где x — доля кислорода, идущего на окисление углерода до CO.

При выплавке в кислых электропечах сталей с содержанием углерода 0,2...0,5 % x можно принять равным 1, и тогда реакцию окисления C можно представить в виде



для которой

$$K_{\text{C}} = p_{\text{CO}} / [\% \text{C}] [\% \text{O}].$$

По данным работы [39],

$$[\% \text{C}] \cdot [\% \text{O}] = 0,00275 + 0,00764[\% \text{C}],$$

константа равновесия этой реакции рассчитывается по уравнению:

$$\lg K_{\text{C}} = 1168/t + 2,07.$$

Влияние температуры на содержание кислорода в стали (при температурах сталеплавлениях процессов), по данным [38], выражается уравнением:

$$\lg[\% \text{O}] = -6629/t + 2,939.$$

С повышением температуры растворимость кислорода в железе увеличивается [16]. Кислород стремится распределиться между металлом и шлаком, и в момент равновесия

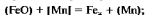
$$[O]_p = L_c(FeO),$$

где $[O]_p$ — равновесная концентрация кислорода в металле с (FeO); L_c — коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком.

Для кислого процесса

$$\lg L_c = -6400/t + 0,756$$

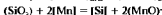
Если шлаки не содержат CaO, а концентрация C в металле низкая, основным регулятором состава металла и шлака является концентрация Mn в металле [10]. В этом случае протекают реакции:



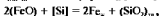
$$K_{Mn} = (\% FeO) [\% Mn]/(\% MnO);$$

где

$$(\% MnO) = (\% MnO)_{on,li} + (\% MnO)_{slag},$$



$$K_{Mn-Si} = (\% MnO)^2 [\% Si]/[\% Mn]^2;$$



$$K_{Si} = (\% FeO) [\% Si].$$

Константы равновесия этих реакций определяются по уравнению:

$$\lg K_{Mn} = -5500/t + 1,86;$$

$$\lg K_{Mn-Si} = -7100/t + 6,92;$$

$$\lg K_{Si} = -18\,200/t + 10,64.$$

А.Д. Крамаровым [12] установлены четкие зависимости концентрации Si и O_2 в железе, FeO и MnO в шлаке от концентрации Mn в железе. При 1625...1680 °C эти зависимости выражены следующим образом:

$$(FeO) = \frac{5,03}{[Mn]+0,095};$$

$$(MnO) = 53 - \frac{5,03}{[Mn]+0,095};$$

$$[Si] = 0,108[Mn] + 0,57[Mn]^2;$$

$$[O] = \frac{0,01350}{[Mn]+0,095}.$$

Окисление марганца происходит на поверхности раздела металл—шлак. Если бы взаимодействие C с оксидами шлака происходило

мгновенно, то окисление марганца было бы невозможно. В действительности окисление углерода на поверхности раздела металл—шлак происходит с ограниченной скоростью, поэтому часть оксида железа производит окисление кремния и марганца. Окисление марганца находится в зависимости и от содержания Si в металле; оно может происходить лишь в том случае, когда содержание Si в металле равно или меньше значений, отвечающих условиям равновесия с марганцем и твердым кремнеземом (или шлаком, насыщенным кремнеземом).

Повышение температуры сдвигает равновесие в сторону более высоких содержаний марганца. При густом шлаке окисление марганца происходит медленно, и обычно содержание марганца в металле выше равновесного. Окисление марганца может протекать и за счет кислорода, растворенного в металле.

Зависимость K_{Mn} от температуры приведена на рис. 12.

В тех случаях, когда шлак окислительного периода плавки обладает высокой жидкоподвижностью, соотношение между концентрациями марганца в металле, оксида марганца и оксида железа в шлаке близко к равновесным значениям. Поэтому можно пользоваться уравнением константы равновесия для определения соотношения между концентрациями названных веществ.

В густом шлаке диффузия закиси железа к поверхности раздела металл—шлак и диффузия оксида марганца в обратном направлении происходят медленно. Поэтому при густом шлаке окисление марганца происходит медленно, и обычно содержание марганца в металле выше значений, отвечающих равновесию металла со шлаком.

Окисление марганца может протекать и внутри жидкого металла за счет кислорода, растворенного в металле. В этом случае марганец удаляется из металла в результате образования и выделения из раствора шлаковых частиц с высоким содержанием марганца.

Изотермы равновесных концентраций Mn, Si и O_2 в системе Fe—Si—Mn—O с насыщенными кремнеземом продуктами окисления, построенные Ф. Кербером и В. Эльзеном, приведены на рис. 13

Более слабые раскислители положительно влияют на раскислительную способность алюминия, т.е. несколько элементов-раскислителей в сочетании имеют большую раскислительную способность, чем отдельно присутствующий в стали наиболее

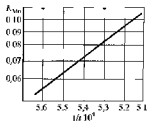


Рис. 12. Зависимость константы равновесия реакции окисления марганца (K_{Mn}) от температуры

сильный элемент-раскислитель. Наличие слабых раскислителей снижает содержание кислорода, равновесное с сильным раскислителем при данной температуре [13].

На рис. 14 представлена диаграмма Ассика, показывающая влияние элементов-раскислителей и их комбинаций на количество равновесного кислорода, растворенного в стали при 1600 °С. Особенно сильно возрастает раскислительная способность алюминия в присутствии марганца и кремния. В.И. Явойский [13] объясняет это тем, что при раскислении стали алюминием, кремнием и марганцем образуются

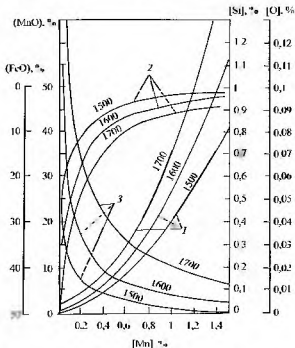


Рис. 13. Плотеры равновесных концентраций Si (2), Mn и O₂ (3) в системе Fe — Si — Mn — O с насыщающими кремнеземом продуктами окисления (2) [13]

неметаллические включения сложного химического состава, и между ионами отдельных оксидов возникают значительные силы взаимодействия, понижающие активность каждого из оксидов. Согласно уравнению

$$\frac{[\text{Me}]^m [\text{O}]^n}{a_{\text{Me}_m\text{O}_n}} = \text{const},$$

при понижении активности оксида и постоянном значении $[\text{Me}]$ концентрация кислорода должна понижаться. Поэтому в присутствии даже слабого раскислителя раскисляющая способность элемента, обладающего большим средством к кислороду, повышается.

Отсюда следует, что одной из основных задач сталеплавления является максимальное использование раскисляющей способности каждого элемента-раскислителя.

2.4. РОЛЬ КРЕМНИЯ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

Очевидно, чем лучше сталь предварительно раскислена кремнием и марганцем, тем меньше содержится в ней кислорода перед присадкой алюминия, а следовательно, тем меньше потребуется алюминия для получения необходимого его остаточного содержания в стали. С другой стороны, чем лучше сталь раскислена до ввода алюминия, тем большее можно получить остаточное содержание алюминия при равной его присадке.

По данным авторов [16] при 1600 °С в жидком железе с 0,2 % Si находится в равновесии 0,012 % растворенного кислорода. Вместе с тем при добавке 0,5 % Mn содержанию 0,2 % Si соответствует более низкая равновесная концентрация кислорода — 0,008 %. Таким образом, добавка марганца приводит к повышению раскислительной способности кремния. Рассматриваемый эффект увеличения раскислительной способности под влиянием второго компонента объясняется уменьшением термодинамической активности образующегося оксида в сложных продуктах раскисления, которые существенно отличаются от продуктов при раздельном раскислении — при совместном раскислении продуктами являются железомарганцевые силикаты, (SiO_2) образует раствор с (MnO) .

Исследования С.Ф. Фролова [40] показали, что содержание остаточного алюминия в стали в большой степени определяется содержанием кислорода в ней перед конечным раскислением.

По-видимому, именно этим можно объяснить тот факт, что на Харьковском тракторном заводе повышение содержания Si в стали от

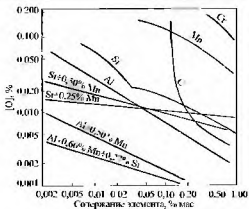


Рис. 14. Влияние раскислителей и их комбинаций на количество равновесного кислорода [9]

0,17...0,37 % до 0,3...0,5 % привело к резкому снижению брака отливок по ситуационной пористости. Углеродистую сталь для фасонного литья с повышенным содержанием кремния (до 0,5...0,6 %) выплавляют также на других заводах и имеют положительные результаты.

Условия равновесия кремния и кислорода в кислом тигле были исследованы Кербером, установившим зависимость между константой равновесия этой реакции и температурой

$$K_{Si} = [Si] \cdot [O]^2$$

Токен и Чирман путем лабораторных исследований установили, что произведение $[Si] \cdot [O]^2$ не представляет собой константы равновесия, так как коэффициенты активности кремния и кислорода значительно отличаются от единицы. Однако изменения величин этих коэффициентов взаимно компенсируются, поэтому произведение концентраций кремния и кислорода оказывается все же почти постоянным (при содержании кремния от 0,02 до 15 %).

В табл. 19 приведены уравнения и значения констант равновесия реакции раскисления железа кремнием по данным различных авторов, а в табл. 20 — значения K_{Si} , приведенные В.И. Ялойским [13]. Все эти данные свидетельствуют о существенной раскислительной способности кремния.

19. Уравнения и значения констант равновесия реакции раскисления железа кремнием

Авторы	Уравнение K_{Si}	Вещная K_{Si} при 1600 °С
Кербер	$\lg K_{Si} = \lg [Si][O]^2 = -\frac{26050}{t} + 9,5$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Гокен и Чипман	$\lg K_{Si} = \lg [Si][O]^2 = -\frac{32000}{t} + 12,29$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
Трубин и Ойкс	$\lg K_{Si} = \lg [Si][O]^2 = -\frac{32800}{t} + 12,95$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
Крамаров и Резникова	$\lg K_{Si} = \lg [Si][O]^2 = -\frac{31000}{t} + 12,152$	$3,8 \cdot 10^{-5}$
Крамаров и Резникова	$\lg K_{Si} = \lg \frac{[Si][O]^2}{a_{SiO_2}} = -\frac{31300}{t} + 12,152$	$2,7 \cdot 10^{-5}$

20. Константа равновесия реакции раскисления железа кремнием

Авторы	$K_{Si} = [Si][O]^2$ при 1600 °С
Фильд	$0,843 \cdot 10^{-6}$
Герти	$7,38 \cdot 10^{-6}$
Чипман	$0,743 \cdot 10^{-6}$
Самарин	$2,98 \cdot 10^{-6}$
Шенк и Брюгеман	$18,3 \cdot 10^{-6}$
Кербер и Эльзен	$36,1 \cdot 10^{-6}$
Американские металлурги	$37,0 \cdot 10^{-6}$
Резникова и Крамаров	$11,6 \cdot 10^{-6}$

Максимальной раскислительной способностью кремний обладает при низких температурах сталеплавильных процессов. На рис. 15 показана зависимость раскислительной способности кремния от температуры: например, содержанию 0,2 % [Si] при 1700 °С соответствует >0,03 % [O], а при 1550 °С — <0,01 %. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований Г. Шенка, построившего изотермы равновесных концентраций кремния и кислорода в тройной системе Fe —

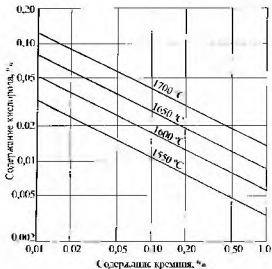
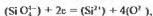
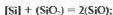


Рис. 15. Зависимость раскислительной способности кремния от температуры [12]

Si — O (рис. 16). Ю.А. Шудьте [8] приводит равновесные концентрации кислорода, рассчитанные по уравнению С.Я. Резниковой, для различных концентраций кремния и температур (табл. 21).

Эти данные также свидетельствуют о том, что путем раскисления стали кремнием при низких температурах можно достичь достаточно низких концентраций кислорода. Так, например, при 1500 °С, т.е. при температуре стали второй половины периода плавления, в равновесии с 0,3 % Si находится всего 0,005 % кислорода.

По данным авторов [33] в результате термодинамического анализа установлено присутствие при окислении кремния следующих реакций:



где $2e$ — отрицательный заряд.

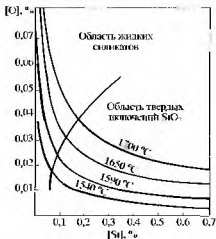


Рис. 16. Изотермы равновесных концентраций Si и O в тройной системе Fe — Si — O [9]

21. Влияние содержания кремния и температуры на равновесную концентрацию кислорода

Si, %	Равновесная концентрация кислорода, % при температуре, °C		
	1500	1600	1700
0,1	0,009	0,015	0,023
0,2	0,006	0,011	0,017
0,3	0,005	0,009	0,014

Кремний растворяется в железе в любых соотношениях. Растворение кремния в железе происходит с выделением тепла



Растворенный в металле кремний может окисляться кислородом:

— из газовой фазы



$$\Delta G^\circ = -77\,5670 + 198t;$$

— из шлака



для которой $K_{\text{ж}} = (\% \text{SiO}_2) [\% \text{Fe}]^2 / (\% \text{FeO})^2$ или $\lg K_{\text{ж}} = -19\,057/t + 11,1,$

$$\Delta G^\circ = -300\,000 + 98t;$$

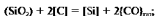
— растворенным в металле



$$\Delta G^\circ = -541\,840 + 203t.$$

Все эти реакции сопровождаются выделением большого количества тепла

Восстановление кремния при кислом процессе осуществляется в наибольшей степени за счет углерода [9]:



$$K_{\text{ж,г}} = [\% \text{Si}] / [\% \text{C}];$$

$$\lg K_{\text{ж,г}} = -32\,000/t + 17,62.$$

По данным Ю.А.Шульте [9] при 1600 °С и содержании углерода 0,1, 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 % равновесные концентрации кремния соответственно составят 0,04; 0,15; 0,3; 0,55 и 0,9 %, что относительно близко к практическим результатам. С повышением температуры восстановление кремния существенно возрастает. Зависимость концентрации восстановленного кремния от концентрации углерода в условиях равновесия при 1600 °С приведена на рис. 17.

Кремний восстанавливается углеродом как из шлака, так и из футеровки. А.Д. Крамаров [12] отмечает, что восстановление кремния углеродом из кремнезема футеровки может протекать с большой скоростью.

Кремний может также восстанавливаться и за счет марганца. При повышенном содержании Mn неметаллические включения внутри металла представляют собой жидкие железисто-марганцевые силикаты. В этом заключается преимущество кремнемарганцевовосстановительного процесса по сравнению с работой на маломарганцевых шихтах. С ростом температуры процесс восстановления кремния ускоряется, обычно наблюдаемые в металле концентрации кремния (0,2...0,5 %) могут быть в равновесии с конечными кислыми шлаками при темпера-

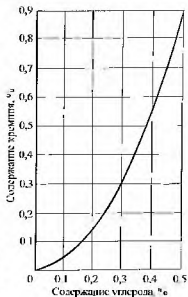
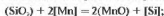


Рис. 17. Зависимость содержания кремния от содержания углерода в метале в условиях равновесия реакции восстановления кремния углеродом при 1600 °С [12]

турах конца кремниевосстановительного процесса. Кремний восстанавливается как из шлака, так и из футеровки [13], но преимущественно, как показано Г.С. Ершовым, его восстановление протекает на границе раздела шлаковой и металлической фаз, где кремнекислородные соединения шлака взаимодействуют с атомами элементов, находящимися в поверхностном слое металлической фазы.

Кремний восстанавливается марганцем по реакции:



$$K_{\text{Mn, Si}} = \frac{(\text{MnO})^2 [\text{Si}]}{[\text{Mn}]^2};$$

$$\lg K_{\text{Mn, Si}} = \frac{3177}{T} + 4,757.$$

С повышением содержания марганца в стали скорость восстановления кремния непрерывно возрастает [9].

По данным В.И. Тыжнова, при выплавке стали в кислой печи Si может восстанавливаться железом. Однако эта реакция не может протекать под шлаками с высоким содержанием FeO



$$K_{\text{Si}} = \frac{[\text{Si}](\text{FeO})^2}{[\text{Fe}]^2};$$

$$\lg K_{\text{Si}} = \frac{19057}{t} + 11,1.$$

При 1600 °С константа $K_{\text{Si}} = 8,5$. Зависимость констант равновесия реакции восстановления кремния железом (K_{Si}) и марганцем ($K_{\text{Mn, Si}}$) от температуры приведена на рис. 18, а зависимость содержания кремния в металле от содержания оксида железа в шлаке при условии равновесия металла со шлаком — на рис. 19. Восстановление кремния железом

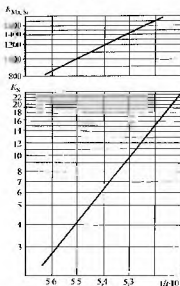


Рис. 18. Зависимость констант равновесия реакции восстановления кремния железом (K_{Si}) и марганцем ($K_{\text{Mn, Si}}$) от температуры [12]

может происходить при сравнительно невысоких концентрациях оксида железа в шлаке, повышение температуры способствует восстановлению кремния.

Анализ современного состояния физикохимии кислого сталеплавильного процесса показывает, что основными направлениями совершенствования технологии кислой электроплавки являются: исключение периодов окисления углерода и восстановления кремния, что позволит значительно повысить производительность печей и улучшить условия службы футеровки.

2.5. КОНЕЧНОЕ РАСКИСЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАЛИ. МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТАЛИ

Качество кислой электростали определяется формой, количеством и расположением неметаллических включений; содержанием O_2 , H_2 и N_2 ; образованием мелкого зерна при термообработке; содержанием S и P .

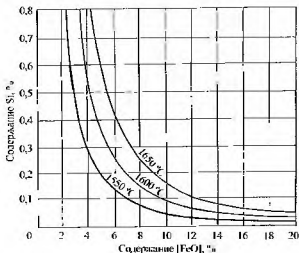
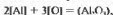


Рис. 19. Зависимость содержания кремния в металле от содержания оксида железа в шлаке при условии равновесия металла со шлаком [12]

Оптимальные значения большинства из этих показателей могут быть достигнуты в первую очередь благодаря достаточно глубокому раскислению стали. При этом решающая роль принадлежит конечно-му раскислению [9, 41–48].

Раскисление стали алюминием происходит по реакции:



для которой

$$K_{\text{Al}} = [\% \text{Al}]^2 [\% \text{O}]^3$$

Зависимость константы равновесия этой реакции от температуры, вычисленная Н.М. Чуйко, выражается уравнением:

$$\lg K_{\text{Al}} = -37\,800/t + 9,12.$$

По данным Д. Чигмана

$$\lg K_{\text{Al}}^1 = \frac{58\,400}{t_{\text{A}}} + 16,54;$$

$$\lg K_{\text{Al}}^1_{1600^\circ\text{C}} = 1,35 \cdot 10^{-14}$$

Уравнения и величины константы равновесия реакции раскисления железа алюминием приведены в табл. 22, а величины равновесного с алюминием содержания кислорода в стали — в табл. 23.

22. Уравнения и значения константы равновесия реакции раскисления железа алюминием

Автор	Уравнение	K_{Al}	
		при 1600 °С	при 1620 °С
Чигман	$\lg K_{\text{Al}} = \lg [\text{Al}] [\text{O}]^2 =$ $= -\frac{58\,400}{t} + 16,54$	$1,35 \cdot 10^{-14}$	—
Самарин	$\lg K_{\text{Al}} = -\frac{74\,640}{t} + 25,97$	$1,30 \cdot 10^{-14}$	—
Добрытозов	$\lg K_{\text{Al}} = \lg \frac{[\text{Al}]^2 [\text{O}]^3}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} =$ $= -\frac{57\,460}{t} + 20,48$	—	—

Окончание табл. 22

Автор	Уравнение	K_{Al}	
		при 1600 °С	при 1620 °С
Вентруп и Хаббар	$\lg K_{Al} = \lg(Al)^2(O)^3 =$ $= \frac{71\,200}{t} + 27,98$	—	$2,0 \cdot 10^{-10}$
Гокен и Чигман	$K_{Al} = a_{Al}^2 a_{O^2}$ $\lg K_{Al} = \frac{64\,000}{t} + 20,48$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	—
Вентруп	$\lg K_{Al} = \frac{71\,200}{t} + 26,02$	—	—

2.3. Содержание кислорода в стали, равновесное с алюминием

Автор	Равновесное содержание кислорода в стали при различном содержании алюминия, %					
	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,1
	при температуре, °С					
	1600	1620	1550	1650	1620	1600
Самарин	0,005					
Вентруп	0,002					
Трубин и Ойкс	0,008					
Крамаров		0,013			0,005	
Еднерал			0,025	0,0088		
Ростовцев						0,0001

Тип сульфидов в литой стали определяет ее механические свойства, особенно пластичность и ударную вязкость. Наиболее высокие механические свойства имеет сталь, содержащая сульфиды I типа, несколько меньшие — III типа и наиболее низкие свойства — сталь, содержащая включения II типа.

В стали, не раскисленной алюминием, образуются оксидные включения кремния, имеющие глобулярную форму, поэтому группирующиеся вокруг них сульфиды также имеют форму глобулей. После присадки алюминия образуются мелкораздробленные различной формы включения глинозема и шпинелей.

При критическом содержании остаточного алюминия в стали сульфиды выделяются в форме сетки по границам зерен, вызывая снижение пластичности и вязкости стали.

При охлаждении и затверждении стали из-за снижения растворимости S сульфиды выделяются из пересыщенного ими раствора. Чем ниже растворимость сульфидов, зависящая от содержания в стали кислорода, тем раньше происходит это выделение. При высоком содержании O сульфиды выделяются уже в начале кристаллизации, одновременно с оксидами, образуя крупные глобулы включения I типа. Такие включения характерны для стали, раскисленной кремнием и марганцем без присадок Al или при вводе незначительного его количества.

Когда Al снижает до минимума содержание O₂ в стали, но сам полностью расходуется на образование глинозема (критическая присадка), растворимость сульфидов резко возрастает, и они выделяются из раствора в конце кристаллизации после образования скелетов дендритов. Эти включения (II типа) располагаются по границам зерен в виде цепочек сульфидной эвтектики, значительно понижающей механические свойства стали.

При увеличении присадок Al растворимость сульфидов вновь понижается, а механические свойства растут, при этом образуются включения III типа. Включения I типа практически не содержат Al, а включения II типа имеют в своем составе его значительно меньше, чем включения III типа. Взаимосвязь Al_{ост} и типа сульфидов подтверждается полученными нами данными рентгеноструктурного анализа с помощью микроанализатора MS-46 (рис. 20–22).

Одним из важных показателей качества литой стали после термической обработки является ее мелкозернистая структура. Размер зерна аустенита определяется присадкой модификаторов-раскислителей. Множественный опыт подтверждает, что концентрация остаточного элемента-модификатора однозначно характеризует размер зерна в стали (рис. 23). Из практики некоторых заводов известно, что химический анализ на алюминий заменяет контроль зерна. Влияние Al на размер зерна аустенита сказывается только при его присадке выше критической и наличии в стали Al остаточного.

Решающую роль в формировании зерна играют нитриды алюминия. Имеется четкая взаимосвязь между содержанием N₂ в стали и размером зерна аустенита, причем с ростом Al остаточного увеличи-

зается и содержание N_2 . Растворимость нитридов алюминия в аустените при температурах выше 1000°C является причиной чувствительности мелкозернистых сталей к перегреву при этих температурах.

Ограничителями роста зерен являются не те включения, которые образуются при кристаллизации стали и наблюдаются визуально при обычных увеличениях на шлифах, а нитриды алюминия, выделяющиеся из твердого раствора вследствие скачкообразного понижения растворимости N_2 при условии присутствия в растворе стали Al, отличающегося большим сродством к азоту.

Высокая раскислительная способность Al оказывает решающее влияние на уменьшение склонности стальных отливок к поражению их ситовидной пористостью

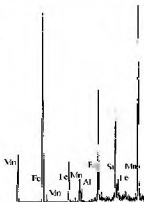


Рис. 20. Исследование состава сульфидов I типа в стали 25L1 рентгеновским микроанализатором MS-46

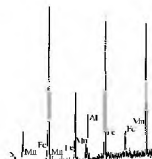


Рис. 21. Исследование состава сульфидов II типа в стали 25L1 рентгеновским микроанализатором MS-46

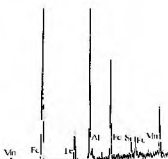


Рис. 22. Исследование состава сульфидов III типа в стали 25L1 рентгеновским микроанализатором MS-46

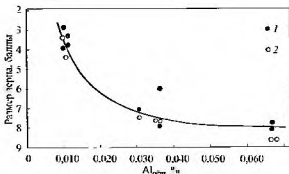


Рис. 23. Размер зерна аустенита в цементованном слое в зависимости от содержания алюминия в стали:

1 — по МакКледу и Энну, 2 — после заливки

Как известно, этот дефект в отливках образуется в тех случаях, когда в процессе кристаллизации внутреннее давление газов в металле ($p_{\text{вытп}}$) превышает внешнее ($p_{\text{внеш}}$), в результате чего образуются газовые пузырьки, часть которых не находит выхода.

При понижении температуры металла в интервале затвердевания его динамическая вязкость резко возрастает. Одновременно резко увеличивается давление выделения газов из-за уменьшения их растворимости. Таким образом, при понижении температуры жидкого металла и начале его затвердевания одновременно увеличивается количество газовых пузырьков, стремящихся всплыть в металл, и вязкость металла, препятствующая всплыванию.

Давление $p_{\text{вытп}}$ представляет собой сумму парциальных давлений газов, поглощенных в процессе плавки и попавших в металл из формы при заливке, т.е.

$$p_{\text{вытп}} = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{N}_2} + \dots + p_x.$$

Давление $p_{\text{внеш}}$ представляет собой сумму атмосферного давления, давления столба жидкого металла и величины, учитывающей поверхностное натяжение, т.е.

$$p_{\text{внеш}} = p_{\text{атм}} + h\gamma + 2\sigma/r,$$

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; h — высота столба жидкого металла; γ — плотность жидкого металла; σ — поверхностное натяжение металла; r — радиус образующегося пузырька.

М.А. Дружном [49] установлено, что влияние Al на снижение брака по ситовидной пористости основано на понижении им парциального давления оксида углерода в металле (в результате более полного его раскисления) и компенсации за счет этого давления водорода, поступающего из формы в металл. В результате при низком суммарном давлении не образуется пузырьков газа. Роль Al сводится к торьюжению процесса выделения H_2 и других газов из металла.

Таким образом, раскисление стали Al и наличие в ней остаточного Al оказывают решающее влияние на важнейшие показатели качества стали: механические свойства (через неметаллические включения и размер зерна аустенита) и ситовидную пористость.

Наряду с традиционным раскислением стали Al для конечного раскисления применяется ряд других раскислителей и модификаторов [17, 46, 50–63].

К сильным раскислителям, подобным Al, относится Zr. В сталь его вводят в виде ферросиликоциркония, при этом образующиеся дисперсные включения состоят из силикатов и оксидов циркония. Однако влияние Zr на свойства стали изучено еще недостаточно.

Более сильным, чем Al, раскислителем является Ca, у которого выше сродство к кислороду, поэтому он активно образует оксидные и сульфидные включения глобулярной формы. Кальций значительно повышает жидкотекучесть стали, ее пластичность и ударную вязкость, увеличивает размер зерна перлита [64]. Присадка силикокальция непосредственно в форму позволяет существенно повысить хладостойкость стальных отливок.

Совместная присадка в ковш Al и силикокальция способствует снижению количества, сфероидизации и равномерному распределению неметаллических включений в стали, выплавленной в кислых электропечах, а также повышению надежности и долговечности литых деталей. Присадка силикокальция в ковш, в раскисленную алюминием сталь, нашла широкое распространение в сталелитейных цехах.

Перспективным является и другой щелочноземельный металл — Ba. Ферросилициевой промышленностью освоено производство силикобарна.

Широкое применение в качестве раскислителей-модификаторов получили редкоземельные металлы (РЗМ) — Ce, La, Y и др. [59, 60] Применяются они в виде ферроцерна, мишметалла, силицидов. По химическому сродству к кислороду и сере РЗМ превосходят другие раскислители (рис. 24). Практикой установлено благотворное влияние РЗМ на свойства стали.

В работе [65] показаны положительные результаты присадки в кислую сталь РЗМ — содержание серы может быть снижено на 25%. При этом улучшаются механические свойства отливок, повышается их хладостойкость, уменьшается накопление серы в собственном возврате шихты.

Одним из наиболее часто применяемых модификаторов литейных сталей, обеспечивающих сильное измельчение зерна и улучшение механических свойств, является Ti.

В последние годы все большее распространение находит комплексное раскисление и модифицирование стали. Так, совместная присадка Al и Ti позволила ликвидировать межкристаллитное разрушение отливок из стали 45ФЛ, выплавленной в 6-тонной кислой электропечи, а также повысить надежность и долговечность литых деталей. Значительно улучшает пластические свойства стали совместная присадка Al, Ca и Ti.

На одном из отечественных заводов сталь марок 25Л, 12ГТЛ, 20ГТЛ предварительно раскисляют в печи Ti, затем одновременно Si и Mn (применяют комплексный раскислитель силикомарганец вместо раздельного ввода ферросилиция и ферромарганца) и окончательно в ковше Al и Ca. Такое комплексное раскисление позволило за счет сфероидизации включений повысить ударную вязкость стали, в том числе

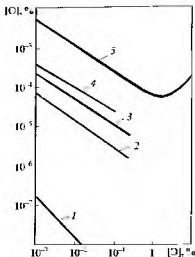


Рис. 24. Сравнительные кривые равновесия с кислородом при 1600°C элементов-раскислителей, растворимых в железе:

1 — Св; 2 — Li; 3 — Ce; 4 — Zr; 5 — Al [9]

при низких температурах, уменьшить брак отливок по ситовидной пористости и горячим трещинам.

Совместные присадки Al, Ca, Ti и Zr снижают количество неметаллических включений, обеспечивая их глобулярную форму, повышение механических свойств стали, а совместные присадки Al, Ca и PЗМ — благоприятную форму включений.

Комплексное раскисление и модифицирование сталей 20ГФЛ и 08ГФЛ кальцием и церием (присадка ферродерия 2 кг/т) повышает ударную вязкость стали за счет сфероидизации неметаллических включений и уменьшения их размеров. Улучшение эксплуатационных свойств отливок достигается за счет совместной обработки стали азотом и ванадием. Положительные результаты дает обработка стали в ковше порошкообразными смесями и шлаками, продувка аргоном, вакуумирование стали, обработка электротоком и т.д. [68–70].

Решающее влияние конечных операций плавки на качество стали позволяет существенно упростить и сократить предшествующие периоды плавки.

2.6. ПОВЕДЕНИЕ ВОДОРОДА И АЗОТА ПРИ ВЫПЛАВКЕ КИСЛОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

Особенностью кислых шлаков является низкая азото- и водородопроницаемость (соответственно в 4...5 и в 2...3 раза ниже, чем основных шлаков). Процесс перехода H_2 из атмосферы печи через кислый шлак в металл включает этап растворения паров воды в шлаковом расплаве, который зависит от его степени кислотности, связанной с вязкостью шлака [25]. Так, с ростом отношения $SiO_2/(FeO + MnO)$ от 0,72 до 2,11 водородопроницаемость шлаков снижается с 1,0 до 0,09 $cm^3(100\text{ г}/мин)$. Это объясняется сильным повышением вязкости шлака и затруднением растворения паров воды в шлаке (что связано с понижением активности O_2 в шлаке, так как SiO_2 является сильным комплексобразующим оксидом). Увеличение содержания CaO в кислом шлаке сопровождается значительным ростом его водородопроницаемости, что объясняется сильным разжижающим действием CaO и улучшением условий растворения паров воды в шлаке.

Аналогично и действие глинозема в шлаке. Авторы [25] установили, что для получения в кислой электростали по расплавлению и в течение всей плавки низкого содержания H_2 необходимо иметь содержание SiO_2 в шлаке по расплавлению не менее 45...48%. Г.С.Ершовым выявлена следующая закономерность изменения содержания H_2 в кислой электростали по периодам плавки. За 30 мин до расплавления оно составило 2,10...3,50 $cm^3/100\text{ г}$; в период расплавления —

2,54...3,50 см³/100 г.; в конце кипения — 1,40...1,93 см³/100 г. и перед выпуском — 1,96...2,94 см³/100 г

Кислая электросталь содержит значительно меньше N₂, чем основная, что связано с низкой азотопроницаемостью кислых шлаков. Кислые шлаки, имеющие отношение SiO₂ / (FeO + MnO) до 1,2 практически непроницаемы для азота. С ростом этого отношения азотопроницаемость кислого шлака растет, она связана с его адсорбционной способностью и не зависит от толщины шлака. Содержание N₂ в кислой электростали зависит от скорости обезуглероживания и от продолжительности плавки. Установлено, что при увеличении продолжительности плавки в кислой электропечи от 140 до 180 мин содержание N₂ в готовой стали возрастает на $5 \cdot 10^{-4} \dots 7 \cdot 10^{-4} \%$ (50...70 ppm).

В кислой электропечи, как и в основной, H₂ и N₂ удаляются из металла в процессе кипения. Теория удаления газов при кипении металла описана в работе [10], в которой показано, что объемы выделяющихся газов при кипении и застывании стали соотносятся между собой так же, как их парциальные давления, т.е.

$$V_i = (p_i / p_{\text{атм}}) \cdot 100$$

Это уравнение является основным законом, которому подчиняются газы, выделяющиеся из металла при кипении и застывании. Скорость удаления H₂ и N₂ в процессе кипения металла связана со скоростью выгорания C соотношениями

$$v_{\text{H}}^1 = \frac{1}{6} v_C \frac{[\text{H}]^2}{K_{\text{H}}^2 p_{\text{CO}}} K_{\text{VH}} [\text{H}]^2;$$

$$v_{\text{N}}^1 = 2,33 v_C \frac{[\text{N}]}{K_{\text{N}}^2 p_{\text{CO}}} K_{\text{VN}} [\text{N}]^2,$$

где v_{H}^1 и v_{N}^1 — скорости удаления H₂ и N₂, %/мин; v_C — скорость окисления углерода, %/мин; [H] и [N] — концентрации H₂ и N₂, %; K_{VH} и K_{VN} — коэффициенты дегазации H₂ и N₂.

Расчеты по этим формулам дают наиболее удовлетворительные результаты для кислого процесса, т.е. для случая, когда поглощение газов при кипении минимально. Количество удаляемого H₂ в зависимости от количества выгоревшего углерода может быть вычислено по уравнению.

$$[\% \text{H}] = \frac{6pK}{[\text{C}] + 6p / [\% \text{H}]_{\text{исх}}},$$

где $p = p_{\text{CO}} + p_{\text{H}_2}$.

Глава 3

УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

3.1. КОНСТРУКЦИЯ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Схема конструкции дуговых сталеплавильных печей показана на рис. 25. Общий вид дуговой сталеплавильной печи показан на рис. 26.

Дуговые сталеплавильные печи имеют вместимость от 0,5 до 420 т [71]. Кислая футеровка применяется главным образом в дуговых печах вместимостью 0,5; 1,5; 3,0; 6,0; 12,0 и 25 т. Как правило, эти печи

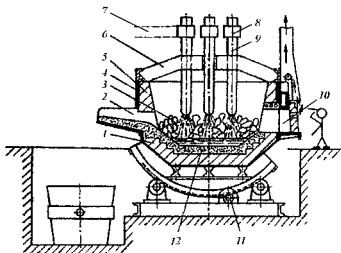
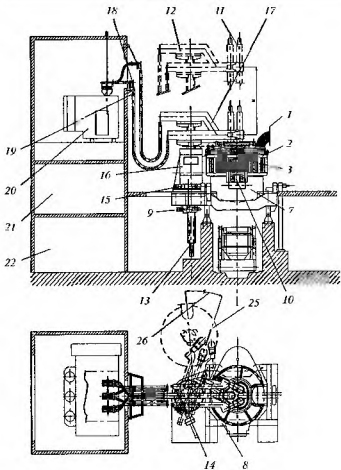


Рис. 25. Схема дуговой сталеплавильной печи трехфазного переменного тока:
1 — футеровка подины; 2 — сливной желоб; 3 — шихта; 4 — стальной кожух; 5 — футеровка стен; 6 — свод; 7 — токоподвод; 8 — электроддержатели; 9 — электроды;
10 — рабочее окно; 11 — привод наклона печи; 12 — подина



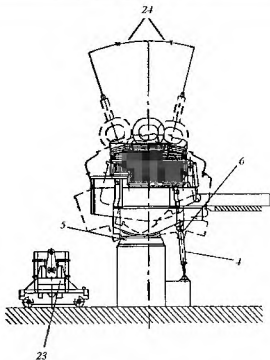


Рис. 26. Общий вид дуговой сталеплавильной печи:

1— отверстие для вытяжки дыма, 2— свод, 3— щиты с водяным охлаждением — верхняя часть кожуха, 4— гидроцилиндр механизма наклона печи, 5— подкатные направляющие, 6— устройство эксцентрикового донного выпуска, 7— поддон кожуха, 8— платформа, 9— цилиндр механизма замыкания наклона, 10— смотровая дверь, 11— электрод, 12— верхнее положение электрододержателей, 13— цилиндр механизма подъема электродов, 14— цилиндр механизма поворота, 15— поворотный подпятник, 16— подъемный стеллаж электродов, 17— электрододержатели, 18— силовые кабели с водяным охлаждением; 19— вторичная система токоподвода, 20— трансформатор; 21— отделение среднего напряжения; 22— отделение гидравлики, 23— тележка стальной, 24— угол наклона печи; 25— положение свода — электродов после поворота, 26— начальный угол поворота свода

снабжены системами подъема и поворота свода либо системой выката ванны для открывания печей под загрузку через верх, системой автоматического перемещения электродов, дистанционным управлением со специального пульта. Печи также имеют водоохлаждаемый токоподвод, во многих случаях водоохлаждаемые панели кожуха и свод.

По расположению трансформаторов печи бывают левого и правого исполнения. Все эти печи снабжены механизмом наклона печи на 40° для слива металла и на 10° для скачивания шлака. В печах с выкатной ванной механизм отката выполнен в виде тележки с электромеханическим приводом. Кожух печи сварной, цилиндрический или конический.

В печах с коническим кожухом по сравнению с печами с цилиндрическим кожухом существенно возрастает расход электроэнергии. Так, например, изучение нами опыта ряда заводов показало, что в аналогичных условиях удельный расход электроэнергии в печах с цилиндрическим кожухом составил в среднем 2531 МДж/т, а в печах с коническим кожухом — 2714 МДж/т.

На рис. 27 показана полученная зависимость между условной характеристикой наклона стен к вертикали и эквивалентными тепловыми потерями через стены и свод печи, из которой видно, что с увеличением угла наклона стен тепловые потери неуклонно повышаются. Экономически применение дуговых печей с коническим кожухом себя оправдывает в том случае, если стойкость футеровки увеличивается не менее чем в 2 раза. В кислых дуговых электродных печах (особенно вместимостью 3...6 т) можно достичь очень высокой стойкости футеровки (до 7...13 тыс. плавок), поэтому, с нашей точки зрения, применение конического кожуха в кислых электродных печах целесообразно.

Для дуговых сталеплавильных печей применяют только графитированные электроды по ТУ 1911-109-052-2003 «Электроды графитированные и ниппели к ним». По этим техническим условиям российские электродные заводы выпускают графитированные электроды диаметром 75...600 мм длиной 1000...2700 мм. В зависимости от диаметра и марки электроды должны иметь удельное электрическое сопротивление не более 5,5...11,0 мкОм·м, предел прочности на изгиб не менее 6,5...12,0 МПа, объемную плотность не менее 1,65 г/см³. Привод перемещения электродов электромеханический или гидравлический. Диаметр применяемого электрода определяется вместимостью печи. Электроды небольших размеров (диаметром до 200 мм) и ниппели к ним изготавливаются с цилиндрической резьбой, а электроды диаметром более 200 мм и ниппели к ним — с конической резьбой. На Украине графитированные электроды изготавливаются по стандарту Украины ДСТУ 4494:2005.

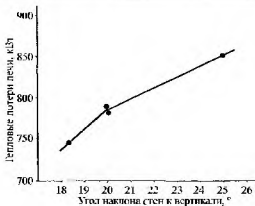


Рис. 27. Зависимость тепловых потерь дуговой сталеплавильной печи от условной характеристики наклона стенок

Некоторые дуговые печи с кислой футеровкой для снижения уровня шума и локализации всех выделяемых газов устанавливают с полным укрытием.

3.2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ВЕДУЩИХ МИРОВЫХ ФИРМ

Современные направления развития конструкции и энерготехнологии дуговых сталеплавильных печей следующие: повышение мощности, внедрение шахтных печей с подогревом лома печными газами, применение эффективной системы газоочистки, включение в систему электроснабжения печей дополнительного реактивного сопротивления, повышение общего сопротивления электропечного контура (импеданса), ведение плавки на энергосберегающих режимах пониженных рабочих токов и повышенных вторичных напряжений, вспенивание шлака путем вдувания порошка углерода в струю кислорода с целью экранирования электрических дуг и уменьшения их воздействия на стены и свод печи, применение водоохлаждаемых элементов и альтернативных источников энергии, сокращение выбросов CO_2 , одноразовая заправка шихты, повышение высоты печного пространства над зеркалом ванны,

сокращение цикла плавки «от выпуска до выпуска» с обеспечением заданной производительности при меньшей емкости печи, внедрение печей постоянного тока. В целом дуговые печи нового поколения можно охарактеризовать как энергосберегающие агрегаты [72].

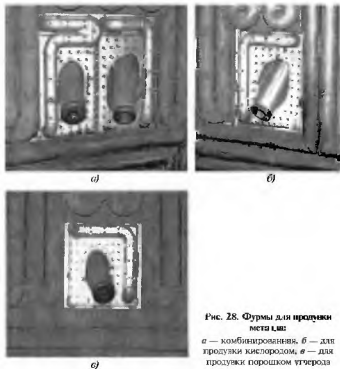
Совершенствование конструкции дуговых сталеплавильных печей за последние годы покажем на примерах разработок двух ведущих мировых фирм «Даниели» [71] и «Сименс ФАИ» (бывшая «Фукссистем-техник») [74–76].

Фирма «Даниели» создала специальные модули для вдувания в дуговую печь углерода, топлива и кислорода (рис. 28). Созданы форсунки многоточечного вдувания (многоточечные инжекторы) кислорода и углерода (угольного порошка), которые поставляются с полностью автономными линиями подачи кислорода, природного газа, углерода и сжатого воздуха с регулирующими клапанами (клапанными панелями) для регулировки расхода на магистралях подачи кислорода, природного газа, угольного порошка и сжатого воздуха, а также с автономными распылителями углерода и независимыми дозаторами угольной пыли. Фирмой «Даниели» созданы системы хранения и распределения сжиженного нефтяного газа и технология инъекции химических энергоносителей. На одной печи может быть установлено 7 горелок, 4 кислородные форсунки и 3 форсунки вдувания углерода.

Топливоно-кислородные горелки продвинуты глубже в печь, что повысило проникаемость кислородной струи. Кислородные сопла устаиваются на водоохлаждаемом медном кожухе, расположенном вдали от боковой стенки печи [78].

По существу, этой фирмой созданная новая АСУ ТП дуговой сталеплавильной печи: полная автоматизация технологического процесса, автоматизация отбора проб (пробы отбираются во время работы печи под током) и измерения температуры металла, цифровое регулирование положения электродов, настройка печи, автоматический контроль уровня ванны жидкой стали. Вместе с печью поставляется современное электрооборудование и современная автоматика.

Фирмой «Даниели» проведен ряд усовершенствований системы газоочистки установки обеспыливания отходящих газов: создана новая система первичного пылеудаления, расширена система вытяжных зонтов, созданы новые фильтры, более крупные камеры дожигания, усовершенствована конструкция водоохлаждаемого газохода. В состав установки газоочистки фирмы «Даниели» входят камера дожигания, водоохлаждаемый газоход, вытяжной колпак, искрогаситель и рукавный фильтр с периодической очисткой сжатым воздухом. В качестве примера можно привести показатели одной из установок: общий расход газов через рукавный фильтр $1 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{ч}$, общая поверхность филь-



**Рис. 28. Фурмы для продувки
мета LMF:**

a — комбинированная, *б* — для
продувки кислородом, *в* — для
продувки порошком углерода

рации 8400 м², общая производительность с параллельной работой двух фильтров 2 · 10⁵ м³/ч [73].

Осуществлен ряд мероприятий по улучшению загрузки шихты и добавок: единовременная (100 %) завалка лома, непрерывная загрузка шихты, система подачи материалов, система подачи легирующих добавок.

Фирмой «Даниели» осуществлен также ряд других новых технических решений по конструкции дуговых сталеплавильных печей: токопроводящие электродные консоли, модульные конструкции печей, новые конструкции заливочного и завалочного крана, система распре-

деления среднего и низкого напряжения со статическим компенсатором реактивной мощности и насыщающимся реактором на линии среднего напряжения, новые системы пожаротушения, водоподготовки (новая установка), разборные кожухи с водоохлаждаемыми панелями (рис. 29), новая система эркерного выпуска металла, пневмотранспорт для передачи металлизированных окатышей в дуговую печь.

Фирма «Даниели» в своих технических решениях применяет предварительный нагрев шихты (рис. 30).

В литейном производстве Сумского машиностроительного завода (г. Сумы, Украина) работает созданный фирмой «Даниели» автоматизированный комплекс 18-тонной дуговой сталеплавильной печи переменного тока с водоохлаждаемым сводом и водоохлаждаемыми трубчатыми стенами, с подогревом шихты отходящими газами, компьютерным управлением энерготехнологическим режимом плавки. С помощью компьютера осуществляются выбор тока, напряжения, мощности; определяются моменты подвалок шихты; регулируется температурный режим плавки; рассчитывается продолжительность продувки металла кислородом, количество кислорода, количество добавок; производится



Рис. 29. Водоохлаждаемые панели кожуха дуговой печи

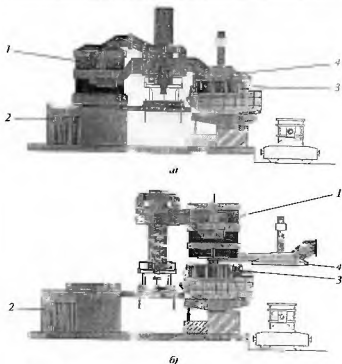


Рис. 30. Система подогрева (а) и загрузки (б) шихты в дуговую печь:
 1 — загрузочная бадейка; 2 — устройство для нагрева шихты; 3 — дуговая печь;
 4 — свод печи

автоматический ввод добавок; осуществляется контроль температуры охлаждающей воды; управление аварийной блокировкой.

В комплексе с печью работают установка печь-ковш с электромагнитным перемешиванием металла и установка вакуум-кислородного обезуглероживания металла. В сравнении с обычными дуговыми печами переменного тока, работающими в литейных цехах машиностроительных заводов СНГ, эта печь имеет меньший расход огнеупоров,

меньшую трудоемкость работ по ремонту футеровки, меньшую площадь для хранения огнеупоров, возможность применения более простых грузочных бадей грейферного типа, возможность повышения потребляемой мощности, экономия технологической электроэнергии, повышение производительности печей (сокращение длительности плавки), меньшие затраты на подогрев шихты (в сравнении с подогревом природным газом), снижение затрат на газоочистку, обеспечение требуемого качества металла, повышение стабильности технологического процесса, коренное улучшение условий труда сталеваров, поднятие на новый уровень технологии плавки стали в сталелитейных цехах.

Значительные усовершенствования конструкции дуговых сталеплавильных печей проведены в последние годы фирмой «Сименс ФАИ» (бывшая «Фуксистемтехник», а затем «ФАИ ФУКС»). Серьезным достижением является создание шахтных дуговых печей (рис. 31). Печь имеет специальную водоохлаждаемую шахту, в которую помещается шихта и подогревается отходящими газами. С помощью удерживающих пальцев шихта, подогретая в течение 15 мин до 700...800 °С, сбрасывается в печь. Печь имеет водоохлаждаемые панели из чистой меди, сподовую кислородную фурму, шесть газокислородных горелок, два инжектора, кирпичную или моноблочную центральную часть свода. Подъем шихты осуществляется с помощью гидропривода.

Шахтная печь может работать только на твердой шихте с двумя подвалками или с жидким чугуном (до 40 %) при одной подвалке. В шахтной печи расход кислорода составляет 40...45 м³/т, природного газа 14...17 м³/т, электродов 1,5...1,7 кг/т. Лом, находящийся в шихте, является грубым фильтром, так как на нем оседает значительная часть пыли. Фаза расплавления сведена к минимуму, так как параллельно с электроэнергией применяется энергия горелок. В процессе нагрева плавки через шахту на закрытые пальцы загружается первая корзина следующей плавки и подогревается до 700...800 °С в отходящих газах. Для дожигания окиси углерода нагнетается воздух. Фирмой «Сименс ФАИ» разработаны одношахтные и двухшахтные дуговые печи. В мире уже эксплуатируется более 30 шахтных печей.

Проведенное нами наблюдение за работой шахтной печи на заводе «Северсталь» показало безотказную работу печи при отсутствии обслуживающего персонала на рабочей площадке с полным дистанционным компьютерным управлением с пульта. Шахтные печи обеспечивают 100 % подогрев скрапа, эффективную переработку отходящих газов. Шахта может перемещаться в поперечном направлении.

Следует отметить и другие технические решения фирмы «Сименс ФАИ» по дуговым печам: системы донного выпуска металла; полное

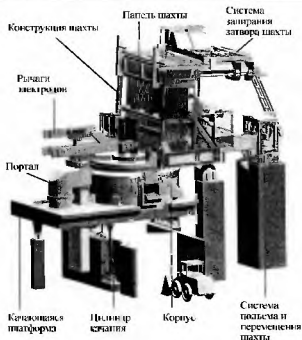


Рис. 31. Модель «пальчиковой» шахтной печи

оснащение печи водоохлаждаемыми элементами, в том числе медные или комбинированные панели с высокоскоростным водяным охлаждением; токопроводящие консоли электродов; водоохлаждаемые кислородные фурмы; автоматизированная система контроля; программное управление с единого пульта; гидравлическая станция для управления гидравлическими механизмами наклона печи, подъема и поворота свода, передвижения электродов, открывания рабочего окна; пневматические механизмы управления шиберным затвором выпускного отверстия и задвижками отверстия в своде; саморазгружающиеся корзины с полусферическими створками для завалки лома (загрузка сверху); система хранения, дозирования и подачи сыпучих материалов

и ферросплавов; установка контроля на герметичность и расход воды в водоохлаждаемых элементах конструкций; новая установка для изготовления переходных колен водоохлаждаемых панелей; самостоятельные опоры для свода; призматическая роликовая проводная система для несущих электроподержателей; высокопроводящие электроды в плакированных медью кожухах; современная система контроля электродов; применение скользящих вкладышей; системы непрерывной подачи железа прямого восстановления (DRI) и горячебрикетированного железа (НБИ); вдувание мелочи DRI и пыли.

Фирмой «Сименс ФАИ» создана новая система газокислородных горелок типа Refring Combined Burner (RCB) с углеродными инжекторами. RCB представляет собой компактную систему газокислородной горелки с кислородной фурмой. В этой системе струю кислорода окружает газокислородный факел. Все горелки и фурмы устанавливают в специальные панели (ранее сварные, в настоящее время — литые с ребрами), панель предотвращает поломки фурм загружаемым ломом. В этой же панели установлен водоохлаждаемый углеродный инжектор применяемый для вспенивания шлака и снижения содержания FeO в шлаке, новые системы приближают горелки и фурмы к жидкому металлу, дают экономию электроэнергии 15 % и снижают расход кислорода на 10 %, продолжительность планки снижается на 20 %; комбинация газокислородной горелки и инжекторной кислородной фурмы устанавливается в стенах дуговой печи с водяным охлаждением.

Системами RCB оснащено более 70 печей как типовых, так и специальных переменного и постоянного тока для производства углеродистой, коррозионно-стойкой и других специальных марок стали. Размещение RCB рядом с зеркалом ванны ведет к более эффективному вдуванию кислорода (при множестве точек вдувания). Оборудование RCB состоит из двух частей: передней медной части с водяным охлаждением и задней части, которая поддерживает вдувающие форсунки. Обе части можно легко демонтировать, сняв крепежный металлический бандаж.

Газокислородная смесительная камера монтируется внутри горла горелки для устойчивости горения пламени и снабжается центральной кислородной инъекцией, для создания более мощного пламени по сравнению с обычной горелкой. Горелка RCB может использовать природный газ, сжиженный углеводородный газ и коксовый газ. Горловина горелки защищена от брызг при помощи контрольного пламени и кольцевидной структуры. RCB охлаждается водой, циркулирующей с высокой скоростью. Конструкция горелки гарантирует защиту от повреждения металлом. Сверхзвуковая скорость струи кислорода, окруженная защитным пламенем, высокоэффективна. Многоочечное вдувание кислорода обеспечивает необходимое перемешива-

ние металла в ванне печи, а также композиционную и температурную однородность [76].

Разработан проект высокоимпедансной ультравысокомощной дуговой сталеплавильной печи серии *Ultimat*. Высокоимпедансная характеристика печей означает, что в систему электроснабжения печи дополнительно включено реактивное сопротивление реактор, повышающий общее сопротивление электропечного контура (импеданс) и обеспечивающий возможность работы печи на энергосберегающих режимах. Для печей серии *Ultimat* предусматриваются топливные горелки. В печах этой серии внесены конструктивные изменения в механические узлы, токоподвод, водоохлаждаемые элементы.

В этих печах простая конструкция портала, разъемная конструкция корпуса печи, автоматизированная система установки бады с шихтой, устройство бесконтактного измерения температуры ванны металла, электрододержатели с разбрызгивающей системой водяного охлаждения, система телевизионного наблюдения за донным выпуском металла, система инфракрасного контроля и отсечки шлака при автоматизированном выпуске металла из печи, роботы для очистки порога рабочего окна и канала донного выпуска; печь управляется автоматикой *SiMetal*; производственная мощность печи серии *Ultimat* по сравнению с обычными печами с той же массой плавки больше на 50 %, печь *Ultimat* позволяет повысить производительность для заданного значения веса плавки при более низких показателях потребления электроэнергии [76].

Современным достижением в области конструкции дуговых сталеплавильных печей является система непрерывной загрузки шихты типа «Констил» (рис. 32) [77].

Процесс *Констил* (*Consteel*) основан на предварительном подогреве скрапа печными газами при его непрерывной загрузке в электродуговую печь, в ванне которой оставлено «болото» жидкой стали. Изобретатель процесса Дж. Валломи (*John A. Vallomy*) руководствовался гуманной целью — защитить сталеваров от сильного и опасного для здоровья шума электрических дуг, возникающего при расплавлении холодного скрапа. Основная новаторская идея заключается в том, чтобы вести всю плавку на жидкой ванне, что обеспечивает энергетическую и технологическую стабильность процесса.

Скрап загружается на конвейерную систему и с ее помощью подается к печи. На последней секции конвейера скрап попадает в туннель для предварительного подогрева отходящими печными газами. Химическое и физическое тепло газов передается скрапу как в теплообменнике, работающем по принципу противотока. Важная отличительная особенность процесса заключается в том, что в печи никогда нет твер-

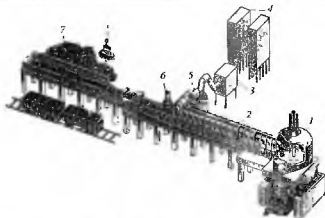


Рис. 32. Схема процесса Констел:

1 — электродуговая печь; 2 — зона нагрева скрапа печными газами; 3 — камера охлаждения горячих газов; 4 — фильтры очистки газов; 5 — камера дожигания отходящих газов; 6 — динамическое уплотнение; 7 — зона загрузки

ного скрапа, и электрические дуги горят на зеркало жидкой ванны, при этом непрерывно подаваемый скрап плавится и растворяется в жидкой ванне. Таким образом, процесс Констел обладает существенными особенностями, которые отличают его от большинства других технологий электроплавки, а именно непрерывной загрузкой шихты с ее предварительным подогревом печными газами.

Предварительный подогрев шихты отходящими печными газами позволяет значительно сократить расход энергии в печи. При средней температуре подогрева скрапа от 400 до 600 °С и общей эффективности расплавления 75...80 %, экономия энергии составляет 80...120 кВт·ч на тонну жидкой стали.

Непрерывная загрузка шихты обеспечивает подачу скрапа в течение всего рабочего цикла печи. Загрузочные бадьи не используются, конвейер подает скрап с шихтового двора прямо в электродуговую печь. Скрап растворяется в жидком металле, и дуга горит на плоском зеркале ванны расплава, покрытом пеннистым шлаком.

Автоматизированная система подачи шихты в печное пространство регулирует скорость подачи для поддержания заданной температуры

ванны и работает с учетом обратной связи с весовым устройством, на котором расположена печь. Режим вспенивания шлака для экранирования дуг поддерживается автоматически по уровню шума электрических дуг: уровень шума закрытых дуг существенно ниже, чем открытых. Свод печи всегда закрыт и отсос отходящих газов производится непосредственно из первичного газохода. Отсутствие топливных горелок — экологическое преимущество процесса.

Новый процесс повышает тепловой КПД печи, сокращает продолжительность плавки «от выпуска до выпуска», снижает расход электродов. Негативное воздействие электропечной установки на питающую сеть, вызванное горением электрических дуг, снижается, имеются значительные преимущества в части соответствия металлургического процесса требованиям экологических стандартов.

По сравнению с процессом электроплавки с порционной загрузкой новый процесс позволяет держать электропечь под током в течение всей плавки, не требует открытия свода для завалки шихты. Предварительный подогрев скрапа печными газами и непрерывное горение дуги на зеркало жидкой ванны, покрытой слоем пенного шлака, позволяют существенно сократить удельный расход технологической электроэнергии по сравнению с обычной электроплавкой. Помимо этого, использование процесса Констил обеспечивает снижение расходов по переделу за счет погребления более дешевого скрапа, сокращения потребления энергии, расходуемых материалов, трудозатрат и затрат, связанных с защитой окружающей среды.

За счет небольшого числа и простоты технологических операций процесс Констил позволяет проводить электроплавки быстрее и равномернее. Это увеличивает часовую производительность электропечной установки и, что особенно важно, уменьшает величину мощности заявляемую энергосистеме.

В процессе Констил природный газ не используется, удельный расход графитированных электродов составляет 1,4 кг/т, электроды работают в условиях равномерной тепловой нагрузки и отсутствия механических ударов кусками твердого скрапа, а также тепловых ударов (как при открывании свода для загрузки сверху). Печь потребляет мощность в энергосберегающем режиме при отсутствии коротких замыканий электродов на металл, вызываемых обрушением твердого скрапа в печном пространстве. При переходе от обычной технологии к системе Констил снижается содержание азота в стали (рис. 33), уровень шума со 110 дБ до 85...90 дБ (рис. 34), выбросы CO_2 на одну треть (с 0,47 до 0,34 т на 1 т жидкой стали). При непрерывной загрузке шихты пыль не попадает в зону обслуживания печи на рабочей площадке. В настоящее время в мире работает более 20 установок Констил [77].

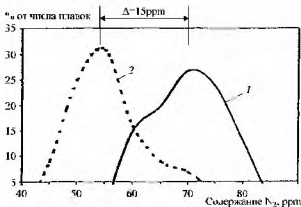


Рис. 33. Сравнительное содержание азота в литых заготовках [77]:
 1 — до установки системы Констил; 2 — после установки системы Констил

Практика показала, что при непрерывной загрузке шихты создается возможность увеличения в задаваемой шихте доли легковесного скрапа с низким насыпным весом. Цена такого скрапа ниже цены габаритного лома. Это обеспечивает снижение затрат на металлошвугу. Снижаются также трудозатраты. Уменьшаются выбросы диоксида углерода и пыли. В целом технология выплавки стали в дуговых печах с непрерывной загрузкой шихты обладает высокой экономической эффективностью (снижение заявленной мощности составляет 10...15 %). Снижение выбросов CO_2 составляет по сравнению с обычной печью 0,13 г на 1 г жидкой стали.

Одним из современных направлений развития конструкции дуговых сталеплавильных печей является создание печей с одноразовой завалкой [77]. В этих печах объем и высота свободного печного пространства над зеркалом ванны примерно в полтора раза превышает соответствующую высоту в печах разработки 1970–1980-х годов, при этом высокое печное пространство играет роль «шахты» для нагрева столба шихты печными газами. Такие печи, например, проектирует фирма «Конкаст АГ» — дочерняя компания фирмы «СМС Демаг».

Принцип одноразовой завалки требует создания для этих печей надежного механического оборудования, способного выдерживать удары во время загрузки шихты и отвечающее требованию кинетической

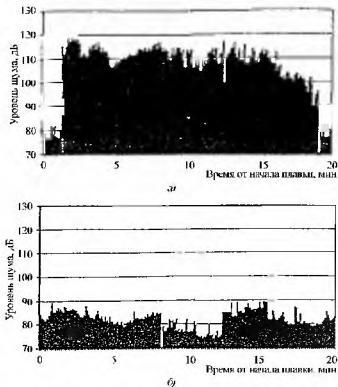


Рис. 34. Уровень шума во время плавки в дуговой печи [77]:
 а — с batch-овой загрузкой, б — с непрерывной загрузкой

стабильности всей цепи узлов и механизмов печи от гидравлической системы до электрододержателей. В этих печах время бестоковых пауз должно быть минимальным. Объем загрузочной бадьи соответствует одноразовой завалке при насыпной плотности шихты более $0,73 \text{ т/м}^3$. Пульт управления расположен выше уровня свода печи для того, чтобы наблюдать и за прилегающей территорией. Среднее время завалки со-

ставляет 60...80 с, включая подъем электродов, открытие и закрытие свода. Уровень производительности печей на 30 % выше обычного. Стойкость свода и футеровки стен больше за счет увеличения расстояния от ванны и уменьшения разбрызгивания металла. Печи одноразовой заправки имеют выкатную подину. Свод приводится в движение с помощью трех гидравлических цилиндров, запитанных отдельно, один расположен на фронтальной стороне, два других — со стороны выпускного отверстия. Каждый цилиндр оснащен датчиком смещения и пропорциональным затвором. Один из цилиндров является основным, ведущим, два других — ведомыми. Расположение гидроцилиндров обеспечивает равномерный подъем свода. С помощью гидравлики выполняются следующие операции: наклон для выпуска 2°/с, наклон — быстрый возврат 4°/с, подъем свода 50 мм/с, поворот свода 5°/мин, движение электродов 120...400 мм/с. Большой диаметр печи позволяет вводить мощность почти в постоянном режиме без чрезмерного износа футеровки.

Объем новой печи почти в два раза превосходит объем стандартной печи такой же вместимости. Большой диаметр печи позволяет установить большее количество источников теплоты с целью увеличения площади их действия. На печи установлено четыре комбинированных горелки, три из них в специальных водоохлаждаемых корпусах в стене и одна над эркером. Горелки совмещены с угольными инжекторами (расход угольного порошка 80 кг/мин). Положение и угол наклона каждого инжектора тщательно подбирается для того, чтобы создать однородный пенистый шлак, который покрывал бы всю ванну жидкого металла. Для увеличения степени дожигания в объеме печи инъекция углеродосодержащих материалов начинается тогда, когда работа горелок прекращена. Раннее формирование пенистого шлака положительно влияет на стабильность горения дуг и на энергетический КПД печи. Ввод альтернативной энергии интегрирован с вводом электрической энергии.

Глава 4

ФУТЕРОВКА ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

4.1. ТРЕБОВАНИЯ К ОГНЕУПОРАМ ДЛЯ КИСЛЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Схема футеровки дуговой печи показана на рис. 35.

Классификация огнеупоров в зависимости от химико-минералогического состава определена ГОСТ 28874—2004 «Огнеупоры. Класси-

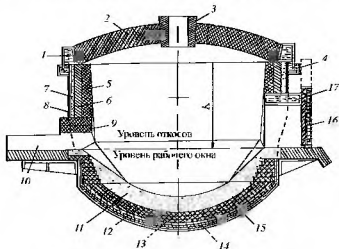


Рис. 35. Схема футеровки дуговой сталеплавильной печи

1 — водоохлаждаемое сводное окно, 2 — кирпичная кладка свода, 3 — кольцевые вставки, 4 — песочный зитвор, 5 — рабочий слой футеровки стен, 6 — теплоизоляционный слой футеровки стен; 7, 14 — теплоизоляция, 8, 15 — листовая асбест, 9 — арочка выпускного отверстия, 10 — жерой, 11 — вибрирующий слой пода; 12 — кирпичная кладка пода, 13 — теплоизоляционный слой пода

фикация» (табл. 24). Огнеупоры для футеровки свода, арок, рабочего слоя стен и верхней кирпичной кладки пода относятся к группе кремнеземистых огнеупоров, а для теплоизоляционного слоя стен и пода — к группе алюмосиликатных.

24. Типы и группы огнеупоров

Тип огнеупоров	Группа огнеупоров
1. Кремнеземистые	Из кварцевого (кремнеземистого) стекла Динасовые Динасовые с добавками Кварцевые
2. Алюмосиликатные	Полукислые Шамотные Мушитокремнеземистые Мушитовые Мушитокорундовые Из глиноземокремнеземистого стекла
3. Глиноземистые	Корундовые Корундовые с добавками
4. Высокомagneзиальные	Периклазовые
5. Магнезиальносиликатные	Перикладофорстеритовые Форстеритовые Форстеритохромитовые
6. Магнезиальношпинельные	Перикладохромитовые Хромитопериклазовые Хромитовые Перикладошпинельные Перикладошпинельные Шпинельные
7. Магнезиальноизвестковые	Перикладоизвестковые Перикладоизвестковые стабилизированные Известковопериклазовые
8. Глиноземоизвестковые	Алюминаткальцевоце
9. Известковые	Известковые
10. Хромистые	Корундохромоксидные Хромоксидкорундовые Хромоксидные

Окончание табл. 24

Тип огнеупоров	Группа огнеупоров
11. Цирконистые	Оксидциркониевые Бадделитовоуглеродные Цирконовые Корундовооксидцирконийсиликатные Корундовоуглеродоксидцирконийсиликатные Перикладовооксидцирконийсиликатные
12. Углеродистые	Графитированные Угльные
13. Оксидоуглеродистые	Кремнеземоуглеродистые Шамтоугоуглеродистые Алюмоуглеродистые Корундокарбидкремнийуглеродистые Перикладоуглеродистые Шпинельноперикладоуглеродистые Перикладошпинельноуглеродистые Алюмоперикладоуглеродистые Перикладоизвестковоуглеродистые Известковоуглеродистые
14. Карбидкремниевые	Карбидкремниевые Карбидкремнийсодержащие
15. Оксидные	Оксидные Кислородооверхающие
16. Бескислородные	Бескислородные

Массовая доля определяющих химических элементов приведена для кремнеземистых огнеупоров в табл. 25, а для алюмосиликатных — в табл. 26.

25. Кремнеземистые огнеупоры

Группа огнеупоров	Массовая доля SiO ₂ , %
Из кварцевого (кремнеземистого) стекла	Не менее 93
Динасовые	Св. 93
Динасовые с добавками	От 80 до 93 включ.
Кварцевые	» 85 » 93 »
Примечание. К группе «кварцевые» относят огнеупоры из кварцитов и кварцевых песков.	

26. Алумосиликатные и глиноземистые огнеупоры

Группа огнеупоров	Массовая доля химического компонента, %	
	Al_2O_3	SiO_2
Полукислые	От 10 до 28	От 65 до 85
Шамотные	» 28 » 45 включ.	—
Мушитокремнеземистые	Св. 45 » 62 »	—
Мушитовые	» 62 » 72 »	—
Мушитокорундовые	» 72 » 95 »	—
Из глиноземокремнеземистого стекла	От 40 до 90 включ.	—
Корундовые	Св. 95	—
Корундовые с добавками	От 85 включ.	—

Примечания 1. Мушитокремнеземистые, мушитовые и мушитокорундовые группы огнеупоров относят к высокоглиноземистым.

2. Огнеупоры в аморфном (стеклообразном) состоянии относят к группе «из глиноземокремнеземистого стекла».

Огнеупорные материалы (как огнеупорные изделия — формованные, имеющие определенную форму и размеры, так и неформованные, выпускаемые без определенной формы в виде порошков) характеризуются следующими свойствами:

огнеупорность — свойство материала противостоять, не расплавляясь, воздействию высоких температур;

пористость — процентное содержание пор в общем объеме изделий (пористость может быть общая, закрытая и открытая);

газопроницаемость — свойство пористых тел пропускать газ при перепаде давления;

удельная поверхность — внешняя для пористых тел ($см^2/г$) и полная для порошковых тел ($см^2/см^3$);

прочность при комнатной температуре — механическая прочность — предел прочности при сжатии;

прочность при высоких температурах — деформация образцов огнеупорных изделий при повышении температуры под нагрузкой 0,2 МПа;

термостойкость — способность огнеупоров противостоять, не разрушаясь, колебаниям температур при нагреве и охлаждении;

ползучесть — необратимая пластическая деформация материала при высокой температуре под воздействием напряжений, меньших предела прочности;

теплоемкость — количество теплоты, которое необходимо сообщить телу для его нагрева на один градус;

термический коэффициент линейного расширения — величина увеличения размера кубических кристаллов в каком-либо направлении при нагревании на один градус;

теплопроводность — количество теплоты, которое проходит в единицу времени через плоскую стенку толщиной и площадью, равными единице, при разности температур на ее поверхности в один градус;

температуропроводность — скорость распространения температуры;

электропроводность — величина, обратная электросопротивлению.

Динасовые изделия для кислых электропечей производятся из кристаллических кварцитов (ГОСТ 9854—81 «Кварциты кристаллические для производства динасовых изделий»). Требования к этим кварцитам по массовой доле оксидов приведены в табл. 27, а по размеру кусков — в табл. 28.

27. Массовая доля оксидов в кварцитах

Массовая доля оксида	Норма для марки, %	
	K98-300, K98-100 K98-45, K98-25	K97-300, K97-100 K97-45, K97-25
SiO ₂ , не менее	98	97
Al ₂ O ₃ , не более	1,1	1,6
Fe ₂ O ₃ , не более	0,6	0,7

Примечание. Массовая доля глинистых и илестых примесей допускается не более 1 %.

Требования к динасовым изделиям, предназначенным для кладки свода и арок дуговых электросталеплавильных печей, изложены в ГОСТ 1566—96 «Изделия огнеупорные динасовые для электросталеплавильных печей. Технические условия». Характеристика марок динасовых изделий по этому стандарту приведена в табл. 29, а их размеры и назначение в табл. 30—37 и на рис. 36.

28. Размеры кусков кварцитов

Марка	Размер куска, мм		Массовая доля кусков с размерами ниже минимального и выше максимального, % не более
	максимальный	минимальный	
К98-300, К97-300	300	25	5
К98-100, К97-100	100	25	10
К98-45, К97-45	45	5	10
К98-25, К97-25	25	5	5

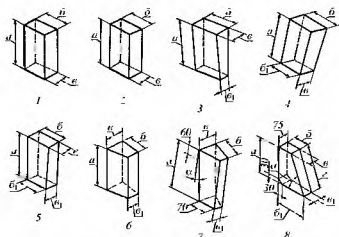


Рис. 36. Форма и размеры огнеупорных изделий по ГОСТ 1566-96:

1 — прямой кирпич; 2 — брусок; 3 — двусторонний торцовый клин; 4 — двусторонний переходный клин; 5 — двусторонний пирамидальный клин; 6 — электродный кирпич; 7 — внешняя электродная кирпич; 8 — кислородный кирпич

29. Характеристика марок диносовых изделий

Марка изделия	Характеристика	Назначение
ЭД	Изделия диносовые с массовой долей SiO_2 не менее 96 %	В электростанеплавильных печах вместимостью более 50 т
ЭД-1	Изделия диносовые с массовой долей SiO_2 не менее 95 %	В электростанеплавильных печах вместимостью до 50 т

30. Размеры, мм, и назначение прямого кирпича

Номер изделия	а	б	в	Назначение
1	230	113	40	Для подбора замковых соединений
2	230	113	65	Для кладки рядов свода толщиной 230 в сочетании с клиновыми изделиями № 5 и № 7
3	300	150	65	Для кладки рядов свода толщиной 300 в сочетании с клиновыми изделиями № 6 и № 8

31. Размеры, мм, и назначение бруска

Номер изделия	а	б	в	Назначение
4	300	100	65	Для кладки рядов свода толщиной 300 в сочетании с прямым изделием № 3 и клиновым № 8

32. Размеры, мм, и назначение двустороннего торцевого клина

Номер изделия	а	б	в	в ₁	Назначение
5	230	113	65	55	Для кладки междуэлектродных арок и сводов толщиной 230 в сочетании с прямым изделием № 2 и для кладки секторных рядов свода в сочетании с клиновым изделием № 9
6	300	150	65	55	Для кладки междуэлектродных арок и сводов толщиной 300 в сочетании с прямым изделием № 3 и для кладки секторных рядов свода в сочетании с клиновым изделием № 10

33. Размеры, мм, и назначение двустороннего переходного клина

Номер изделия	a	b	b ₁	в	Назначение
7	230	113	102	65	Для кладки секторных рядов свода толщиной 230 в сочетании с прямым изделием № 2
8	300	150	135	65	Для кладки секторных рядов свода толщиной 300 в сочетании с прямыми изделиями № 3 и № 4

34. Размеры, мм, и назначение двустороннего пирамидального клина

Номер изделия	a	b	b ₁	в	в ₁	Назначение
9	230	113	102	65	55	Для кладки секторных рядов свода толщиной 230 в сочетании с клиновым изделием № 5
10	300	150	135	65	55	Для кладки секторных рядов свода толщиной 300 в сочетании с клиновым изделием № 6

35. Размеры, мм, и назначение электродного кирпичца

Номер изделия	a	b	в	в ₁	Назначение
11	230	100	82	47	Для кладки колец электродных отверстий диаметром 270 и в сочетании с изделием № 12 для отверстий диаметром 305...440 свода толщиной 230
12	230	100	88	62	Для кладки колец электродных отверстий диаметром 475 и в сочетании с изделием № 11 для отверстий диаметром 305...440 свода толщиной 230
13	300	110	96	63	Для кладки внутренних полуколец электродных отверстий диаметром 420 и в сочетании с изделием № 14 для отверстий диаметром 450...600 свода толщиной 300

Описание табл. 35

Номер изделия	а	б	в	в ₁	Назначение
14	300	110	96	71	Для кладки внутренних полуколец электродных отверстий диаметром 630 и в сочетании с изделием № 13 для отверстий диаметром 450...600 сводов толщиной 300

36. Размеры, мм, и назначение внешнего электродного кирпича

Номер изделия	а	б	в	в ₁	α	Назначение
15	360	110	96	63	7°36'	Для кладки внешних полуколец электродных отверстий диаметром 420 и в сочетании с изделием № 16 для отверстий диаметром 450...600 сводов толщиной 300
16	360	110	96	71	7°36'	Для кладки внешних полуколец электродных отверстий диаметром 630 и в сочетании с изделием № 15 для отверстий диаметром 450...600 сводов толщиной 300

37. Размеры, мм, и назначение опорного кирпича

Номер изделия	а	б	б ₁	в	в ₁	г	α	Назначение
17	210	93	180	70	65	227	67°30'	Для кладки опор сводов толщиной 230
18	270	108	220	71	67	292	67°30'	Для кладки опор сводов толщиной 300

Технические требования к диносовым изделиям по ГОСТ 1566—96 приведены в табл. 38.

38. Технические требования к динасовым изделиям

Наименование показателя	Значение для марок	
	ЭД	ЭД-1
Массовая доля, %:		
SiO ₂ , не менее	96	95
CaO, не более	2,0	2,2
Al ₂ O ₃ , не более	1,5	1,5
Огнеупорность, °С, не ниже	1710	1700
Температура начала размягчения, °С, не ниже	1660	1650
Плотность, г/см ³ , в пределах	2,32...2,34	2,32...2,36
Пористость открытая, %, не более	22	22
Предел прочности при сжатии, Н/мм ² не менее	25	25
Кривизна, мм, не более, для сторон изделий размером, мм:		
до 150 включительно	1	1
св. 150	2	2
Глубина отбитости углов и ребер, мм, не более, на стороне:		
рабочей	5	5
нерабочей	8	8
Выпуклости отдельные диаметром, мм, не более, на стороне:		
рабочей	5	5
нерабочей	8	8
Просечки поверхностные шириной свыше 0,3 мм	Не допускаются	

Примечания: 1. Предел прочности при сжатии для одного образца из трех допускается не менее 20 Н/мм².

2. Для прямых и электродных изделий рабочей является одна из торцевых сторон, для клиновых — торцевая сторона с меньшей площадью.

ГОСТ 1566—96 в части сводового динасового кирпича гармонизирован с международными стандартами ИСО 5019-2-84 и ИСО 5019-4-88 (рис. 37 и 38, табл. 39—43).

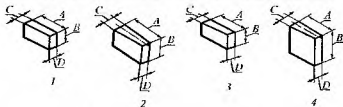


Рис. 37. Размеры огнеупорного сводового кирпича:

1 — ребровой двусторонний кирпич; 2 — торцовый клин; 3 — торцовый полуторный клиновидный кирпич; 4 — большой сводчатый кирпич

39. Размеры, мм, огнеупорного сводового кирпича (см. рис. 37)

Тип кирпича	Кирпич с постоянным средним размером		Кирпич с постоянным размером задней стороны
	серия 64 мм	серия 76 мм	
Ребровой двусторонний клин 1	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$
	230 × 114 × 67/61	230 × 114 × 79/73	230 × 114 × 76/70
	230 × 114 × 69/59	230 × 114 × 81/71	230 × 114 × 76/64
	230 × 114 × 72/56	230 × 114 × 84/68	230 × 114 × 76/52
	230 × 114 × 76/52	230 × 114 × 88/64	230 × 114 × 76/38
Торцовый клин 2	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$
	230 × 114 × 66/62	230 × 114 × 78/74	230 × 114 × 76/70
	230 × 114 × 69/59	230 × 114 × 81/71	230 × 114 × 76/64
	230 × 114 × 72/56	230 × 114 × 84/68	230 × 114 × 76/57
	230 × 114 × 76/52	230 × 114 × 88/64	230 × 114 × 76/52
Торцовый полуторный клиновидный кирпич 3	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$
	230 × 172 × 66/62	230 × 172 × 78/74	230 × 172 × 76/70
	230 × 172 × 69/59	230 × 172 × 81/71	230 × 172 × 76/64
	230 × 172 × 72/56	230 × 172 × 84/68	230 × 172 × 76/57
	230 × 172 × 76/52	230 × 172 × 88/64	230 × 172 × 76/52
Большой сводчатый кирпич 4	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$	$A \times B \times C/D$
	230 × 230 × 66/62	230 × 230 × 78/74	230 × 230 × 76/73
	230 × 230 × 69/59	230 × 230 × 81/71	230 × 230 × 76/70
	230 × 230 × 72/56	230 × 230 × 84/68	230 × 230 × 76/64
	230 × 230 × 76/52	230 × 230 × 88/64	230 × 230 × 76/52

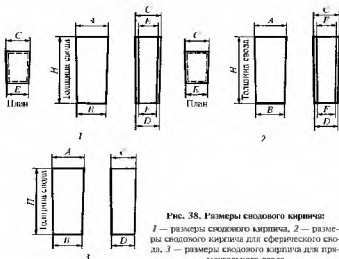


Рис. 38. Размеры сводового кирпича:

1 — размеры сводового кирпича, 2 — размеры сводового кирпича для сферического свода, 3 — размеры сводового кирпича для прямоугольного свода

40. Размеры сводового кирпича (см. рис. 38, 1)

Толщина свода H , мм	Номинальный сферический радиус, м	Размеры кирпича, мм						Справочный номер
		A	B	C	D	E	F	
200	2,0	132	120	93	85	71	65	KR20
	3,0	128	120	89	83,5	71,5	67	KR30
250	3,0	130	120	90,5	83,5	72,5	67	KR32
	4,0	128	120	87	82	72	68	KR42
	5,0	126	120	86	82	72	68	KR52
	6,0	125	120	85,5	82	71	68	KR62
	7,0	124,5	120	85	82	71	68	KR72
300	4,0	129	120	88	82	73	68	KR43
	5,0	127	120	87	82	72	68	KR53
	6,0	126	120	86	82	71,5	68	KR63
	7,0	125	120	85,5	82	71	68	KR73
	9,0	124	120	85	82	70,5	68	KR93

41. Размеры сводового кирпича для сферического свода (см. рис. 38, 2)

Толщина свода H , мм	Номинальный сферический радиус, м	Размеры кирпича, мм						Справочный номер
		A	B	C	D	E	F	
230	4,5	114	108,5	76	72,5	73	69,5	HX2
		114	108,5	76	72,5	70	67	HX3
		114	108,5	76	72,5	63	60	HX4
	2,7	114	105	76	70	73	67	HW2
		114	105	76	70	70	64,5	HW3
		114	105	76	70	63	58	HW4
250	8,1	114	110,5	76	73,5	74	71,5	JZ1
		114	110,5	76	73,5	73	70,5	JZ2
		114	110,5	76	73,5	70	67,5	JZ3
		114	110,5	76	73,5	63	61	JZ4
	6,3	114	109,5	76	73	74	71	JV1
		114	109,5	76	73	73	70	JV2
		114	109,5	76	73	70	67	JV3
		114	109,5	76	73	63	60,5	JV4
300	8,1	114	110	76	73,5	74	71,5	KZ1
		114	110	76	73,5	73	70,5	KZ2
		114	110	76	73,5	70	67,5	KZ3
		114	110	76	73,5	63	61	KZ4

42. Размеры сводового кирпича для прямоугольного свода (см. рис. 38, 3)

Толщина свода H , мм	Номинальный сферический радиус, м	Размеры кирпича, мм				Справочный номер
		A	B	C	D	
200	2,0	132	120	82,5	75	R20
	3,0	128	120	80	75	R30

Окончание табл. 42

Толщина свода H , мм	Номинальный сферический радиус, м	Размеры кирпича, мм				Справочный номер
		A	B	C	D	
250	3,0	130	120	81	75	R32
	4,0	128	120	80	75	R42
	5,0	126	120	79	75	R52
	6,0	125	120	78,5	75	R62
	7,0	124,5	120	78	75	R72
300	4,0	129	120	81	75	R43
	5,0	127	120	80	75	R53
	6,0	126	120	79	75	R63
	7,0	125	120	78	75	R73
	9,0	124	120	77,5	75	R93

43. Соответствие сферического радиуса толщине свода

Толщина свода H , мм	Обозначение	Возможные сферические радиусы, мм						
		2000	3000	4000	5000	6000	7000	
200	0							
250	2		3000	4000	5000	6000	7000	
300	3			4000	5000	6000	7000	9000

Ориентировочная схема кладки свода электроплавильной печи емкостью 8...30 т показана на рис. 39 (ГОСТ 1566-96)

Для кирпичной кладки стен, пода и откосов кислых дуговых сталеплавильных печей применяют динасовые изделия по ГОСТ 4157-79 «Изделия огнеупорные динасовые. Технические условия». Согласно этому стандарту динасовые изделия должны иметь следующие физико-химические показатели (табл. 44).

Форма и размеры динасовых изделий для кладки стен, пода и откосов дуговых печей определены ГОСТ 6024-75 (рис. 40 и табл. 45-55).

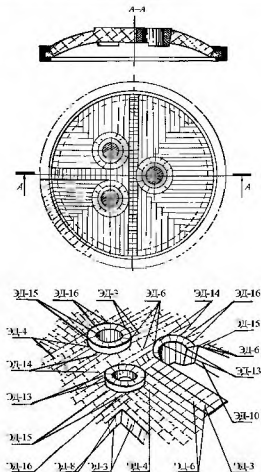


Рис. 39. Примерная схема калдки свода электродами негравитной печи емкостью 8...30 т

Окончание табл. 44

Наименование показателя	Норма для изделий марок				
	ДМС	ДМ	ДН	ДЗ	Д5
До 250 мм	2	2	2	—	—
св. 250 мм	3	3	3	—	—
Отбитость углов глубиной, мм, не более на поверхности:					
рабочей	5			5	
нерабочей	8			10	
Отбитость ребер глубиной, мм, не более, на поверхности:					
рабочей	5			5**	
нерабочей	8			10**	
Выплавки отдельные (по впадине) диаметром, мм, не более, на поверхности:					
рабочей	5			5	
нерабочей	8			10	
количеством шт. на 1 дм ² поверхности:					
рабочей	—			2	
нерабочей	—			5	
Просечки длиной, мм, не более, при ширине:					
до 0,1 мм, если они не образуют сетки		Не нормируются		Не нормируются	
св. 0,1 до 0,3 мм:					
на рабочей поверхности		50		Не допускаются	
на нерабочей поверхности		50		50	
св. 0,3 до 0,5 мм		Не допускаются		Не допускаются	
Трещины, длиной, мм, не более, при ширине св. 0,5 мм		Не допускаются			

* Данные приведены в процентах.

** Отбитость ребер общей длиной не более $\frac{1}{4}$ длины ребра.

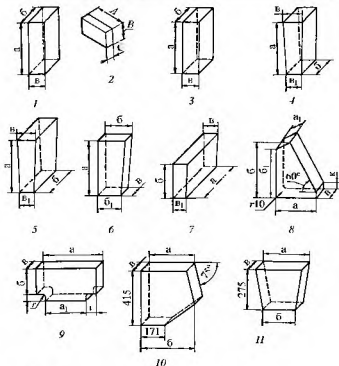


Рис. 40. Форма и размеры дычсовых и шамотных огнеупорных изделий для кладки стен, пола и откосов дуговых сталелитейных печей:

1 — кирпич прямой, 2 — прямоугольный насадочный кирпич, 3 — кирпич прямой полуторный, 4 — кирпич торцовый (двусторонний и односторонний), 5 — кирпич торцовый полуторный (двусторонний и односторонний), 6 — кирпич трапецидальный (односторонний), 7 — клин ребровой (односторонний), 8 — кирпич пятый, 9 — кирпич Т-образный насадочный и поднасадочный, 10 — кирпич поднасадочный пятый, 11 — кирпич поднасадочный распорный

45. Размеры, мм, кирпича прямого (рис. 40, 1)

Номер изделия	а	б	в
1	230	150	50
2	230	150	75
3	300	150	50
4	300	150	75
5	345	150	65
6	350	150	50
7	360	150	65
8	370	150	50
9	380	150	75
10	410	150	65
11	460	150	65
12	460	150	75
13	460	150	90
14	520	170	80
15	540	150	90

46. Размеры, мм, прямоугольного насаженного кирпича (см. рис. 40, 2)

A	B	C
230	114	64
230	114	76
300	150	64
300	150	76
345	114	64
345	114	76

47. Размеры, мм, кирпича прямого полуторного (см. рис. 40, 3)

Номер изделия	а	б	в
16	380	225	75
17	460	225	75
18	460	225	90

48. Размеры, мм, клина торцового (двустороннего и одностороннего) (см. рис. 40, 4)

Номер изделия	а	б	в	в ₁
19	300	150	75	68
20	380	150	75	67
21	460	150	78	70
22	460	150	88	80
23	540	150	90	80

49. Размеры, мм, клина торцового полуторного (двустороннего и одностороннего) (см. рис. 40, 5)

Номер изделия	а	б	в	в ₁
24	300	225	75	68
25	380	225	75	67
26	460	225	78	70
27	460	225	88	80

50. Размеры, мм, клина трапецидального (одностороннего) (см. рис. 40, 6)

Номер изделия	а	б	б ₁	в
28	300	150	135	65
29	380	100	50	75

51. Размеры, мм, клина ребрового (одностороннего) (см. рис. 40, 7)

Номер изделия	а	б	в	а ₁
30	230	114	65	50
31	300	150	65	50
32	300	150	65	55

52. Размеры, мм, кирпича пятового (см. рис. 40, 8)

Номер изделия	а	а ₁	б	б ₁	в	к
33	225	75	300	257	75	40
34	265	75	369	326	75	40
35	330	100	438	380	75	40
36	370	100	508	450	75	40

53. Размеры, мм, кирпича Т-образного насадочного и поднасадочного (см. рис. 40, 9)

Номер изделия	а	а ₁	б	в	г	к	е
37	230	150	114	50	40	25	5
38	230	150	114	65	40	25	5
39	230	150	114	75	40	25	5
40	230	100	150	75	65	25	5
41	260	180	114	75	40	73	5
42	270	196	114	75	37	30	5
43	270	196	120	75	37	30	5
44	300	140	150	75	80	25	5
45	300	220	114	75	40	56	5
46	330	250	114	75	40	56	5
47	350	230	114	75	60	56	5

54. Размеры, мм, кирпича поднасадочного пятового (рис. 40, 10)

Номер изделия	а	б	в
48	326	400	75
49	326	400	90
50	326	400	114
51	385	459	75
52	385	459	90
53	385	459	114

55. Размеры, мм, кирпича поднасадочного распорного (см. рис. 40, 11)

Номер изделия	а	б	в
54	284	138	75
55	284	138	90
56	284	138	114
57	520	374	75
58	520	374	90
59	520	374	114

Технические требования к мертелю, предназначенному для связывания динасовых изделий в огнеупорной кладке, изложены в ГОСТ 5338–80 «Мертели огнеупорные динасовые пластифицированные» (табл. 56).

56. Физико-химические свойства и зерновой состав мертелей

Наименование показателя	Норма для марки		
	МД 94	МД 92	МД 90
Массовая доля, %:			
SiO ₂ не менее	94	92	90
Al ₂ O ₃	2,0...3,5	2,5...4,0	3,5...6,0
Na ₂ CO ₃	0,10...0,15	—	—
ЛСТ	0,07...0,12	0,10...0,25	0,10...0,25
CaCl ₂	—	2,0...2,8	2,0...2,8

Описание табл. 56

Наименование показателя	Норма для марки		
	МД 94	МД 92	МД 90
Потери массы при прокаливании, %, не более	1,1	1,5...2,8	1,8...3,5
Массовая доля влаги, %, не более	5		
Зерновой состав, %, проход через сетку:			
№ 2, не менее	100		
№ 1, не менее	97		
№ 02	65...85		
№ 009	45...65		
<p>Примечание. Допускается изготавливать мертели марок МД 92 и МД 90 по требованию потребителей с массовой долей Na_2CO_3 взамен CaCl_2 в количестве 0,10...0,15 % и ЛСТ (дигносульфат) в количестве 0,07...0,12 %. К обозначению марки таких мертелей прибавляется цифра «1». Например: МД 92-1.</p>			

Технические требования к шамоту для кладки теплоизоляционного слоя стен, пода и откосов дуговых печей изложены в ГОСТ 390—96 (табл. 57).

57. Физико-химические свойства шамотного кирпича

Наименование показателя	Норма для марки						
	ШАК	ША	ШБ	ШВ	ШУС	Пь	ПВ
1. Массовая доля, %:							
Al_2O_3 , не менее	33	30	28	28	28	—	—
Al_2O_3	—	—	—	—	—	14...28	14...28
SiO_2	—	—	—	—	—	65...85	65...85
2. Огнеупорность, °С, не ниже	1730	1690	1650	1630	1580	1670	1580
3. Допо- лнительная линейная усадка или рост, %, не бо- лее, при темпе- ратуре 1400 °С	0,5	—	—	—	—	—	—

Окончание табл. 57

Наименование показателя	Норма для марки						
	ШАК	ША	ШБ	ШВ	ШУС	ПБ	ПВ
4. Пористость открытая, %, не более	23	24	24		30	24	
5. Предел прочности при сжатии, Н/мм ² , не менее	23	20		20	12	20	15
6. Температура начала размягчения, °С, не ниже	1320	1300					

Примечания: 1. Допускается изготовление изделий марок ШБ и ШВ с огнеупорностью не ниже 1630 и 1580 °С соответственно.

2. По результатам повторных испытаний на удвоенном количестве образцов допускаются на одном образце стандартные отклонения от нормативного по пористости открытой до +1 % для изделий марок ШАК, ША, ШБ и ПБ и по пределу прочности при сжатии до 1 Н/мм² для изделий марок ШАК, ША, ШВ, ПБ и ПВ.

3. Для фасонных изделий марок ША, ШВ, ШУС, ПБ и ПВ по согласованию с потребителем допускается предел прочности при сжатии не менее 10 Н/мм².

Для обкладки кожуха дуговых сталеплавильных печей применяют асбестовый картон, изготавливаемый из хризотилового асбеста по ГОСТ 12871—93 «Асбест хризотилковый. Общие технические условия». Поставляется асбестовый картон по ГОСТ 2850—95 «Картон асбестовый. Технические условия». В зависимости от применения асбестовый картон бывает следующих марок: КАОН-1, КАОН-2 — картон асбестовый общего назначения и КАП — картон асбестовый прокладочный.

Для обкладки кожуха дуговых сталеплавильных печей, как правило, применяется асбестовый картон марки КАОН-1 (применяется для теплоизоляции при температуре изолируемой поверхности до 500 °С). Номинальная длина листов картона 780...1040 мм (для КАОН-1, как правило, 1000 мм), ширина 460...1040 мм (для КАОН-1 чаще всего 600...1000 мм). Нормы физико-механических показателей асбестового картона указаны в табл. 58.

58. Физико-механические показатели асбестового картона

Наименование показателя	Значение для марки		
	КАОН-1	КАОН-2	КАП
1. Плотность, кг/см ³	1000...1400	1000...14000	900...1200
2. Предел прочности при растяжении, МПа (кгс/см ²), не менее:			
в продольном направлении	1,2 (12)	1,5 (15)	2,5 (25)
в поперечном направлении	0,6 (6)	0,9 (9)	1,5 (15)
3. Потеря вещества при прокаливании, %, не более	15	15	18
4. Массовая доля влаги, %, не более	3	10	3
5. Огнестойкость	Не должен гореть и обугливаться		

4.2. МОНОЛИТНАЯ ФУТЕРОВКА ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Применение для футеровки сталеплавильных печей кирпичных огнеупоров, имеющих острые кромки и углы, связано с большими затруднениями. Поскольку металлургические процессы вызывают чередование нагрева и охлаждения огнеупоров, кирпич претерпевает температурные колебания, в результате чего в углах и кромках он дает трещины и выкрашивается. Огнеупорные материалы по-разному изменяются в объеме, что вследствие перепада температур приводит к возникновению внутренних напряжений и разрушению кирпича.

В особо тяжелых условиях работает огнеупорный кирпич стен сталеплавильных печей. При загрузке сверху скорость изменения температуры кладки составляет более 1000 °С/ч. Длительность работы печи с кислой футеровкой в процессе плавки при 1500...1600 °С составляет в среднем 90 мин и более 1600 °С — ~30 мин; после этого печь в период выпуска и завалки быстро охлаждается, затем снова нагревается и т.д. Поэтому кислая кирпичная футеровка стен дуговых сталеплавильных печей имеет обычно весьма низкую стойкость 30...60, в отдельных случаях до 300 плавов. Из-за этого приходится еженедельно ремонтировать печи, а в отдельных случаях останавливать на ремонт даже среди недели, что отрицательно сказывается на работе литейных цехов. Низкая стойкость стен дуговых печей, как правило, вызывает необходимость ежегодных ремонтов кожухов из-за деформации и прогаров.

Ремонты кирпичной кладки связаны с трудоемкой и продолжительной работой. Ремонт стен печей вместимостью 5...6 т длится 6...8 ч и требует большого расхода дорогостоящих огнеупорных материалов. Так, на ремонт стен 5-тонной кислой дуговой сталеплавильной печи затрачивается около 5 т динаса. Повышение стойкости футеровки является важнейшим резервом увеличения производительности сталеплавильных печей и снижения себестоимости стали.

Одним из основных современных направлений повышения стойкости футеровки и снижения ее стоимости является применение монолитной футеровки из огнеупорных масс.

Наиболее ответственные участки футеровок металлургических агрегатов всегда выполняли монолитными, например подины сталеплавильных мартеновских и электродуговых печей, работающие в условиях длительного контакта с расплавленным металлом, нагретым до высокой температуры. При тщательном уходе такие подины могут работать очень долго. На одном из отечественных заводов еще в конце 40-х годов прошлого века подина 4-тонной кислой дуговой сталеплавильной печи простояла 15 000 плавов, в то время как кирпичную кладку стен этой печи заменяли каждую неделю.

Применение футеровок, изготовленных из огнеупорных масс и бетонов, имеет целый ряд преимуществ перед кирпичной кладкой.

1. Экономия штучных огнеупоров, снижение стоимости футеровки, сокращение площадей для складирования огнеупоров

2. Отсутствие предварительного обжига огнеупоров и замена его нагревом в условиях эксплуатации.

3. Ликвидация трудоемких процессов ломки футеровки и тщательной укладки штучных изделий и замена их торкретированием или холодной заправкой набивной футеровки, отсутствие потребности в рабочих высокой квалификации, возможность изготовления футеровок с помощью трамбования и специальных механизмов, улучшение условий труда.

4. Возможность использования местных дешевых (в том числе естественных) материалов: кварцевого песка, отработанных огнеупоров, металлургических шлаков и т.д.; высвобождение мощностей огнеупорных заводов

5. Возможность использования для приготовления огнеупорной массы тех же материалов и оборудования, что и для приготовления формовочных смесей в литейном производстве (для организации производства огнеупорных масс в условиях литейных цехов дополнительные капиталовложения не требуются).

6. Возможность увеличения вместимости дуговых печей.

7. Улучшение организации производства в литейных цехах

8. Возможность исправления поврежденных мест футеровки.

9. Высокая герметичность футеровки из-за ее монолитности.

10. Резкое повышение стойкости футеровки при высоких температурах и большая устойчивость к растрескиванию из-за отсутствия швов между кирпичами, углов и кромок, скалываемых при возникновении термических напряжений; работа футеровки без разрушения до максимально возможного уменьшения ее толщины. Отсутствие внутренних напряжений, связанных с высоким давлением при формовании штучных огнеупоров. Меньшие разрушения футеровки при изменениях объема за счет большей пористости и, соответственно, меньшего модуля упругости.

11. Меньший коэффициент теплопроводности набивных масс (70...80 % от теплопроводности штучных огнеупорных изделий), соответственно, меньшей толщины кладки.

По этим причинам огнеупорные массы находят все более широкое распространение в металлургии, вытесняя кирпичную кладку [79]. На пример, в Чехии применяются зернистые огнеупоры набивные массы. В Японии распространены монолитные огнеупоры. В Японии из всех произведенных огнеупоров около 50 % составляют неформованные огнеупоры (бетоны, пластичные, набивные, пескометные массы, торкрет-массы и т.д.). Доля неформованных огнеупоров в общем производстве огнеупоров составляет в США 45 %, в Германии 50 %. Широкое применение неформованные огнеупоры нашли при ремонтных работах, производимых торкретированием, трамбованием, заливкой

Набивные футеровки стен дуговых сталеплавильных печей применяются в Сербии. Набивные массы для торкретирования дуговых чугуноплавильных и сталеплавильных печей — в США и Чехии.

И.С. Кайнарским установлено, что термическая стойкость огнеупоров увеличивается в ряду: пластина — цилиндр — шар; футеровка стен электросталеплавильных печей имеет форму цилиндра, поэтому термостойкость монолитной футеровки выше, чем термостойкость кирпича, имеющего форму пластины.

Для достижения высокой стойкости набивной футеровки стен кислых дуговых сталеплавильных печей решающим фактором является правильно выбранная масса для футеровки. Огнеупорная масса для набивной футеровки стен дуговых сталеплавильных печей, имеющая правильно выбранную зерновую основу и связующее, должна обладать сочетанием необходимых технологических свойств (прочности в сыром состоянии, пластичности и долговечности), высокой огнеупорности и прочности при высоких температурах, что обеспечивает высокую стойкость набивной футеровки

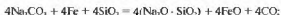
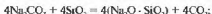
Такие работы были успешно проведены в СССР и результаты их внедрены в производство на ряде заводов.

Метод набивной футеровки стен дуговых сталеплавильных печей был создан в СССР по предложению С.Я. Барина на Уралвагонзаводе в 1940-х годах. Этот метод не нашел широкого распространения, так как он требовал переделки цилиндрического кожуха печи на конический, что влекло за собой увеличение тепловых потерь и расхода электроэнергии, тяжелой ручной операции ежеплавочной горячей заправки стен печей и понижения температуры выпуска стали, что приводит к ухудшению ее качества. Проведенные нами работы позволили применить монолитную футеровку для цилиндрических кожухов печей, ликвидировать ежеплавочную горячую заправку стен и применить только холодную заправку в выходные дни [80, 81].

4.3. ЗЕРНОВАЯ ОСНОВА ОГНЕУПОРНЫХ МАСС

Для обеспечения высокой стойкости набивной футеровки исключительно важен правильный выбор зерновой основы смеси. Кремнеземистая масса может готовиться на основе кварцита или кварцевого песка. Рациональнее применять песок, так как кварцит дороже и более трудоемок в обработке — его необходимо размалывать и сортировать по фракциям зерен. Кроме того, выбор кварцевого песка в качестве зерновой основы массы для футеровки дуговых печей (в отличие от набивной футеровки индукционных сталеплавильных печей), выполняемой на основе кварцита) объясняется относительно большой толщиной футеровки стен в дуговых печах и менее жесткими требованиями к ее спеканию. Для набивной футеровки наиболее рационально использовать кварцевые пески, обычно применяемые в литейном производстве для изготовления форм и стержней.

При составлении массы важное значение имеет размер зерен песка. В процессе сушки набивной футеровки выделяется большое количество водяных паров, а также CO_2 и других газов. Значительными выделениями газов из смеси сопровождается и контакт футеровки с жидким металлом. Так, из уплотненной смеси песка с жидким стеклом при температурах $>1000^\circ\text{C}$, по данным Ю.П. Васина и П.В. Черногорова, выделяются CO_2 и CO по следующим химическим реакциям:



В уплотненной массе на основе кварцевого песка с уменьшением газопроницаемости резко возрастает давление паров воды. Например,

при газопроницаемости 200 ед. давление паров воды составило 0,000127 МПа (12,7 мм вод.ст.), а при газопроницаемости 70 ед. — 0,000762 МПа (76,2 мм вод.ст.).

По данным А.М. Лясса, образцы, полученные из смеси кварцевого песка с жидким стеклом, при нагреве выделяют CO_2 (табл. 59).

59. Выделение газов при нагреве жидкостекольных масс

Температура нагрева образца, °С	Количество выделяющегося CO_2 в пересчете на 100 г смеси, см ³
200	26,1
400	75,6
500	145,1
600	183,8
700	208,0

Газопроницаемость смеси, определяющаяся в первую очередь размером зерен песка, должна быть достаточной для удаления газов без разрушения футеровки. Из практики литейного производства известно, что таким качеством обладает смесь, имеющая газопроницаемость не менее 100 ед. Это положение подтверждается опытом применения кварцевого песка для футеровки сталеразливочных ковшей. На Криворожском металлургическом заводе сушка футеровки, изготовленной из песка с газопроницаемостью 55...61 ед., была значительно затруднена.

Предупредить обвалы на некоторых металлургических заводах удалось значительным увеличением отверстий в кожухе ковша. Вот почему мелкозернистый песок группы ниже 016 (ГОСТ 2138—91) вряд ли может быть использован для набивной футеровки сталеплавильных печей. Мелкий песок нецелесообразно применять для футеровки печей и из-за отсутствия достаточного количества пор, за счет которых могло бы происходить расширение зерен кварца при нагреве песка, что приводит к разрушению футеровки при высоких температурах; необходимости применения увеличенного количества связующего, что отрицательно сказывается на огнеупорности массы; снижения когезионной прочности масс.

С другой стороны, применение крупнозернистого песка приводит к низкой прочности смеси после ее нагрева и охлаждения, так как при уменьшении величины отношения поверхности зерна к его объему уменьшается реактивная способность кварца, и процесс спекания смеси происходит медленнее. Особо крупные зерна кварца при нагрева-

нии растрескиваются. Чем больше размер зерна песка, тем больше его расширение при нагреве.

Для футеровки стен сталеплавильных печей целесообразнее применять среднезернистый песок групп 016–03 (ГОСТ 2138–91). Пески этих групп широко применяются в литейных цехах для изготовления быстротвердеющих (в том числе холоднотвердеющих) формовочных и стержневых смесей.

В то же время проведенные нами исследования показали, что сама по себе группа песка не определяет количество добавок и свойства смеси, а решающим фактором является абсолютная доля средних и крупных зерновых фракций песка.

С точки зрения стабильности газопроницаемости, для футеровки желательно применять песок с округлыми, а не остроугольными зёрнами. Фергюссон, исследовавший пески для наварки подлин кислых печей, указывает, что песок должен состоять из светлоокрашенных, равномерных по величине, закругленных кристаллов. Округлая форма зерен песка обеспечивает хорошую текучесть и уплотняемость смесей, так как требует меньшего количества связующего. Влияние поверхности зерен песка на физико-механические и технологические свойства смесей устанавливается с помощью электронного микроскопа со вторичным потоком электронов. Характер поверхности зерен песка (шлифованная, гладкая, ограненная, корродированная, дольчатая) определяется при увеличении 1000 и 3000.

Стабильность свойств смесей на основе кварцевого песка в значительной степени зависит также от концентрации его зерновой структуры: чем больше сосредоточение фракций песка на основных ситах, тем больше стабильность свойств смеси. Количество добавок в огнеупорную массу на основе кварцевого песка зависит от абсолютной доли средних и крупных зерновых фракций.

Например, староверовский кварцевый песок (ГОСТ 2138–91) отличается указанным требованиям. Основная фракция его (зерна размером 0,2...0,3 мм) содержит 100 % легких минералов и носит лишь следы тяжелых минералов. Легкие минералы от 93,1 до 95,33 % представлены зёрнами прозрачного кварца, иногда с примесями минералов темного цвета. Зерна полуокатанные и окатанные, встречаются угловатые. Изучение зернового состава староверовского песка показывает, что 60,5...76,8 % зерен сосредоточены на основном сите 020, 12,8...26,3 % — на сите 016 и 8,8...16,2 % — на сите 0315.

Округлая форма зерен и высокая концентрация основной фракции обеспечивают высокую стабильность свойств староверовского песка. Большинство проб староверовского песка имело газопроницаемость 205...219 (см. рис. 41). Глиносодержание, определенное на 66 пробах

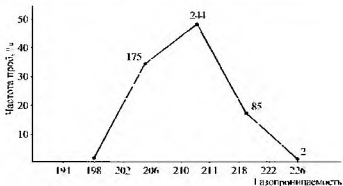


Рис. 41. Частотная кривая газопроницаемости старOVERОВСКОГО ПЕСКА (по данным 509 проб, цифры у точек обозначают количество проб)

методом отмучивания выходилось в пределах 0,7...1,7%. В табл. 60 приведены химический состав песка и огнеупорность, на рис. 42 — зерна старOVERОВСКОГО ПЕСКА.

60. Химический состав и огнеупорность старOVERОВСКОГО ПЕСКА

Химический состав песка, %								Огнеупорность, °С
SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Прочие примеси	
98,20	0,74	0,74	0,02	0,08	—	0,76	0,28	1770
97,20	1,55	0,25	0,32	0,05	0,41	0,32	0,24	1770
96,32	1,71	0,21	0,16	0,12	0,15	0,16	0,26	1770
97,28	2,10	0,12	0,28	0,05	0,25	0,23	0,70	1770
96,20	0,97	0,09	1,00	0,27	0,19	0,16	0,30	1770

Свойства старOVERОВСКОГО ПЕСКА еще более улучшаются при его обогащении (прокалке при температуре 800...900 °С в течение 15...30 мин), при этом уменьшается содержание глинистой составля-

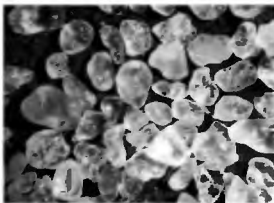


Рис. 42. Зерна старореровского песка

щей (с 1,2...1,4 до 0,21...0,31 %) и очищаются зерна песка, теряющие покрывавшие их глинистые оболочки [82].

Важнейшим фактором, определяющим стойкость набивной футеровки печей, является огнеупорность массы, зависящая в первую очередь от огнеупорности зерновой основы. В связи с этим для футеровки сталеплавильных печей может быть использован только кварцевый песок, а не речной, так как он в большей степени загрязнен другими минералами.

В связи с тем, что определение огнеупорности является довольно сложным и выполнить его в заводских условиях трудно, можно использовать зависимость огнеупорности кварцевых песков от их химического состава. С этой целью нами проведено исследование влияния химического состава среднезернистых кварцевых песков на их огнеупорность.

Исследовали пески старореровские, вишневецкие, вольногорские, нововодолужские и ореховские. Содержание оксидов в исследованных песках, %: 90,80...99,56 SiO_2 ; 0,09...3,72 Al_2O_3 ; 0,03...2,11 Fe_2O_3 ; 0,02...1,10 TiO_2 ; 0,02...1,20 CaO ; 0,05...0,49 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$. Огнеупорность определяли по ГОСТ 4069-69, считая результат удовлетворительным при его полторении на двух образцах одной пробы. Всего исследовали 53 пробы кварцевых песков. Влияние содержания Fe_2O_3 , CaO и $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ в рассмотренных пределах при обработке данных без учета

содержания в песке остальных оксидов не выявлено. Результаты исследования зависимости огнеупорности от содержания в песке SiO_2 , Al_2O_3 и TiO_2 дают основания считать, что в рассмотренных пределах содержания этих оксидов огнеупорность зависит от них линейно. Поэтому следует ожидать линейную зависимость и в трехкомпонентной системе:

$$t_{\text{огн}} = a + b(\% \text{Al}_2\text{O}_3) + c(\% \text{TiO}_2),$$

где $t_{\text{огн}}$ — огнеупорность смеси, °С; $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\% \text{TiO}_2$ — содержание оксидов в смеси с SiO_2 , %; a , b , c — постоянные.

Обработку экспериментальных данных в форме уравнения проводили методом наименьших квадратов, а также при помощи уравнения множественной регрессии. Уравнение огнеупорности, полученное методом наименьших квадратов, имеет вид

$$t_{\text{огн}} = 1785,15 - 16,87(\% \text{Al}_2\text{O}_3) - 22,66(\% \text{TiO}_2).$$

Это уравнение довольно точно согласуется с опытными данными; погрешность составляет $\pm 0,5$ %. Его можно использовать для расчета огнеупорности средnezернистых кварцевых формовочных песков по химическому составу.

Нами проведено также исследование огнеупорности крупно- и мелкозернистых кварцевых песков: влияние зернистости и формы зерен песков на их огнеупорность, определение области применения формулы для расчета огнеупорности песков, оценка возможности использования косвенной характеристики огнеупорности песков [83].

Объектом исследования являлись природные и обогащенные кварцевые пески различной зернистости с полукруглой и остроугольной формой зерен (табл. 61).

61. Зерновой состав и форма зерен кварцевых песков

Месторождение	Зернистость песков, мм			Форма зерен	
	0,3	0,2	0,16	полукруглая	остроугольная
Люберецкое			+	+	
Карасорское			+		+
Бурцевское			+		+
Вольногорское			+	+	
Миллеровское	+	+	+	+	

Выявлено, что крупные пески имеют более высокую огнеупорность по сравнению с мелкими, в то же время мелкие обогащенные пески имеют огнеупорность выше, чем крупные (табл. 62). Огнеупорность фракций 0,3; 0,2 и 0,16 миллеровского песка соответственно равна 1750, 1750 и 1740 °С. Возможно в определенной степени это связано с методикой определения огнеупорности зернистых материалов.

62. Огнеупорность кварцевых песков различного зернового состава

Месторождение	Средний размер зерна, мм	Огнеупорность, °С
Миллеровское	Св. 0,28	1750
Вольногорское	0,14...0,18	1760
Средние размеры по 7 месторождениям	0,14...0,18	1745,7

Поскольку общая поверхность зернистых материалов определяется размером зерна, то при том же количестве связующего «строительная прочность» материала пироскопа будет большей у песка с большей зернистостью.

Исследования показали, что форма зерен песка влияет на огнеупорность. Из табл. 63 видно, что пески с полукруглой формой зерен различных карьеров имеют огнеупорность в пределах 1750...1760 °С (средняя 1753 °С), тогда как пески с остроугольной формой зерен той же зернистости — 1740...1750 °С (средняя 1743 °С). Возможно, это объясняется более интенсивным прогревом и оплавлением песка с зерном остроугольной формы.

63. Огнеупорность кварцевых песков с различной формой зерен

Месторождение	Форма зерен	Огнеупорность, °С
Вольногорское	Полукруглая	1760
Люберецкое	•	1750
Толмачевское	•	1750
Бурцевское	Остроугольная	1740
Карасорское	•	1740

Была оценена возможность применения полученной для средних песков зависимости для расчета огнеупорности крупных песков Мил-

леровского месторождения (табл. 64) и мелких песков различных месторождений (табл. 65). Рассчитанная по формуле огнеупорность крупных песков (фракции 0,315 и 0,2) достаточно точно согласуется с опытными данными (погрешность составляет 0,35...0,42 %), для мелких песков погрешность составляет 0,1...1,38 %.

64. Огнеупорность песков Миллеровского месторождения

Средний размер зерен, мм	Огнеупорность, °С	Погрешность, %
0,3	1750	+0,42
0,2	1750	+0,35

65. Огнеупорность мелких песков

Месторождение	Огнеупорность, °С		Погрешность, %
	Опытная	По данным [17]	
Вольнягорское	1760	1764	+0,44
Люберецкое	1750	1767,7	+0,10
		1765,0	+0,43
Толмачевское	1750	1751,8	+0,86
Бурцевское	1740	1757,6	+1,10
		1753,6	+1,09
Карасорское	1750	1759,14	+0,21
		1740	1759,0

Косвенной характеристикой огнеупорности масс на основе средних и крупных кварцевых песков может служить их газопроницаемость. Установлена такая же зависимость для мелких песков, их огнеупорность снижается по мере уменьшения газопроницаемости: у песков с газопроницаемостью 210 огнеупорность равнялась 1755 °С, тогда как у песков с газопроницаемостью 118 - 1743 °С.

Очевидно, подобное соотношение огнеупорности и газопроницаемости связано с наличием мелкодисперсных примесей в песке, количество которых характеризуется содержанием Al_2O_3 и TiO_2 , как известно, снижающих огнеупорность песков. Действительно, у песков, имеющих высокую газопроницаемость (210), сумма $Al_2O_3 + TiO_2$ составляет 1,16 %, а у песков с меньшей газопроницаемостью (100...160) равна 1,54 %.

В результате исследований установлено, что крупные кварцевые пески с полукруглой формой зерен имеют более высокую огнеупорность по сравнению с мелкими песками и с песками, имеющими остроугольные зерна. Огнеупорность крупнозернистых кварцевых песков можно определять по формуле, выведенной для расчета огнеупорности среднезернистых песков по их химическому составу. Газопроницаемость мелких кварцевых песков может служить косвенной характеристикой их огнеупорности.

Необходимо отметить, что кварцевый песок, содержащий 96...98 % SiO_2 , имеет температуру огнеупорности 1770 °С, в то время как температура плавления кремнезема 1730 °С (температура плавления кристобалита 1728 °С). Это, очевидно, объясняется различиями в методах определения температуры плавления и огнеупорности, а также и тем, что кремнеземистые скелеты обладают достаточной жесткостью, чтобы при определении огнеупорности пироскоп сохранил свою форму в течение некоторого времени после насыщения плавлениями. Существенное значение имеет и значительная вязкость кремнеземистых расплавов.

Проведенные исследования показали, что с точки зрения огнеупорности для набивной футеровки кислых дуговых сталеплавильных печей рекомендуется применять кварцевый песок групп не ниже К₁ (ГОСТ 2138–91), содержащий не менее 97 % SiO_2 и не более 1 % глины.

В целях более широкого внедрения монолитной футеровки дуговых сталеплавильных печей на заводах Украины нами были исследованы свойства кварцевых песков ряда украинских карьеров.

Сравнили кварцевые пески месторождений Вишневского, Ореховского, Нововодолажского и Староверовского. Одновременно проверяли кварцевые пески Верхнеднепровского горно-металлургического комбината. Зерновой и химический составы проверенных песков приведены в табл. 66 и 67.

Проверка проб в течение 5 лет показала стабильность зернового и химического состава песков, относящихся в основном к группам 02 и 025. Староверовский песок имеет высокую концентрацию зерна (97...98 % на трех основных ситах). Концентрация Вишневского песка (98...99 %) самая высокая: на сите 0,20 остается более 70 % зерен.

Ореховский песок имеет концентрацию 86,06...88,84 %.

Нововодолажские пески трех сортов предназначаются для стекольного производства и лишь не удовлетворяющие его требованиям поставляются для литейного производства без проверки и какого-либо отбора.

По зерновому и химическому составу пески не имеют стабильных свойств. Вольногорский песок имеет концентрацию 86...96 %.

Газопроницаемость песков при влажности 2 и 4 % приведена в табл. 68.

66. Зерновой состав кварцевых песков различных месторождений Украины

Номер сита	Староверовский	Вишневский	Ореховский	Новолюдовские			Вольногорский
2,5	—	—	—	—	—	—	—
1,6	0,01 (0...0,01)	—	—	—	—	—	—
1,0	0,02 (0...0,04)	—	—	—	—	—	0,01 (0,0...10)
0,63	0,03 (0,02...0,08)	0,1 (0...0,02)	—	—	—	—	0,21 (0,1...40,0)
0,4	0,64 (0,25...1,26)	0,32 (0,22...0,44)	4,88 (4,30...5,52)	1,34	4,18	0,40	3,40 (0,10...8,16)
0,315	13,18 (12,0...15,18)	14,82 (11,18...15,74)	8,19 (7,70...8,58)	2,04	13,04	0,22	66,07 (2,26...8,48)
0,20	65,60 (62,34...69,8)	70,19 (69,98...72,24)	49,75 (48,12...51,54)	23,01	42,40	1,20	51,73 (34,78...69,70)
0,16	18,19 (17,10...20,66)	13,22 (12,88...16,34)	29...45 (28,74...29,80)	36,24	27,84	5,60	26,94 (21,0...32,46)
0,10	0,65 (0,49...0,81)	0,43 (0,30...0,74)	6,86 (5,60...8,10)	35,1	11,92	39,58	9,24 (1,28...20,24)

Номер сита	Староле- ровский	Вяшневский	Ореховский	Нововодолажские			Вольногор- ский
0,063	0,19 (0,02...0,22)	0,22 (0,14...0,72)	0,12 (0...0,24)	1,28	0,40	48,80	1,37 (0,38...4,41)
0,05	0,03 (0,02...0,04)	0,01 (0,0...0,02)	0,02 (0,0...0,04)	—	—	0,74	0,07 (0...0,32)
Тазик	0,04 (0,02...0,10)	0,01 (0...0,02)	0,02 (0...0,04)	—	—	0,14	0,01 (0...0,03)
Глини- стая	1,34 (1,18...1,50)	0,43 (0,03...0,66)	0,46 (0,24...0,70)	0,66	0,12	2,96	0,65 (0,32...1,92)

Примечание. В скобках даны пределы значений.

67. Химический состав, %, кварцевых песков различных месторождений Украины

Состав	Староле- ровский	Вяшневский	Ореховский	Нововодолажские			Вольногор- ский
SiO ₂	97,13 (96,44...98,32)	98,22 (97,47...99,17)	96,00 (93,06...98,68)	96,89	98,26	95,36	93,52 (90,08...98,3)
Al ₂ O ₃	0,96 (0,28...2,10)	0,49 (0,12...1,12)	1,05 (0,09...2,99)	0,96	0,80	2,48	2,81 (1,30...2,00)

Fe ₂ O ₃	0,79 (0,16...2,11)	0,58 (0,13...1,16)	0,58 (0,04...0,79)	0,47	0,41	0,45	0,95 (0,22...1,57)
CaO	0,35 (0,17...1,00)	0,14 следи 0,24	1,08 (0,05...2,00)	0,65	0,13	0,23	0,58 (0,07...1,04)
MgO	0,14 (0,05...0,27)	0,13 (0,0...0,29)	0,39 следи 0,54	0,09	0,14	0,27	0,24 (0,01...0,50)
SO ₄	0,06 (0,02...0,10)	0,10 (0,05...0,14)	—	0,05	0,03	0,08	0,05 следи 0,07
TiO ₂	0,13 (0,06...0,25)	0,06 (0,02...0,12)	0,06 (0,0...0,07)	0,16 —	0,15 —	0,20 —	0,81 (0,70...1,26)
K ₂ O + + Na ₂ O	0,23 (0,10...0,41)	0,26 (0,09...0,49)	0,46 (0,12...1,40)	0,19	0,17	0,19	0,10 (0,08...0,12)
п.п.п	0,33 (0,24...0,70)	0,26 (0,11...0,82)	0,25 (0,20...0,36)	0,22 —	0,34 —	0,54 —	0,54 (0,12...1,0)

Примечание. В скобках даны пределы значений.

68. Газопроницаемость кварцевых песков различных месторождений Украины

Пески	Газопроницаемость при влажности, %	
	2	4
Староверовский	260	231
Вишневский	364	346
Ореховский	254	235
Нововодолажский	269	235
Вольногорский	220	201

Хотя газопроницаемость всех исследуемых песков выше требуемой ГОСТом, но при одинаковой влаге газопроницаемость вишневского песка почти на 100 единиц выше газопроницаемости староверовского, нововодолажского и ореховского песков, относящихся также к группе 02. Это объясняется его несколько более крупным зерном, меньшим содержанием глины и большей концентрацией.

Вольногорский песок как самый мелкий, естественно, имеет и самую низкую газопроницаемость.

Для более полного изучения свойств песков были проверены их огнеупорность и термическая стойкость против растрескивания. Данные по огнеупорности приведены в табл. 69.

69. Огнеупорность кварцевых песков различных месторождений Украины

Пески	Средняя огнеупорность, °С
Староверовский	1770
Вишневский	1775
Нововодолажский 1	1750
Нововодолажский	1775
Нововодолажский 2	1775
Ореховский	1760
Вольногорский	1715

Пониженная огнеупорность вольногорского песка вызвана повышенным содержанием Al_2O_3 и пониженным SiO_2 . Тощий и более мелкий песок имеет также более низкую огнеупорность. Термическая стойкость некоторых проверенных песков против растрескивания показана в табл. 70.

70. Термостойкость кварцевых песков различных месторождений Украины

Индекс песка	Месторождение	Количество растрескавшихся зерен, %, при температуре, °С						
		20	200	400	600	800	1000	1200
1	Вишневское	2,0	3,0	5,0	8,0	16,0	28,0	31,0
2	Ореховское	—	2...3	6...7	7...14	5...18	20...21	25...29
3	Новоодошажское	9,6	—	—	22,8	32,6	43,0	46,2
4	Вольногорское	1...2	4...6	10...15	15...18	18...20	20...22	21...25

Наибольшей термической стойкостью (1200 °С) обладает вольногорский песок, наименьшей — новоодошажский.

У вишневского песка при 600 °С растрескалось 8 % всех зерен, у вольногорского 15...18 %; при 800 °С соответственно 16 и 18...20 %, но при 1000 и 1200 °С количество растрескавшихся зерен вишневского песка превышает количество таких же зерен вольногорского. При наблюдении в микроскоп за зернами песков, нагреваемых выше 600 °С, было замечено, что края зерен вольногорского песка начинают оплавляться: они округляются и уменьшаются в размерах. Это наблюдение подтверждается опытом работы сталелитейных цехов ряда харьковских заводов.

Для проверки физико-механических свойств смесей были отобраны пять их видов: жидкостекольная, на крепеже 4ГУ, песчано-глинистая, с сульфитной бардой и огнеупорная для футеровки печей и ковшей. Соотношение компонентов в смесях выбиралось аналогично применяемым на заводе «Электротяжмаш» (г. Харьков, Украина). Все использовавшиеся в работе материалы отвечали требованиям действующих стандартов и технических условий.

Физико-механические свойства смесей с вольногорским, ореховским, вишневским и староверовским песками имели следующие осо-

бенности. Староверовский песок дает наибольшую осыпаемость песчано-глинистых смесей и наименьшую у смесей на крепителе 4ГУ. Газопроницаемость смесей с вишневым песком выше газопроницаемости смесей со всеми другими песками, а прочность несколько ниже. Осыпаемость имеет ту же тенденцию, что и в смесях со староверовским песком. Все свойства смесей на ореховском песке аналогичны свойствам смесей со староверовским песком. Газопроницаемость смесей с вольногорским песком ниже, чем с другими, а осыпаемость несколько меньше у смесей с другими проверенными песками.

Лабораторная проверка показала, что лучшим сочетанием свойств обладает вишневыи песок. Он имеет стабильные свойства, наиболее высокую концентрацию зерен на основных ситах, наиболее высокое содержание SiO_2 , максимальную газопроницаемость, высокую огнеупорность и наименьшее количество растрескавшихся зерен при температурах до 800 °С, обеспечивает получение высококачественных смесей. Второе место по качеству занимает ореховский песок.

Качество вишневого песка было также проверено в производственных условиях. Вишневыи кварцевый песок был опробован для набивной футеровки 5 т и 0,5 т кислых дуговых сталеплавильных емкостью 5 и 0,5 т, индукционных сталеплавильных печей емкостью 200 кг, стопорных ковшей емкостью 9 т и показал положительные результаты. Например, набивная футеровка на основе староверовского песка дуговой 5-тонной печи с цилиндрическим кожухом и вертикальными стенами выдержала 10 130 плавов, а после перехода на ее заправку смесью с вишневым песком выдержала еще 2403 плавки и продолжала работать.

В результате проведенных исследований вишневыи кварцевый песок внедрен в производство в литейных цехах Харьковского завода «Электротяжмаш».

При исследовании зернового состава кварцевых песков нами использовался современный метод ускоренного контроля гранулометрических параметров песков, разработанный Уральским государственным техническим университетом. Этот метод позволяет определить средний размер зерен и степень сосредоточенности зерновой структуры, его использование позволяет применять при определении зернового состава только 2 сита вместо 11 по стандартному методу. Имея данные по двум ситам (мелкому и крупному), остальные параметры находят с помощью интегральной кривой нормального распределения массы зерен, применяя формулу нормального распределения и номографическое устройство. Оценка качества кварцевых песков может также проводиться по их электрическим характеристикам и другими методами [64].

Существенное значение имеют также термические свойства кварцевых песков. С увеличением размера зерен теплопроводность кварцевых песков снижается. Это объясняется тем, что при увеличении размера зерен процентное содержание тяжелых минералов возрастает до такой степени, что оно перелешивает увеличение теплопроводности крупных зерен. Другими словами, снижение теплопроводности с увеличением размера зерен объясняется минералогическим составом песка. При повышении степени уплотнения контакт между зернами песка улучшается и теплопроводность смеси возрастает. При постоянном уплотнении снижение теплопроводности происходит с увеличением содержания глины в смеси. Отмечено также, что более мелкие пески имеют более высокий коэффициент теплоаккумуляции по сравнению с крупными песками.

Пески многих месторождений могут быть использованы для монолитной футеровки после их обогащения мокрым способом (отмычки глинистых минералов) или путем гидравлической классификации (разделение мелких и крупных фракций). Обогащение кварц-полевых песков может осуществляться путем флотации карбонатов, железосодержащих минералов и полевых шпатов. Для обогащения кварцевых песков находит применение также и виброакустический метод.

В последние годы создан так называемый центробежно-лопаточный способ обработки кварцевых песков [85], при котором происходит истирание поверхности зерен песков. При этом в 2–5 раз повышается механическая прочность смесей.

В России и СНГ имеется ряд перспективных месторождений песков, например, описанных в работе [86], которые могут быть использованы для набивной футеровки дуговых сталеплавильных печей.

4.4. СВЯЗУЮЩЕЕ ОГНЕУПОРНЫХ МАСС

Наряду с выбором зерновой основы смеси для формирования прочной футеровки, не менее существенным фактором является и выбор связующего. Стойкость набивных масс на основе кварцевого песка в большой мере зависит от связующего материала.

При выборе связующего исходили из того, что футеровка подвергается наибольшему ударным нагрузкам в моменты завалок, а поэтому должна обладать значительной прочностью в интервалах температур, при которых производится завалка шихты:

- после капитального ремонта печи;
- после холодной заправки набивной футеровки печи в выходной день;

— после очередной плавки при непрерывной работе печи в течение рабочей недели.

После капитального ремонта печи футеровка имеет температуру окружающей среды — 15...30 °С.

В целях определения интервала температур, в котором футеровка должна иметь высокую прочность во время первой заправки после воскресной холодной заправки печи, дважды был проведен следующий эксперимент. После холодной заправки 5-тонной дуговой сталеплавильной печи дважды измеряли температуру нового слоя у стыка со старой футеровкой хромель-копелевой термопарой (ХК) и один раз на поверхности слоя холодной заправки ртутным термометром. Схема расположения термопары приведена на рис. 43.

Результаты замеров показали, что температура нового слоя футеровки от момента холодной заправки до момента заправки находится в пределах 20...420 °С (рис. 44), новый слой нагревается за счет охлаждения футеровки. Учитывая, что ремонт и холодная заправка печей в литейных цехах обычно проводятся в воскресные дни, полученную область температур (20...420 °С) можно считать типичной.

Для определения интервала температур, в котором футеровка должна иметь высокую прочность в момент каждой следующей заправки при непрерывной работе печи в течение недели, измерили температуру по-

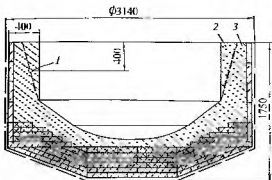


Рис. 43. Схема замера температуры набивной футеровки стен кислой дуговой сталеплавильной печи:

- 1 — место установки термопары ХК. 2 — слой холодной заправки.
3 — слой старой футеровки

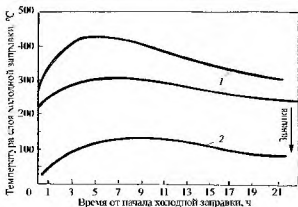


Рис. 44. Изменение температуры слоя холодной заправки набивной футеровки стен кислой дуговой сталеплавильной печи:

1 — у стыка со старой футеровкой; 2 — на поверхности слоя холодной заправки

верхности стен хромель-алюмелевой термопарой (ХА) перед завалкой 8 плавки. Результаты замеров показали, что температура стен в период завалки находится в пределах 790...1040 °С.

Для достижения высокой прочности футеровки в указанных интервалах температур в качестве связующего выбрали растворимое стекло, широко применяемое в литейном производстве в качестве связующего в формовочных и стержневых смесях.

Как известно, прочность смесей на основе кварцевого песка определяется когезией, адгезией и прочностью самих песчинок. Последняя, как правило, является наибольшей и не может быть причиной разрушения смесей, поэтому их прочность зависит от сил адгезии и когезии.

Работа, затрачиваемая на преодоление сил сцепления связующего с поверхностью песчинок значительно больше работы, затрачиваемой на преодоление сил межмолекулярного притяжения связующего:

$$A_{\text{адг}} \gg A_{\text{ког}}.$$

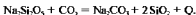
Поэтому прочность смесей на основе кварцевого песка зависит прежде всего от прочности пленки связующего, которая в свою очередь определяется величиной поверхностного натяжения на границе с воздухом ($A_{\text{адг}} = 2\sigma$, где σ — поверхностное натяжение пленки).

Зависимость прочности жидких пленок связующих материалов от величины поверхностного натяжения показана А.М. Ляссом [87], а зависимость прочности смесей от величины поверхностного натяжения пленок — П.П. Бергом [88].

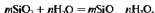
Исследованиями А.М. Лясса и Srinagech [89] установлено, что из всех известных связующих материалов жидкое стекло имеет наибольшее поверхностное натяжение, предел прочности жидкой пленки и работу когезии.

Жидкое стекло по сравнению с другими связующими материалами обладает и наибольшей адгезией к кварцу, особенно высока адгезия жидкого стекла к кварцу при очищенной поверхности зерен [90]. Экспериментальное определение предела прочности при отрыве пленок различных связующих материалов от кварца показало, что адгезия жидкого стекла выше, чем прочность самих кварцевых зерен, применявшихся при испытаниях. Важным свойством жидкого стекла является его способность к коагуляции, которая определяется электрокинетическим потенциалом системы.

Силикаты натрия, из которых в основном состоит натриевое жидкое стекло ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ и эвтектика, состоящая из $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ и свободного SiO_2), постоянно разлагаются с выделением свободного кремнезема (рис. 45). Этот процесс происходит особенно быстро в присутствии углекислоты, например:



Кремнезем, полученный в результате разложения силикатов натрия, а также свободный кремнезем, имеющийся в жидком стекле, способны присоединять к себе воду с образованием гидрата оксида кремния:



В обычных условиях при твердении стекла на воздухе процесс может протекать и за счет гидролиза силикатов, например:

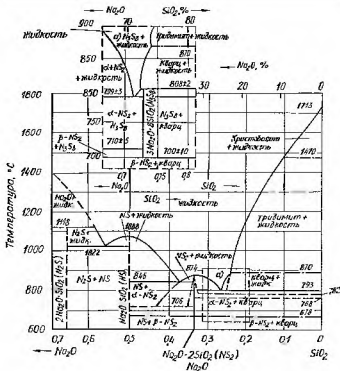


Гидраты оксида кремния выпадают из раствора в виде коллоидных частиц, которые затем коагулируют и переходят сначала в студнеобразный, а затем в твердый прочный гель кремниевой кислоты. Процесс образования и коагуляции геля происходит уже при комнатной температуре [91].

Силикагель является основным структурообразующим компонентом в продуктах твердения [92].

Упрочнение геля происходит за счет частичного испарения влаги.



Рис. 45. Диаграмма состояния $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$

Этот силикатгель располагается между зернами песка и цементирует их, придавая смеси значительную прочность (1,2...1,6 МПа).

Образование геля кремниевой кислоты происходит в две стадии. На первой стадии происходит образование коллоидных частичек $\text{Si}(\text{OH})_4$, а на второй — пространственной непрерывной структуры конденсирующихся частичек, сообщающей некоторую жесткость всей среде. Конденсация происходит до образования силоксанных связей $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, достаточных для того, чтобы зафиксировать положение частичек отно-

сительно друг друга, что, собственно, и приводит к образованию геля, процесс образования геля может быть представлен следующей схемой:

$\text{Si(OH)}_4 \rightarrow$ полимеризация \rightarrow коллоидные частицы (золь) \rightarrow агрегация \rightarrow открытая пространственная сетка частиц (гель) [93]. На основании современных положений можно считать, что гель кремниевой кислоты состоит из скелета, имеющего трехмерную сетку, образованную агрегированными сферическими частицами поликремниевой кислоты. Пространство между этими частицами заполнено интермицеллярной жидкостью. При образовании скелета происходит сцепление сферических частиц по местам их наименьшей гидрофильности за счет силоксановых связей.

По современным представлениям силикагель — это бесконечная сетка (гигантская макромолекула) из цепочек шаровидных непористых частиц аморфного кремнезема, подобного главному кварцу. Частицы связаны между собой силоксановыми Si-O-Si или водородными SiOH...OHSi связями, их поверхности полностью гидроксильрованы, т.е. каждая частица покрыта гидроксильными группами $=\text{Si-OH}$, сохранившимися при конденсации. Эти группы занимают все вершины тетраэдров SiO_2 , выходящих на поверхность скелета. Число OH-групп — примерно 8 на 1 мкм^2 поверхности частицы, площадь, занимаемая одной OH-группой — $\sim 12,5 \text{ нм}^2$. Высокая пористость непрерывной сетки частиц геля приводит к удерживанию в ней капиллярными силами и водородными связями большого объема воды — до 300 молей H_2O на моль SiO_2 .

В жидкостекольных смесях молярное соотношение $\text{H}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ составляет (в зависимости от модуля) 2,1...2,4. При этом получается по внешнему виду сухой, твердый, напряженный гель. При выделении воды, например при сушке или высухании, гель сжимается под действием сил поверхностного натяжения — сжатие тем сильнее, чем больше была начальная концентрация геля и выше поверхностное натяжение интермицеллярной жидкости. Обычно сжатие прекращается при молярном соотношении $\text{H}_2\text{O}:\text{SiO}_2 = (1,5...3) : 1$.

Прочность силикагеля зависит от размера глобул и их упаковки, обычно координационное число равно 5...6.

Как правило, чем выше концентрация SiO_2 в растворе (в реальных смесях она составляет 30...35 % массы жидкого силиката), тем мельче глобулы, плотнее упаковка и прочнее гель.

Можно считать, что прочность геля в первом приближении пропорциональна его удельной поверхности. Чем выше концентрация кремнезема, тем выше прочность силикагеля.

Размер глобул существенно зависит и от pH. Наиболее твердые и прочные гели получаются при низких его значениях, при высоких, на-

против, увеличивается размер глобул, и их упаковка становится более рыхлой. Однако возрастание pH свыше 8...9 дает резкое увеличение скорости гелеобразования.

На технологических свойствах сказывается усадка геля при высушивании или естественном обезвоживании, при которой гель проходит несколько стадий:

- образование трехмерной сетки, в которой вода удерживается капиллярными силами;
- упрочнение связей между соседними частицами в точках контакта;
- усадка трехмерной кремнеземной сетки по мере испарения воды;
- развитие напряжений в кремнеземной сетке в процессе объемной усадки;
- появление трещин в высушенном геле кремнезема и разрушение его на отдельные кусочки.

Во многих попытках дать количественную оценку прочности систем на основе силикагеля преобладают чисто геометрические соображения, в которых определяющими факторами являются размеры глобул, их упаковка или некая ее функция (для сложных видов упаковок).

Современные представления о прочности силикагеля более достоверно объясняют влияние на прочность модуля и плотности жидкого стекла. Спекание глобул геля активно развивается при 700...800 °С под влиянием примеси Na_2CO_3 с возможным образованием стекловидного слоя силиката на поверхности глобул. При этом удельная поверхность $S_{уд}$ уменьшается в 1,5–2 раза, объемная усадка составляет ~20%. Температура начала спекания и степень последнего, которую можно оценивать по изменению $S_{уд}$, зависят от концентрации ионов Na или другого минерализатора, размера глобул, плотности упаковки, т.е. от тех же факторов, что и начальная прочность. Чем выше исходная прочность смеси, тем больше степень спекания и выше $\sigma_{ос}$. В системе всегда присутствует некоторая доля расплавленного силиката, но его роль не является определяющей.

При нагреве спекшегося силикагеля начинается процесс расклевывания. Его катализируют примеси щелочных металлов. Структура силикагеля разрушается, а аморфный кремнезем кристаллизуется при 800...1100 °С со значительным падением конечной прочности. Центрами кристаллизации могут быть ионы щелочных и щелочноземельных металлов. Остаточная прочность зависит от исходной прочности, что находит объяснение в свете глобулярной теории, которая дает понимание не только физико-химических условий формирования исходной прочности, но и причин «наследственности» прочности после цикла высокотемпературный нагрев—охлаждение.

По своей природе жидкое стекло является дисфильным коллоидным раствором с гидратированными мономер-катионами натрия и полимерными кремнекислородными анионами. Современные представления об образовании полимерных кремнекислородных (силикатных) анионов в жидком стекле основываются на предположении о мета-форме исходного мономерного аниона



В результате гидролиза мета-силиката натрия в щелочной среде указанный ион приобретает активный гидроксил



Активные гидроксилы обеспечивают конденсацию силикатных мономерных анионов с образованием иона-димера



Р. Айлер отмечает, что особую роль на самой ранней стадии укрупнения мономерных частиц играет энергетически выгодное образование силикатных циклических тетрамер-ионов $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_6^{2-}$ и $\text{Si}_4\text{O}_4(\text{OH})_4^{2-}$ [95]. Последние являются «строительными кирпичами» для образования иона-октамера кубической структуры $(\text{HSiO}_{1,5})_8$, в котором атомы Si располагаются по углам куба, причем каждый из них через атомы O связывается с тремя другими атомами Si и, кроме того, имеет одну способную к ионизации SiOH-группу, что приводит к образованию октамерного полииона $(\text{Si}_4\text{O}_{20})^8$.

Такая структурная единица служит зародышем для образования коллоидных частиц. Она наращивается за счет конденсирующихся на ее поверхности ионов-мономеров и в конце концов становится частью кремнезема с сердцевинной из молекулярной SiO_2 и с поверхностью, несущей отрицательный заряд благодаря группам SiOH. Эти сферические частицы при определенных условиях способны связываться друг с другом (благодаря силоксановым связям), при этом соседние частицы фиксируются друг относительно друга, что приводит в итоге к образованию высокопористой переплетенной объемной сетки разветвленных цепочек.

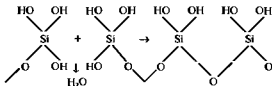
Таким образом, фактически признается существование трех стадий структурообразования: 1) полимеризация мономера с образованием на базе иона-октамера сферических коллоидных частиц; 2) рост сферических коллоидных частиц; 3) связывание упомянутых частиц сначала в разветвленные цепочки, затем в сетки, распространяющиеся на всю жидкую среду и уплотняющие ее в гель.

Ионы Na в жидком стекле могут быть свободными (NaOH) и связанными в силанольных группах кислого характера. При кондуктометрическом титровании в первую очередь будет нейтрализована свободная (избыточная) NaOH и лишь затем связанная, находящаяся в равновесии с гидрогелем SiO_2 .

Современные физические методы исследований позволяют анализировать молекулярную структуру жидкого стекла и получать количественные характеристики степени полимеризации силикатных анионов. Так, метод ЯРМ-спектроскопии (Si^{29}) позволяет идентифицировать на спектрограммах силанольные группы различного строения по присущим им частотам колебаний группировок атомов. Для оценки молекулярно-массового распределения кремнекислородных олигомеров используют гель-хроматографический и химический анализы [96]. В тех же целях может применяться и метод бумажной хроматографии.

Вода, содержащаяся в жидком стекле, разделяется на химически связанную с силикатом (гидратная влага) и на воду, являющуюся собственно растворителем.

Гель кремниевой кислоты может связывать большое количество воды — до 330 молекул воды на каждую молекулу SiO_2 . Часть воды входит в состав геля — она расположена на поверхности агрегатов, образующих скелет геля. Это «структурная вода», которая показана на схеме:



Однако основная часть влаги иммобилизуется и удерживается гелем механически. П.А. Ребиндер отмечает, что такая влага может быть вытеснена сколь угодно малыми усилиями, лишь бы они действовали в течение достаточного времени.

Исследованиями А.М. Ляеса установлено, что упрочнение смесей с жидким стеклом непосредственно зависит от степени удаления из них влаги, независимо от метода, применяемого для этой цели. Этим и объясняется значительное упрочнение масс, содержащих жидкое стекло, при их тепловой обработке: вследствие испарения воды значительно возрастают силы молекулярного взаимодействия при сближении молекул. Повышение температуры значительно ускоряет коагуляцию раствора. При нагреве раствора силиката натрия происходит энергич-

ное движение частиц диоксида натрия, в результате чего они вступают в контакт и укрупняются. Прочность смеси при нагреве непосредственно зависит от остаточной влажности смеси: чем ниже остаточная влажность, тем выше прочность образцов.

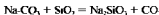
Кристаллизационная влага не удаляется из жидкостекольной смеси при температуре испарения воды. Основное выделение влаги имеет место при температуре от 50 до 200...250 °С. Практически полная потеря влаги жидким стеклом отмечается при 320...370 °С. Основное упрочнение смесей происходит при нагреве до 200...250 °С и основная потеря влаги происходит в этом интервале температур, причем прочность смесей в сухом состоянии тем больше, чем больше содержится в них жидкого стекла.

Структура и свойства продуктов, полученных в результате затвердевания жидкого стекла при нагреве, принципиально отличаются от структуры и свойств продуктов, полученных при обычных температурах в результате воздействия CO_2 . В первом случае прочность достигается за счет стекловидной пленки силиката натрия, а во втором — за счет геля кремниевой кислоты. Прочность склеивания зерен стекловидной пленкой силиката натрия во много раз больше, чем прочность склеивания гелем кремниевой кислоты. Образцы из смеси кварцевого песка с жидким стеклом после нагрева до 200 °С и выдержки при этой температуре имели предел прочности при сжатии как в нагретом, так и в охлажденном состоянии больше 10 МПа.

При повышении температуры от 400 до ~600...700 °С прочность жидкостекольной смеси падает вследствие различия коэффициентов термического расширения кварцевого песка и твердой жидкостекольной пленки. Смесей, предварительно нагретые до температуры 400...700 °С, при охлаждении легко разрушаются. Однако такая смена температур в футеровке сталеплавильных печей практически невозможна.

При нагревании до 800 °С смеси кварцита и диоксида натрия с жидким стеклом ее предел прочности на сжатие снижался, но строительная прочность оставалась высокой.

После полной потери влаги уже при температурах 400...500 °С пленка жидкого стекла начинает размягчаться, а при температурах более 700 °С появляется жидкая фаза. Эвтектика системы диоксида натрия—диоксида кремния имеет температуру плавления 793 °С. При дальнейшем повышении температуры происходит процесс спекания смеси, которому соответствует химическая реакция:



Сплавы натриевых силикатов при высоких температурах обладают способностью растворять значительные количества SiO_2 . Спекание смеси при высоких температурах приводит к ее упрочнению. Д.А. Тайлер

отмечает, что при длительном нахождении жидкостекольной смеси при температурах более 800 °С зерна кварца спекаются расплавленным силикатом и смесь упрочняется. Спекание смесей и их прочность зависят от проникающей способности образующегося силикатного расплава, связанной с его вязкостью. Вязкость силикатных расплавов определяется их химическим составом. Отдельные оксиды, входящие в силикатный расплав, изменяют как абсолютную величину вязкости, так и характер этого изменения в зависимости от температуры.

Оксиды Na снижают вязкость силикатов. Жидкостекольные смеси, нагретые до температур полного расплавления пленки жидкого стекла и более высоких температур, после охлаждения обладают значительной прочностью на сжатие, достигающей до 13...15 МПа. При охлаждении жидкая фаза затвердевает, превращаясь вместе с зернами песка в спекшийся, трудно разрушимый конгломерат. Такой прочностью объясняется, например, затрудненная выбивка литейных форм и стержней, изготовленных из жидкостекольных смесей. Поэтому литейщики вынуждены принимать специальные меры для улучшения выбиваемости этих смесей.

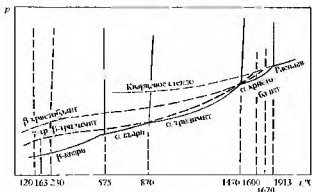
Свойства огнеупорных материалов при высоких температурах в большой степени зависят от их минералогического состава. При одном и том же химическом составе, но разном минералогическом, свойства могут быть различными.

Как известно, кремнезем обладает следующими модификациями α - и β -кварц; α -, β - и γ -тридимит; α - и β -кристобалит и кремнеземное стекло.

Преобразования кремнезема при различных температурах изображены на известной диаграмме Феннера (рис. 46). Каждой модификации SiO_2 соответствует свое давление ее паров; стабильной в определенном интервале температур является модификация с наименьшим давлением пара.

Основной структурной единицей кристаллических модификаций SiO_2 является кремнекислородный тетраэдр $[\text{SiO}_4]^{4-}$. В этом тетраэдре ион Si^{4+} всегда находится в четырехном окружении ионов O^{2-} , расположенных в вершинах тетраэдра, в центре которого находится Si^{4+} . Тетраэдры связаны между собой вершинами с общими кислородными атомами, т.е. связями $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, в результате чего образуется пространственная сетка тетраэдров. У разных модификаций SiO_2 взаимное расположение тетраэдров различное, что вызывает различия в прочности модификаций SiO_2 .

Наибольшей прочностью обладает решетка тридимита, поэтому образование тридимита связано со значительным упрочнением кремнеземистой массы. По данным А.А. Елтышевой и И.С. Кайнарского прочность кремнеземистой массы при температуре 1000...1300 °С рез-

Рис. 46. Диаграмма состояния SiO₂

ко растет с максимумом при 1300 °С, что вызывается тридимитизацией, приводящей к сращиванию кварцевых зерен. Б.Я. Пинос также указывает, что большая прочность при высоких температурах кремнеземистого огнеупора — динаса — обуславливается образованием в динасе кристаллического сростка из кристаллов тридимита. Эту точку зрения высказывал еще В.Е. Грум-Гржимайло. Тридимит по сравнению с другими модификациями кремнезема обладает наименьшим расширением и наилучшей термостойкостью.

Однако образование тридимита в температурной области его стабильности в чистом кварце идет чрезвычайно медленно. И.С. Кайнарский указывает, что нагревание кварца даже в течение нескольких тысяч часов не приводит к образованию тридимита [97]. Существует мнение, что из чистого кремнезема при атмосферном давлении тридимит вообще не может быть получен.

Для образования тридимита при 870...1470 °С необходимо присутствие минерализаторов. Схема превращения кварца в тридимит следующая



Как видно из этой схемы, образование тридимита идет через промежуточную стадию — образование кристобалита. Кристаллы тридимита зарождаются в силикатном расплаве кристобалита с минерализатором.

Многие исследователи считают, что наиболее сильными минерализаторами являются различные соединения щелочных металлов. R. Суртес построил модификационную фазовую диаграмму систем SiO_2 — K_2O , SiO_2 — Na_2O и SiO_2 — Li_2O .

Наиболее активными минерализаторами для ускорения перерождения кремнезема являются карбонаты лития, натрия и калия и кремнефтористый натрий; добавки 1 % щелочи достаточно, чтобы при 1300 °С кремнезем полностью перешел в течение 1 часа. В Японии исследовано влияние 18 добавок на перерождение кварца. Эффективными с точки зрения перехода в тридимит оказались 4 минерализатора: метасиликат натрия, оксид Na, смесь оксидов Na, Fe и Ca, смесь оксидов Na и Fe.

Катионы щелочных металлов, внедряясь в решетку кварца, деформируют ее и постепенно превращают в решетку кристобалита. Проникновение катионов происходит через кислородные пустоты, имеющие положительный избыточный заряд. При дальнейшем нагревании кремнезем с добавками образует равновесный расплав, в котором растворяется метакристобалит. Степень тридимитизирующего действия равновесного расплава зависит от содержания в ней кремнезема и от отношения O:Si, характеризующего строение ближнего порядка (структуру) расплава. Соединения щелочных металлов образуют с кремнеземом также равновесные расплавы, ближний порядок которых содержит достаточное количество анионных комплексов из слоев кремнекислородных тетраэдров, т.е. близок к структурным элементам кристаллической решетки тридимита и поэтому его кристаллизация протекает весьма интенсивно.

Непрерывное образование тридимита и рост его кристаллов обеспечиваются непрерывным растворением метастабильного кристобалита. Образование тридимита в кремнеземистых массах, содержащих жидкое стекло, и, как следствие, высокая прочность этих масс при температурах 870...1470 °С подтверждаются и практически данными.

Тонкоизмельченный кварцевый песчаник в присутствии 4 % растворимого стекла при температурах 890...900 °С полностью превращался в кристобалит, а при температурах 950...1000 °С — в тридимит.

Образование тридимита в кремнеземистой массе, содержащей жидкое стекло, в условиях службы стен дуговых сталеплавильных печей, подтверждается следующим экспериментом. Из содержащей жидкое стекло набивной футеровки стен 5-тонной кислой дуговой печи, рабо-

тающей на Харьковском заводе «Электротяжмаш», был отобран образец на расстоянии примерно 100...150 мм от рабочего пространства печи и подвергнут петрографическому анализу, который показал, что футеровка в этой зоне содержит значительное количество тридимита 35...40 %, а в подине до 70 % тридимита.

Таким образом, применение жидкого стекла в качестве связующего в кремнеземистой смеси для футеровки стен дуговых сталеплавильных печей создает предпосылки для обеспечения высокой прочности футеровки во всех требуемых интервалах температур.

Следует отметить, что жидкое стекло целесообразно использовать в качестве связующего для футеровочных смесей еще и из тех соображений, что оно, помимо Na_2O и K_2O , содержит значительное количество SiO_2 , и поэтому небольшие добавки жидкого стекла к кварцевому песку лишь незначительно снижают его огнеупорность.

На свойства жидкостекольных смесей большое влияние оказывает модуль жидкого стекла (M). Жидкое стекло может иметь модуль в пределах 1,5...4,2. При модуле больше 3 жидкое стекло нестабильно, распадается под действием CO_2 воздуха и смесь с таким жидким стеклом быстро становится непластичной. При модуле меньше 2 свободного кремнезема в жидком стекле нет. Поэтому практическое применение находят жидкое стекло с модулем 2,1...3,0.

Чем больше модуль жидкого стекла, тем больше содержится в нем свободного кремнезема, а следовательно, тем быстрее смесь затвердевает на воздухе. Поэтому высокомодульные смеси по сравнению со смесями с низким модулем имеют в сыром состоянии большую прочность при меньшем времени перемешивания. Увеличение модуля на 0,1 приводит к повышению прочности на сжатие в сыром состоянии смеси кварцевого песка с жидким стеклом на 0,07 МПа. Жидкое стекло с высоким модулем по сравнению с жидким стеклом с низким модулем имеет большее содержание SiO_2 и меньшее Na_2O и поэтому в меньшей степени снижает огнеупорность кварцевого песка.

Величина M оказывает прямое влияние на степень полимеризации силикатных анионов, последняя тем выше, чем выше M . Степень полимеризации зависит также от содержания в жидком стекле свободной щелочи и от количества воды, приходящегося на один анион $[\text{SiO}_3]^-$.

В области низких ($M \leq 2$) степень полимеризации силикатных анионов близка к нулю: в умеренно сильных растворах дисиликата натрия присутствуют только простые дисиликатные анионы, что подтверждается их молекулярной массой (140...150), близкой к расчетной (136); жидкое стекло с $M \leq 2$ является истинным, а не коллоидным раствором. За исключением особых случаев жидкое стекло, имеющее $M \leq 2$, в практике литейного производства не используется.

В жидком стекле с $M \geq 2$, применяемом в литейном производстве силикатные анионы образуют полимерные цепочки: при $M \geq 2,5$ слоистая (линейная или двухмерная) полимеризация уступает место трехмерной, косвенным свидетельством чему служит резкое возрастание вязкости жидкого стекла. Таким образом, строение жидкого стекла с $M = 2; 2,5$ и 3 различно, поэтому неравноценна и способность к химическому отверждению.

Влияние M на вязкость выражено весьма сильно, что видно из сравнения двух образцов жидкого стекла с примерно одинаковым водосодержанием, но с разными M :

плотность, г/см ³	1,445	1,449
водосодержание, %	59,1	58,78
модуль M	2,5	3
вязкость, МПа·с	200	2000

Определение модуля может производиться современным ускоренным методом — методом титрования.

Исходя из влияния модуля на прочность смесей в сыром состоянии и огнеупорности песка для набивной футеровки выбрано жидкое стекло с модулем 2,8...2,9. Химический состав силикат-глыбы находится в следующих пределах, % мас.: 72,4...73,32 SiO₂; 26,0...26,36 Na₂O; 0,19...0,22 Al₂O₃; 0,03...0,05 Fe₂O₃; 0,1...0,24 CaO; 0,18...0,20 MgO; 0,08...0,17 SO_x.

Быстрое твердение огнеупорных смесей с высокомодульным жидким стеклом обусловлено присутствием молекул SiO₂, не связанных в кремниевую кислоту, которые могут выступать в роли центров коагуляции геля, обеспечивая, кроме того, повышенную вязкость раствора.

К основным характеристикам жидкого стекла помимо упомянутого силикатного M относятся водосодержание, содержание сухого вещества, плотность, вязкость, содержание примесей. В некоторых случаях используют дополнительные характеристики: порог коагуляции или содержание NaO_{своб}, электропроводность, поверхностное натяжение, время гелеобразования связующего при присутствии заданного отвердителя и др. Известны работы по модифицированию жидкого стекла кремнеземом [98].

Равномерное распределение жидкого стекла после перемешивания с песком обеспечивается при вязкости $\eta \leq 100$ Па·с (20 °С); в этом случае толщина пленок связующего вокруг кварцевых зерен составляет 1...2,5 мкм.

Основываясь на многолетнем опыте применения жидкого стекла в качестве связующего для формовочных смесей, плотность жидкого стекла выбрана в пределах 1,48...1,52 г/см³.

Силикат-глыба в зависимости от применяемых исходных материалов разделяется на содовую, содово-сульфатную и сульфатную.

Для футеровочных смесей выбрано содовое жидкое стекло, как содержащее наименьшее количество примесей и дающее наибольшую прочность смесей в сухом состоянии.

Таким образом, в качестве связующего смеси для набивной футеровки кислых дуговых сталеплавильных печей выбрано натриевое содовое растворимое стекло с модулем 2,8...2,9.

Проведен ряд исследований, в которых связующие свойства жидкого стекла характеризуются новым показателем — порогом коагуляции, связанным с электрической проводимостью жидкого стекла и определяемым содержанием оксида натрия [99].

Прочность и долговечность масс на основе жидкого стекла можно увеличить на 20...25 % путем магнитной обработки раствора силиката натрия [100].

Прочность жидкостекольных смесей зависит от внутренних напряжений $\sigma_{\text{вн}}$, возникающих в связующих при их отверждении из-за усадки [101].

С утоньшением пленок связующего внутренние напряжения растут, а не уменьшаются. Толщина пленок уменьшается, когда снижается содержание связующего в составе смеси. Внутренние напряжения в этом случае должны возрастать. Необходимо уточнить минимальное содержание связующего, при котором могут быть получены смеси с оптимальными технологическими свойствами.

4.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОГНЕУПОРНЫХ МАСС

В массах для футеровки сталеплавильных печей необходимо регламентировать следующие технологические свойства: прочность на сжатие в сыром состоянии, пластичность, долговечность, под которой в данном случае подразумевается сохранение пластичности при хранении массы в течение определенного отрезка времени.

Масса должна иметь прочность в сыром состоянии, обеспечивающую сохранение футеровки в процессе холодной заправки и капитального ремонта печи (чтобы футеровка не разрушалась под собственной массой и при извлечении шаблона в процессе холодной заправки). Многолетний опыт литейного производства по изготовлению крупных форм говорит о том, что прочность смесей на сжатие в сыром состоянии должна быть не менее 0,02...0,025 МПа.

Прочность масс в сыром состоянии при сжатии определяется с помощью прибора модели 04116Б, выпускаемого Усманским заводом литейного оборудования (г. Усмань Липецкой области) в соответствии с

ГОСТ 23409.7-78 «Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Методы определения прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе», а образцы (рис. 47) готовят по ГОСТ 23409.6-78 «Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения газопроницаемости» из влажной смеси в неразъемной металлической гильзе (рис. 48), образцы уплотняют с помощью лабораторного копра.

Масса для футеровки сталеплавильных печей должна обладать высокой пластичностью, так как внутренняя поверхность футеровки после недельной работы неровная, с большим количеством выступов, впадин и переходов (рис. 49), а после холодной заправки она должна иметь требуемые размеры и правильную геометрическую форму. Огнеупорную массу можно считать достаточно пластичной, если величина ее пластичности не ниже величины пластичности формовочных облицовочных смесей, применяемых для изготовления форм фасонного стального литья, которая обычно находится в пределах 0,028...0,045 Дж. Определение пластичности производится на специальном приборе типа прибора Земятченского для определения пластичности глин (рис. 50, 51).

Под долговечностью массы понимают сохранение пластичности при ее хранении в течение определенного отрезка времени.

Долговечность масс, содержащих жидкое стекло, определяется в первую очередь скоростью разложения силиката натрия углекислым газом воздуха и образования геля кремниевой кислоты. Чем больше эта скорость, тем быстрее масса теряет пластичность. С другой стороны, чем полнее произошло разложение силиката натрия при комнатной температуре, тем ниже окажется прочность массы при высоких температурах, достигаемая за счет стекловидной пленки силиката натрия.

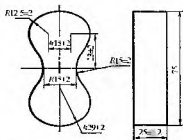
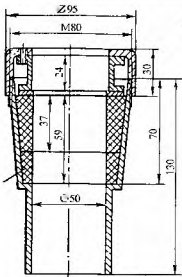


Рис. 47. Образец для определения прочности огнеупорных масс



— Рис. 48. Гильза для определения газопрооницаемости



Рис. 49. Футеровка стен кислой 5-тонной дуговой печи перед холодной заправкой

Долговечность массы определяется следующим образом. Исследуемую массу определенного объема хранят в открытом помещении и в течение четырех суток через определенные промежутки времени замеряют толщину затвердевшей корочки, которая и служит характеристикой долговечности (затвердевшая корочка легко отделяется от мягких слоев массы). Масса считается удовлетворительного качества по долговечности, если толщина корочки через 4 суток хранения не превышает 60 мм.

На технологические свойства массы, содержащих жидкое стекло, особенно на прочность в сыром состоянии, значительное влияние оказывает продолжительность перемешивания в бегунах. Находящийся в жидком стекле свободный кремнезем уже при изготовлении массы взаимодействует с водой независимо от процесса разложения силиката натрия, вызывая затвердевание массы. Перемешивание массы в бегунах облегчает взаимодействие свободного кремнезема с водой, что особенно сказывается при использовании жидкого стекла высокого модуля. Одновременно по мере перемешивания в бегунах из массы испаряется часть содержащейся в ней влаги, что в свою очередь повышает вязкость дисперсной системы.

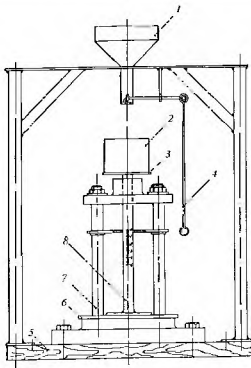


Рис. 50. Прибор для определения пластичности огнеупорных масс:
 1 — воронка; 2 — бачок; 3 — основание; 4 — рычаг; 5, 6 — основание;
 7 — стойка, 8 — шток



Рис. 51. Приспособление для определения пластичности масс

Все эти факторы приводят к тому, что чем длительнее перемешивание, тем до определенного предела больше прочность массы в сыром состоянии. При чрезмерной длительности перемешивания масса по внешнему виду становится сухой, теряет пластичность, последующее перемешивание приводит к механическому дроблению, отделению зерен друг от друга и выходит из бегунов рассыпчатой.

Зависимость прочности на сжатие в сыром состоянии от времени перемешивания в лабораторных бегунах (объем замеса $0,00322 \text{ м}^3$) массы, состоящей из 93 % среднего кварцевого песка и 7 % жидкого стекла, показана на рис. 52. При оптимальном времени перемешивания (с точки зрения достижения требуемой прочности в сыром состоянии) указанная масса обладает явно недостаточной пластичностью ($0,0127...0,0284 \text{ Дж}$). Долговечность ее также нельзя признать удовлетворительной, так как после четырех суток хранения она имеет затвердевшую корочку толщиной 73...92 мм. Оба эти недостатка, очевидно, объясняются быстрым упрочнением и затвердением массы при ее изготовлении и хранении. Отсюда возникает необходимость в добавках, замедляющих этот процесс.

При затвердевании жидкого стекла на воздухе процесс протекает не только за счет гидратации свободного кремнезема, но и за счет гидролиза силикатов с образованием едкого натра. Из этого следует, что замедление реакции может быть достигнуто вводом в массу едкого натра. Целесообразность ввода в смесь песка с жидким стеклом едкого натра подтверждается еще и тем, что в составе жидкого стекла, особенно при высоком модуле, содержится большое количество свободного кремнезема. При добавке едкого натра он переходит в активное состояние, происходит реакция:



Связанный кремнезем становится дополнительным источником прочности при тепловой обработке массы. Чем больше модуль жидко-

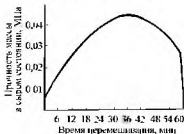


Рис. 52. Зависимость прочности на сжатие в сыром состоянии массы (93 % песка, 7 % жидкого стекла) от времени перемешивания ее в бегунах

го стекла, тем эффективнее добавка едкого натра, при этом прочность массы в сухом состоянии возрастает в несколько раз.

Наиболее целесообразно добавлять в массу едкий натр из расчета перехода модуля жидкого стекла в условный модуль 2,6. Расчет количества едкого натра производится по формуле:

$$x = \frac{(R-62/A \cdot 60) - C}{62} \cdot 800,$$

где x — искомое количество едкого натра; R — количество кремнезема, содержащегося в исходном жидком стекле, %; C — количество оксида натрия, содержащегося в исходном жидком стекле, %; A — требуемый модуль жидкого стекла.

Едкий натр обычно вводят в виде 10...12 %-ного раствора (плотность 1,11...1,13 г/см³).

Масса, содержащая 91 % среднего кварцевого песка, 7 % жидкого стекла и 2 % едкого натра, обладает значительно большей долговечностью, но имеет исключительно низкую прочность на сжатие в сыром состоянии (рис. 53) и низкую пластичность (рис. 54). Попытки улучшить эти показатели путем увеличения длительности перемешивания не дают положительных результатов.



Рис. 53. Влияние времени перемешивания на прочность в сыром состоянии массы, состоящей из 91 % песка, 7 % жидкого стекла и 2 % едкого натра (цифры — числоисследовательских замесов)

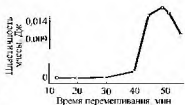


Рис. 54. Влияние длительности перемешивания на пластичность массы

Поэтому для обеспечения требуемой прочности в сыром состоянии и пластичности в огнеупорную массу для футеровки дуговых сталеплавильных печей необходимо вводить огнеупорную глину, которая при взаимодействии с водой создает связующую оболочку, обволакивающую зерна песка. Чем больше в массе глины, тем больше толщина связующей оболочки и тем больше прочность массы, связанная с ионным обменом между глиной и другими компонентами массы.

Упрочняющее действие увлажненной глины на песок основано на способности глин, имеющих исключительно разгнутую поверхность твердых чешуи, к ионному обмену, заключающемуся в том, что при взаимодействии глин с водным раствором какого-либо вещества определенная часть ионов раствора поглощается глинистыми частицами, а вместо поглощенных в раствор в эквивалентных количествах переходят ионы, ранее принадлежавшие глинистым частицам. В глинах совершается главным образом катионный обмен. При взаимодействии глины с водой вследствие ослабления притяжения между ее поверхностными ионами происходит растворение глины. В этих условиях твердые частицы глины всегда оказываются заряженными отрицательно. В силу этого частица окружается слоем катионов, которые вместе с отрицательно заряженной поверхностью частиц образуют так называемый двойной электрический слой.

Ионный обмен в значительной мере определяет клейкость глин. С увеличением толщины пленки связанной воды создаются условия, при которых вода с одинаковой силой взаимодействует как с глинистыми частицами, так и с поверхностью других веществ. Иначе говоря, клейкость глин обуславливается силами молекулярного взаимодействия воды как с глинистыми частицами, так и молекулами зерен песка. Количество ориентированных молекул воды зависит от количества заряженных точек на поверхностях пластинок глины и зерен песка. Количество этих точек на поверхности пластинок глины значительно превышает количество точек на поверхности зерен, поэтому количество глины определяет количество этих точек в смеси.

Наличие в песчано-глинистых смесях щелочей и щелочных солей слабых кислот (например, растворимого стекла) способствует снижению вязкости глинистой суспензии и более равномерному ее распределению между зернами песка, что вызывает увеличение прочности. При наличии в песчано-глинистых смесях растворимого стекла и раствора едкого натра создается условия для замещения в глине ионов кальция ионами натрия, что также повышает прочность смеси, так как глины, содержащие ионы натрия, обладают большей связующей способностью. Поэтому ввод глины в смеси на основе кварцевого песка, содержащие жидкое стекло, способствует повышению прочности этих смесей в сыром состоянии.

Многие исследователи, изучавшие свойства жидкостекольных смесей, применяемых в литейном производстве, отмечают, что с увеличением содержания огнеупорной глины прочность смесей в сыром состоянии неуклонно повышается.

Глина в присутствии некоторого количества влаги очень пластична и увеличение ее содержания приводит к повышению пластичности смеси песка с жидким стеклом.

Присутствие раствора NaOH положительно сказывается на глине и, соответственно, на долговечности смеси, так как NaOH повышает кооперативность глины, в результате чего глина лучше удерживает влагу и сохраняет пластичность смеси в течение длительного времени (рис. 55).

Ввод в смесь для футеровки сталеплавильных печей огнеупорной глины целесообразен и с точки зрения поведения этой смеси при высоких температурах.

Глина способствует спекаемости смеси при ее нагреве. В.А. Брон приводит следующие данные: смесь кварцита с 5 % глины имела после обжига объемную пористость 22,7 %, а с 30 % глины – 14,9 %. Такое влияние глины, очевидно, объясняется известным положением теории спекания о влиянии на процесс спекания общей контактной поверхности частиц, возрастающей с дисперсностью частиц. Положительное влияние глины на спекаемость смеси, очевидно, связано также с тем, что песок при нагревании расширяется, а глина дает усадку.

Усадкой глины при нагреве, очевидно, объясняется и ее влияние на термостойкость: по данным И.М. Кайнарского, чем меньше содержание Al_2O_3 в кремнеземистой массе, тем хуже ее термостойкость.

По данным Ю.П. Васина и П.В. Черногорова, изучавших термические напряжения в песчано-глинистых смесях, полное исчезновение термических напряжений в этих смесях наступает уже при температуре 700...800 °С, что, по мнению авторов, объясняется пластической деформацией смеси и сокращением объема глины в результате удаления кристаллизационной влаги. Благодаря объемной усадке глина умень-

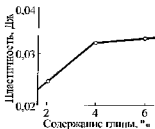


Рис. 55. Влияние содержания глины на пластичность масс

шает термическое расширение песчано-глинистых смесей, что положительно сказывается на их прочности при высоких температурах. Размягчение песчано-глинистой смеси, содержащей жидкое стекло, наступает при высоких температурах тем раньше и тем в большей степени, чем меньше глины содержит смесь.

Как известно, по минералогическому составу глины делятся на монтмориллонитовые, каолинитовые и гидрослюда. При выборе огнеупорной глины для огнеупорных смесей исходили из нецелесообразности применения в смесях для футеровки глин монтмориллонитового происхождения из-за их повышенной гигроскопичности. Гидрослюда и глины каолинитового происхождения поглощают воду в основном за счет адсорбции ее поверхностью, так как расстояние между слоями кристаллической решетки в этих глинах около 2Å при молекулярном радиусе воды — 1,45Å. Монтмориллонитовые же глины поглощают воду не только за счет адсорбции поверхностью, но и за счет проникновения воды в глубь кристаллической решетки, так как в этих глинах расстояние между слоями кристаллической решетки около 20Å. Примером огнеупорной глины для футеровочных масс может быть огнеупорная глина Часов-Ярского месторождения. Основным породообразующим минералом в Часов-Ярской глине является монотермит



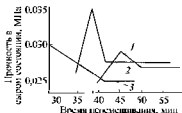
представляющий собой переходный минерал от каолинита к гидрослюдам. Часов-Ярская глина содержит, %: 59,7 SiO₂; 27,44 Al₂O₃; 1,3 TiO₂; 1,4 Fe₂O₃; 1,01 CaO + MgO; 2,67 K₂O + Na₂O; 7,41 п.п.п. Коллоидальность Часов-Ярской глины — 19 %, огнеупорность — 1660°C, рН8. Ее гранулометрический состав: фракции 60...20 мкм — 5 %; 20...10 мкм — 17,5 %; 10...5 мкм — 8,4 %; 5...2 мкм — 15,7 %; < 2 мкм — 51,4 %. Гигроскопичность Часов-Ярской глины (увеличение массы в граммах на 100 г сухого вещества) — 0,725. Исследованы также глины и других месторождений: Селеро-Положского, Криушанского, Суворовского, Ульяновского, Передового (например [102]). Свойства огнеупорной глины могут быть оценены ультразвуковым методом. Связующая способность глин может быть повышена методом химической активации.

Для определения количества вводимой в смесь огнеупорной глины необходимой для улучшения технологических свойств, в лабораторных условиях приготовили 43 замеса смесей, содержащих 7 % жидкого стекла, 2 % едкого натра, с различным содержанием глины и проверили технологические свойства.

На рис. 56 приведена полученная зависимость прочности смеси на сжатие в сыром состоянии от длительности перемешивания при различном содержании глины. Из этих данных видно, что в присутствии

Рис. 56. Зависимость прочности массы в сыром состоянии от времени перемешивания ее в бегунах при различном содержании огнеупорной глины:

1 — 2 %, 2 — 4 %; 3 — 6 %



глины при увеличении длительности перемешивания прочность смеси на сжатие вначале увеличивалась, достигала некоторого максимума, а затем снижалась до определенного значения, которое в рассматриваемых пределах длительности перемешивания не изменялось. Чем больше содержание глины в смеси, тем при меньшей длительности перемешивания достигали максимума прочности в сыром состоянии. Для получения необходимого в данном случае нижнего предела прочности смеси 0,025 МПа при 2% глины потребовалось 45 мин перемешивания, при 4% глины 38 мин, а при 6% глины менее 30 мин.

Такое влияние огнеупорной глины на положение максимума прочности при перемешивании смеси в бегунах, по-видимому, объясняется следующим. Очевидно, максимальная прочность жидкостекольной смеси при ее перемешивании может быть достигнута только тогда, когда вся содержащаяся в смеси влага окажется в связанном состоянии. Если смесь содержит огнеупорную глину, то, наряду с взаимодействием воды с содержащимся в жидком стекле свободным кремнеземом, часть влаги удерживается огнеупорной глиной. Поэтому чем больше глины содержит смесь, тем быстрее будет связана содержащаяся в смеси влага, и следовательно, тем при меньшей длительности перемешивания будет достигнута максимальная прочность.

На рис. 55 показана полученная зависимость пластичности смеси от содержания в ней глины (при постоянном времени перемешивания). Из этой зависимости следует, что удовлетворительную пластичность имела смесь с 4% глины, при повышении содержания глины до 6% пластичность смеси практически не изменялась.

Зависимость толщины затвердевшей корочки от времени хранения при различном содержании глины (при постоянном времени перемешивания) показана на рис. 57, где видно, что смеси, содержащие 4...6% глины, были примерно одинаково долговечны и притом более долговечны, чем смесь с 2% глины.

Сопоставление результатов исследований, приведенных на рис. 52—57, показывает, что ввод огнеупорной глины в количестве

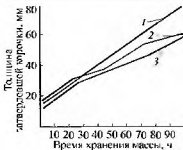


Рис. 57. Зависимость толщины застывшей корочки массы от времени ее хранения при различном содержании огнеупорной глины:

1 — 2%; 2 — 4%; 3 — 6%

4...6% обеспечивает в смеси, содержащей жидкое стекло и едкий натр, необходимое сочетание технологических свойств.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для обеспечения необходимых технологических свойств в смесь для набивной футеровки кислых дуговых сталеплавильных печей необходимо вводить добавки едкого натра и огнеупорной глины.

Кроме указанных выше характеристик, в огнеупорных массах для набивной футеровки стен кислых дуговых сталеплавильных печей контролируют также прочность при растяжении сухих (отвержденных) масс, газопроницаемость и влажность сырой массы. Прочность масс в отвержденном состоянии определяют по ГОСТ 23409.7—78 «Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Методы определения прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе» на образцах (см. рис. 47) с помощью машины модели 04116, изготавливаемой Усманским заводом литейного оборудования. Газопроницаемость определяют на приборе модели 04315 (рис. 58), а влажность — на приборе модели 062М (рис. 59). Эти приборы также изготавливает Усманский завод литейного оборудования. Рекомендуемая влажность огнеупорных масс для набивной футеровки стен кислых дуговых сталеплавильных печей 3...4%.

4.6. ОГНЕУПОРНОСТЬ МАСС

Одним из основных требований, которым должна отвечать масса для футеровки стен электродуговых сталеплавильных печей, является ее высокая огнеупорность (огнеупорность динасового кирпича не менее 1720 °С).

Как известно, основным фактором, определяющим огнеупорность изделий, является их химический состав, обуславливающий количество, состав и скорость образования расплава при высоких температурах.

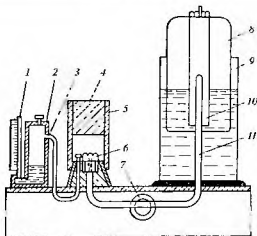


Рис. 58. Прибор для определения газопрооницаемости модели 04315:

- 1 — манометр, 2 — резервуар, 3 — соединительная трубка, 4 — образец, 5 — гильза, 6 — ниппель; 7 — твельшочной кран, 8 — колокол; 9 — бак, 10 — трубка мочевого пузыря, 11 — трубка бака

Как показано выше, для обеспечения высокой прочности набивной футеровки и требуемых технологических свойств огнеупорной массы на основе кварцевого песка в ее состав следует вводить жидкое стекло, огнеупорную глину и едкий натр. Необходимость ввода этих компонентов требует тщательного исследования огнеупорности массы в условиях совместного воздействия оксидов, вносимых добавками, так как состав масс значительно отличается от хорошо изученных динасовых материалов.

Основным фактором, определяющим высокую огнеупорность кислой массы, является содержание в ней кремнезема (рис. 60). Наиболее сильно снижают огнеупорность оксиды иттрия (рис. 61). Влияние остальных оксидов может быть различным в зависимости от содержания в массе Na_2O . Так, при содержании Na_2O до 0,5 % содержание CaO и MgO не влияет на огнеупорность, а при содержании $\text{Na}_2\text{O} > 0,5\%$ — снижают ее (рис. 62, 63).

Понижение огнеупорности кремнезема в результате совместного влияния CaO и Na_2O при содержании $\text{Na}_2\text{O} > 0,5\%$ подтверждают и

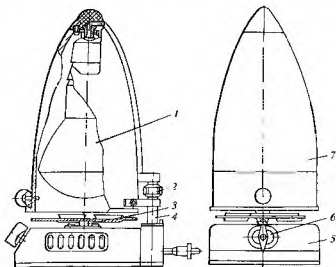


Рис. 59. Прибор для ускоренного определения влажности

1 — инфракрасная лампа; 2 — газок; 3 — стол; 4 — ось; 5 — основание; 6 — реле времени; 7 — излуч.

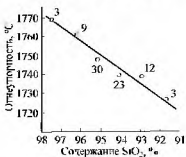


Рис. 60. Влияние содержания кремнезема на отжигуемость мисс (цифры — число исследованных проб)

некоторые другие исследователи. Так, по данным [9], диоксидный мертель, содержащий 8 % молотого мела, имел огнеупорность 1620...1630 °С. При совместном введении 8 % молотого мела и растворимого стекла (1,5 % Na_2O) огнеупорность понижалась до 1510...1580 °С. В том же исследовании показано, что диоксидный мертель, содержащий 1...2 % плавикового шпата, имел огнеупорность 1680...1690 °С, а при совместном введении плавикового шпата и растворимого стекла (1,5 % Na_2O) огнеупорность понижалась до 1620...1630 °С.

Содержание глинозема и Fe_2O_3 , наоборот, понижает огнеупорность массы при содержании Na_2O до 0,5 %, а при содержании $\text{Na}_2\text{O} > 0,5\%$ — не оказывает влияния (рис. 64, 65). Влияние SiO_2 на огнеупорность массы также зависит от содержания в ней Na_2O (рис. 66).

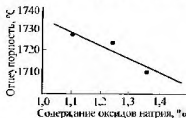


Рис. 61. Влияние содержания оксидов натрия на огнеупорность масс

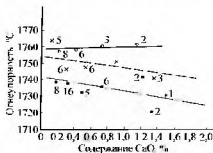


Рис. 62. Зависимость огнеупорности масс от содержания CaO :

- — Na_2O до 0,5 %; × — Na_2O 0,51...1,0 %;
 ● — Na_2O 1,01...1,5 % (цифры — число исследованных образцов)

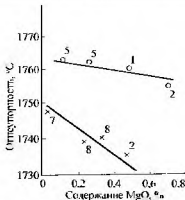


Рис. 63. Зависимость огнеупорности масс от содержания MgO:

O — Na_2O до 0,5 %; x — Na_2O 1,01...1,5 %
(цифры — число исследованных образцов)

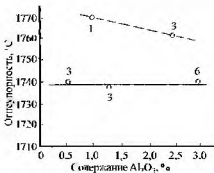


Рис. 64. Зависимость огнеупорности масс от содержания глинозема:

— Na_2O до 0,5 %,
— Na_2O 1,01...1,5 %
(цифры — число исследованных образцов)

При характерном содержании в массе 0,5...1,5 % Na_2O огнеупорность зависит от содержания в ней оксидов натрия, кальция и магния. Это дает основание рассматривать кремнеземистую массу в указанных пределах химического состава как трехкомпонентную систему $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - (\text{CaO} + \text{MgO})$, считая остальным SiO_2 . Исходя из этого, можно

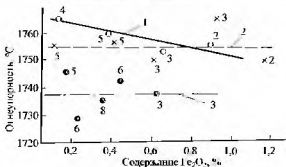


Рис. 65. Зависимость огнеупорности масс от содержания Fe_2O_3 при различном содержании Na_2O :
 1 — до 0,5 %; 2 — 0,51...1,0 %; 3 — 1,01...1,5 %
 (цифры — число исследованных образцов)

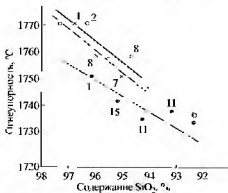


Рис. 66. Влияние содержания SiO_2 на огнеупорность масс:
 ○ — Na_2O до 0,5 %; × — Na_2O 0,51...1,0 %;
 ● — Na_2O 1,01...1,5 % (цифры — число исследованных образцов)

по химическому составу массы определять ее пригодность для набивной футеровки, пользуясь изотермами высококремнеземистого участка смеси $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - (\text{CaO} + \text{MgO})$, построенными нами по данным определения огнеупорности при температурах 1720, 1730, 1740, 1750, 1760 и 1770 °С (рис. 67). Снижение огнеупорности массы в результате разбавления кремнезема добавками объясняется образованием в этом случае легкоплавких силикатов, которые при определении огнеупорности при относительно низких температурах вытекают из конуса и тем самым уменьшают жесткость пироскопа.

Совместное влияние оксидов на огнеупорность кремнеземистой массы может быть также выражено линейными зависимостями, определенными с помощью метода наименьших квадратов в виде уравнений типа $t_{\text{огн}} = A + B(\% R_n O_m)$, где $t_{\text{огн}}$ — огнеупорность, °С; A , B — эмпирические коэффициенты ($\% R_n O_m$) — содержание оксида в смеси, %.

$$t_{\text{огн}} = 1803 - 40,26(\% \text{Na}_2\text{O}) - 8,38(\% \text{CaO}) - 58,88(\% \text{MgO});$$

$$t_{\text{огн}} = 1768 - 25(\% \text{Na}_2\text{O});$$

$$t_{\text{огн}} = 1162,7 + 6,17(\% \text{SiO}_2);$$

$$t_{\text{огн}} = 1750,5 - 10(\% \text{CaO}).$$

Результаты обработки, приведенные в табл. 71, свидетельствуют о достаточно надежной связи между огнеупорностью массы и содержанием в ней Na_2O , SiO_2 и CaO .

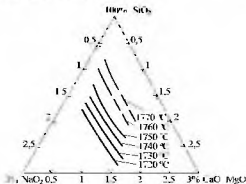


Рис. 67. Изотермы высококремнеземистого участка смеси $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - (\text{CaO} + \text{MgO})$

71. Коэффициенты корреляции уровней огнеупорности

Оксид	Значение коэффициентов уравнения		Коэффициент корреляции r	Ошибка коэффициента корреляции m_r	$\sigma_r = \frac{r}{m_r}$
	A	B			
Na_2O	1768	-25	-0,725	$\pm 0,051$	14,22
SiO_2	1163	+6,2	-0,560	$\pm 0,078$	7,18
CaO	1751	-10	-0,324	$\pm 0,103$	3,14

Однако если для оксида натрия и кремнезема степень надежности связи достаточно велика ($\sigma_r \approx 3$), то для оксида кальция величина отношения коэффициента корреляции к его ошибке лишь незначительно превышает теоретически необходимую. Влияние каждого из остальных компонентов массы (Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , Fe_2O_3) в отдельности вообще не установлено.

Наиболее рациональный химический состав огнеупорной массы для набивной футеровки кислых дуговых сталеплавильных печей следующий, %: 95...97 SiO_2 ; 1,0...1,1 Na_2O ; 1,0...2,5 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$; $\leq 0,5$ CaO ; $\leq 0,3$ MgO ; $\leq 0,6$ Fe_2O_3 .

Для достижения высокой стойкости футеровки большое значение имеет контроль качества масс. Определение огнеупорности является длительным и не может быть применено для систематического контроля масс в производственных условиях. Оценка огнеупорности массы по ее химическому составу путем его сопоставления с изотермами высококремнеземистого участка смеси $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - (\text{CaO} + \text{MgO})$ или расчета по приведенному выше уравнению может применяться при подборе материалов для огнеупорной массы, но для систематического контроля массы применение этого способа также затруднительно из-за длительности химического анализа. Для контроля огнеупорности масс целесообразнее всего применять косвенный метод — путем определения их газопроницаемости.

Огнеупорность масс зависит от количества добавок, так как все они вносят оксиды, снижающие огнеупорность: оксид натрия — жидкое стекло, едкий натр и огнеупорная глина (рис. 68); оксиды кальция и магния — огнеупорная глина. Поэтому при вводе каждой из этих добавок огнеупорность массы снижается. Так, например, при добавлении в кварцевый песок огнеупорностью 1770 °С 5,6 % огнеупорной глины значение огнеупорности снизилось до 1758 °С, при последующем вво-

де 2 % едкого натра (12 %-ного раствора) — до 1750 °С и затем при добавлении 5,6 % жидкого стекла — огнеупорность массы еще уменьшилась до 1737 °С (рис. 69).

На рис. 70 показана зависимость огнеупорности от суммарного содержания в массе глины и жидкого стекла (по данным 88 определений), а на рис. 71 и рис. 72 — влияние каждого из компонентов отдельно. От этих же факторов (при данной зерновой основе массы) зависит

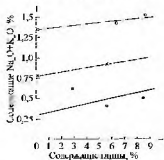


Рис. 68. Зависимость содержания $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ в массе от количества жидкого стекла и огнеупорной глины (при 2 % NaOH):

- — без жидкого стекла;
- × — 2,8 % жидкого стекла;
- — 8,4 % жидкого стекла

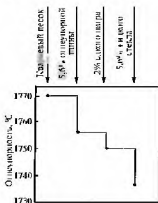


Рис. 69. Изменение огнеупорности массы при ее приготовлении по мере ввода добавок

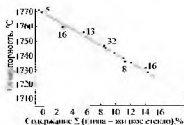


Рис. 70. Зависимость огнеупорности масс от суммарного содержания глины и жидкого стекла (цифры — число исследованных образцов)

Рис. 71. Зависимость огнеупорности масс от содержания глины:

- — без жидкого стекла;
- × — 5,6 % жидкого стекла;
- — 8,4 % жидкого стекла.

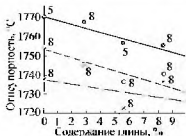
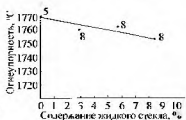


Рис. 72. Зависимость огнеупорности масс от содержания жидкого стекла



и такой показатель, как газопроницаемость массы. Зависимость газопроницаемости безглинистого кварцевого песка от его влажности имеет некоторый максимум; при добавлении первых порций влаги, обволакивающей зерна, устраняется шероховатость поверхности зерен, уменьшается трение проходящих между зернами газов и увеличивается газопроницаемость. При дальнейшем увеличении влаги заполняются поры между зернами и газопроницаемость уменьшается.

Добавление влаги в песчано-глинистую смесь вызывает неизменное снижение газопроницаемости из-за разбухания глинистой составляющей. С увеличением количества глины в песчано-глинистой смеси ее газопроницаемость всегда снижается. Влияние жидкого стекла аналогично влиянию влажности в песчано-глинистых смесях: в безглинистой смеси добавки жидкого стекла повышают газопроницаемость, а затем, после достижения некоторого максимума, снижают ее (рис. 73); в присутствии же глины добавки жидкого стекла неизменно снижают газопроницаемость. С увеличением содержания глины в массе независимо от присутствия в ней жидкого стекла газопроницаемость снижается (рис. 74). С увеличением в массе суммарного количества жидкого

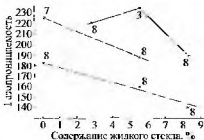


Рис. 73. Зависимость газопрооницаемости масс от содержания жидкого стекла:

● — без глины;
 ○ — 2,8 % глины;
 × — 8,4 % глины
 (цифры — число исследованных образцов)

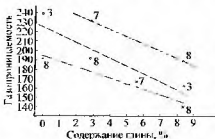


Рис. 74. Зависимость газопрооницаемости масс от содержания глины:

● — без жидкого стекла;
 ○ — 5,6 % жидкого стекла;
 × — 8,4 % жидкого стекла

стекла и глины газопрооницаемость снижается (рис. 75). При хранении жидкоостекольной кремнеземистой массы ее газопрооницаемость увеличивается, поэтому контроль массы нужно производить при определенной длительности перемешивания в бегунах и через определенные промежутки времени после приготовления.

Таким образом, количество жидкого стекла и глины обуславливает как огнеупорность массы, так и ее газопрооницаемость, что дает возможность применения показателя газопрооницаемости в качестве косвенной характеристики огнеупорности. На рис. 76 показана зависимость газопрооницаемости массы для ходовой заправки от изменения толщины набивной футеровки вертикальных стен 5-тонных кислых дуговых сталеплавильных печей через четверо суток их работы после ходовой заправки. Видно, что меньшей газопрооницаемости соответствует больший разгар футеровки. Метод оценки качества кремнеземистой огнеупорной массы по ее газопрооницаемости чрезвычайно удобен, так как длительность определения газопрооницаемости с помощью прибора модели 04315 Усманского завода литейного оборудова-

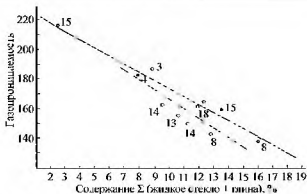


Рис. 75. Зависимость газопроницаемости масс от суммарного содержания жидкого стекла и глины:

● — лабораторные данные; ○ — производственные данные

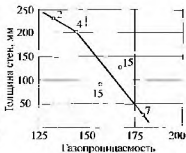


Рис. 76. Взаимосвязь газопроницаемости массы для холодной заправки и изменения толщины футеровки вертикальных стен 5-тонных кислых дуговых печей через 4 суток их работы после холодной заправки

ния составляет всего 30 с. При этом следует иметь в виду, что газопроницаемость в качестве косвенной характеристики огнеупорности не универсальна и может применяться только для масс определенного состава, т.е. в каждом случае необходимо устанавливать конкретную взаимосвязь огнеупорности и газопроницаемости применяемых масс.

Так, например, на рис. 77 показана взаимосвязь газопроницаемости и огнеупорности масс на основе старореровского среднего кварцевого пес-

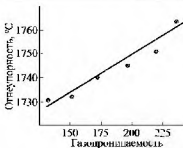


Рис. 77. Зависимость огнеупорности и газопроницаемости массы

ка, содержащих по объему до 10 % жидкого стекла; до 10 % часов-ярской огнеупорной глины и 2 % едкого натра. Для этих масс установлен нижний предел газопроницаемости — 170, что соответствует огнеупорности около 1740 °С. Смесь с газопроницаемостью ниже 170 бракуют.

При этом следует иметь в виду, что газопроницаемость смеси при ее хранении увеличивается, поэтому ее нужно определять при равной длительности перемешивания и строго через определенное время после приготовления (например, через 15 минут).

Помимо косвенной характеристики огнеупорности, газопроницаемость имеет самостоятельное значение — обеспечивает свободное удаление из футеровки при нагреве газов и водяных паров. Связь срока службы огнеупорных изделий с газопроницаемостью послужила основой для разработки стандарта на газопроницаемость огнеупоров общества металлургов Германии.

Разработка футеровочной массы с высокой огнеупорностью позволила внедрить набивную футеровку кислых дуговых печей без ежепламенной горячей заправки стен в условиях нагрева стали для литья до высокой температуры выпуска (1700...1730 °С). Такие массы должны иметь огнеупорность не ниже 1740 °С.

Сопоставляя зависимости, полученные при исследовании технологических свойств массы и ее огнеупорности, и зная химический состав компонентов, легко можно выбрать содержание в массе каждого из них.

4.7. РАЦИОНАЛЬНЫЕ СОСТАВЫ ОГНЕУПОРНЫХ МАСС ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА

Для огнеупорных набивных масс, применяемых в футеровке стен кислых дуговых сталеплавильных печей, используются те же материалы (кварцевый песок, жидкое стекло, огнеупорная глина, едкий натр),

что и для приготовления формовочных смесей в литейном производстве. Чтобы не усложнять производство, не вводить новые материалы, необходимо в каждом конкретном случае уточнять состав массы с учетом зернового и химического состава применяемых кварцевых песков, модуля и плотности жидкого стекла, минералогического, дисперсного состава и коллоидности огнеупорной глины.

В ряде литейных цехов трудности внедрения набивной футеровки связаны с отсутствием резервов мощностей смешеприготовительных отделений. Одним из факторов увеличения их пропускной способности является правильный выбор состава огнеупорной массы, обеспечивающего минимальную длительность ее перемешивания при приготовлении.

Выбранное количество добавок должно обеспечить высокую прочность футеровки во всех требуемых интервалах температур, необходимые технологические свойства массы и высокую ее огнеупорность.

Исследования автора показали, что наиболее рациональным составом массы для набивной футеровки стен кислых дуговых сталеплавильных печей (емкостью 5...6 т) на основе староперовского среднего кварцевого песка является следующий: 88 % кварцевого песка, 6 % жидкого стекла, 4 % часовой глины, 2 % едкого натра (общее глиносодержание в смеси 4,5...5,5 %). Масса этого состава имеет прочность в сыром состоянии 0,019...0,030 МПа, в сухом состоянии 2...2,1 МПа, газопроницаемость 170...250, влажность 2,6...3,6 %, огнеупорность 1740...1750 °С.

Сложнее достичь требуемого сочетания огнеупорности и технологических свойств масс на основе мелких песков, так как с увеличением содержания мелких фракций в кварцевом песке возрастает содержание в массе огнеупорной глины, необходимой для достижения требуемой пластичности и прочности массы в сыром состоянии, и жидкого стекла, необходимого для упрочнения футеровки при высоких температурах. В то же время повышенное количество жидкого стекла и огнеупорной глины снижает огнеупорность массы и, соответственно, увеличивает оплавление футеровки в процессе ее службы.

В качестве примера приведем разработки огнеупорных масс для набивной футеровки стен кислых дуговых сталеплавильных печей на основе мелких карасорского и новинского песков. Исследования granulометрического состава этих песков, приведенного в табл. 72, показало, что карасорский песок содержит 52 % фракции 0,16 мм и 25,5 % — 0,2 мм, а новинский песок той же группы содержит указанные фракции соответственно в количестве 23,4 и 31,8 %, глинистая составляющая — 0,8 и 1,13 %.

С учетом этих факторов проводили работы по выбору рационального состава огнеупорных масс для набивной футеровки на основе мелких песков.

72. Зерновой состав мелких песков

Размер ячейки сита, мм	· 1,0									
	1,0	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,03	0,015
Остаток на ситах песка, %										
карасорского		0,54	3,1	25,5	52,0	16,1	1,6	0,1	0,14	
новинского	0,08	0,23	2,42	9,4	31,8	23,4	18,2	9,26	2,94	1,14

Первоначально для сравнения с известными огнеупорными массами был опробован состав массы, рекомендованный для средних песков и содержащий 88 % кварцевого песка, 6 % жидкого стекла, 4 % огнеупорной глины, 2 % едкого натра. Огнеупорная масса этого состава на основе карасорского песка имела весьма низкую прочность в сыром и сухом состояниях и относительно невысокую огнеупорность (1720 °С).

Для повышения прочности содержание огнеупорной глины в массе было увеличено с 4 до 6 %, а жидкого стекла с 6 до 6,5 %. При 6 % огнеупорной глины и 6,5 % жидкого стекла набивная масса имела наилучшие свойства (прочность в сыром состоянии 0,019 МПа, в сухом 1,6 МПа, газопроницаемость 80, влажность 4,3 %, огнеупорность 1730 °С).

Обращает на себя внимание тот факт, что повышение содержания огнеупорной глины с 4 до 6 % приводит к повышению огнеупорности массы с 1720 до 1730 °С. Возможно, это связано с тем, что показатель огнеупорности зависит не только от температуры плавления образующихся в испытуемом конусе силикатов, но и от жесткости пироксена. Поэтому в условиях приготовления массы на основе мелкого песка, имеющего значительно большую, по сравнению со средним песком, поверхность соприкосновения зерновой основы со связующим увеличение добавки огнеупорной глины в определенных пределах и, соответственно, повышение прочности массы могло привести к повышению показателя огнеупорности, в то время как огнеупорность масс на основе среднего песка с увеличением содержания глины неизменно снижается.

Ситовый анализ новинского песка показал, что наибольшая доля остатка приходится на сито № 02, несмотря на то, что по остатку группа песка 016. Это позволило считать характеристику исследуемого песка близкой к уже описанным пескам группы 02 и вести подбор массы по составу, аналогичному массам на основе среднезернистых песков.

Огнеупорная масса, приготовленная в лабораторных условиях на основе новинского песка, соответствовала предъявляемым к ней тре-

бованиям, а приготовленная в промышленных условиях имела следующие показатели: пределы прочности при сжатии в сыром состоянии 0,019, в сухом — 1,6 МПа, газопроницаемость 170, влажность 2,6 %, огнеупорность 1730 °С.

Была также опробована возможность приготовления огнеупорной массы на основе карасорского песка с добавкой глинистой суспензии взамен огнеупорной глины. Глинистую суспензию вводили в огнеупорную массу в количестве 23 % об., исходя из пересчета сухой огнеупорной глины на глинистую суспензию. Эта масса показала отрицательные результаты — из-за чрезмерного ее увлажнения прочность в сыром состоянии оказалось равна 0,005 МПа.

Были опробованы варианты состава огнеупорной массы, не содержащего едкий натр. Как известно, едкий натр повышает долговечность жидкостекляных смесей, так как его присутствие замедляет процесс гидролиза силиката натрия, содержащегося в жидком стекле, и тем самым замедляет процесс твердения смеси на воздухе. Масса без едкого натра может применяться только при быстром ее использовании без длительного хранения. В опробованные массы, не содержащие едкого натра, для обеспечения их пластичности вводили 2 % воды. Как видно из табл. 73, эти массы (содержащие соответственно 5 и 6 % огнеупорной глины и 6 и 7 % жидкого стекла) имели высокие показатели прочности в сыром состоянии — 0,036...0,052 МПа и низкие в сухом — 0,4...0,9 МПа. Это, по-видимому, связано с чрезмерной длительностью перемешивания массы в лабораторных бегунах. Такие массы могут применяться, однако для получения рационального соотношения их прочностных характеристик в промышленных условиях необходимо выбрать оптимальное время перемешивания массы.

На предприятиях может применяться не только содово-сульфатное, но и сульфатное жидкое стекло, содержащее большее количество примесей. Поэтому была также опробована масса, содержащая 8 % жидкого стекла, 6 % огнеупорной глины и 0,5 % едкого натра. Количество жидкого стекла в этой массе увеличено в связи с более низким содержанием SiO_2 и Na_2O в сульфатном жидком стекле по сравнению с содово-сульфатным, что видно из приведенных анализов жидкого стекла (табл. 74).

Как видно из табл. 73, указанная масса имела требуемые физико-механические свойства.

Результаты исследования огнеупорных масс на основе карасорского песка позволяют сделать следующие выводы:

1. Карасорский мелкий песок может быть использован в качестве зерновой основы огнеупорной массы для набивной футеровки дуговой сталеплавильной печи.

73. Состав и свойства масс на основе карасорского песка

№ п/п	Состав массы, % об.						Физико-механические свойства				
	Огнеупорная глина	Жидкое стекло	Едкий натр	Вода	Глинистая суспензия	Кварцевый песок	Прочность в сыром состоянии, МПа	Газопроницаемость	Влажность, %	Прочность в сухом состоянии, МПа	Огнеупорность, °С
1	4	6	2	—	—	88	0,007	62	5,5	0,65	1720
2	6	6	1	—	—	86	0,016	49	5,4	1,40	1730
3	6	6,5	2	—	—	85,5	0,019	80	4,9	1,62	1730
4	—	7	—	—	23	70	0,005	—	—	—	—
5	8	6	—	2	—	87	0,052	89	4,0	0,40	—
6	6	7	—	2	—	85	0,036	132	4,8	0,90	—
7	6	8 (сульфатное)	0,5	—	—	85,5	0,023	90	4,0	1,90	1730

74. Характеристики жидкого стекла

№ п/п	Наименование жидкого стекла	Содержание, %		Модуль	Плотность, г/см ³
		SiO ₂	Na ₂ O		
1	Содово-сульфатное	29,9	11,8	2,60	1,427
2	Содово-сульфатное	27,2	10,0	2,72	1,397
3	Сульфатное	27,2	9	2,79	1,394
4	Сульфатное	24,4	8,54	2,83	1,350

2. Может быть рекомендован как наиболее рациональный следующий состав огнеупорной массы на основе карасорского песка, % об.:

песок — 85,5; жидкое стекло — 6,5; огнеупорная глина — 6; едкий натр — 2.

3. В случае отсутствия едкого натра можно рекомендовать следующий состав массы в объемных, % об.:

песок — 85; жидкое стекло — 7; огнеупорная глина — 6; вода — 2.

4. В случае применения сульфатного жидкого стекла можно рекомендовать следующий состав массы, % об.:

песок — 85,5; жидкое стекло — 8; огнеупорная глина — 6; едкий натр — 0,5.

Для мелкого обогащенного вольногорского песка принят следующий состав массы: 86,5 % песка, 6 % жидкого стекла, 5,5 % положской глины и 2 % едкого натра. Вольногорский песок содержит достаточно высокое количество фракций 02 (34,5...54,6 %). Масса указанного состава имела следующие свойства: прочность в сыром состоянии 0,018...0,03 МПа, в сухом — 0,42...2,04 МПа, газопроницаемость 96...120, влажность 2,3...3,8 %, огнеупорность 1740 °С. При применении для этого же песка дружковской глины оказалось достаточным ввести ее в количестве 4 % для обеспечения требуемых физико-механических свойств массы.

Сравнение свойств огнеупорных масс, приготовленных на основе различных песков одной и той же группы 016, приводит к выводу, что сама по себе группа песка не определяет количество добавок огнеупорной глины и жидкого стекла. Решающим фактором является абсолютная доля средних и крупных зерновых фракций песка, что и подтверждается проведенным исследованием. Так, в массу на основе карасорского песка группы 016, содержащего 29 % фракций крупнее 0,16 мм, для достижения требуемых физико-механических свойств введено 6 % огнеупорной глины и 6,5 % жидкого стекла, а в массу на

основе новинского песка той же группы, но содержащего 44 % фракции крупнее 0,16 мм, для получения таких же свойств введено 4 % огнеупорной глины и 6 % жидкого стекла.

Доля основных фракций кварцевого песка должна учитываться при разработке огнеупорных масс и на основе крупных песков. Например, при разработке массы на основе миллеровского крупного песка исходили из того, что хотя песок и относится к группе 0315, в нем преобладает основная фракция 0,2 мм, поэтому состав массы приняли по аналогии с массами на основе средних песков. При этом, учитывая значительную долю фракций более 0,315 мм (30...50 % по сравнению с 10 % в староверовском среднем песке), содержание огнеупорной глины уменьшили с 4 до 3 %. Масса этого состава (89 % кварцевого песка, 6 % жидкого стекла, 3 % дружковской огнеупорной глины, 2 % едкого натра) обеспечивала в промышленных условиях прочность в сыром состоянии 0,017...0,025 МПа, сухом — 1,0...1,8 МПа, газопроницаемость 173...180, влажность 2,7...3,5 %, огнеупорность 1750 °С.

Анализ технологии приготовления огнеупорных масс на 22 заводах и лабораторные исследования показали, что их составы и время перемешивания до достижения $\sigma_{сж} \geq 16$ КПа изменяются в широких пределах. Основным фактором, определяющим изменение длительности перемешивания массы в бегунах от 17 мин до 2 ч, является наличие в составе масс огнеупорной глины и воды (табл. 75).

75. Длительность перемешивания масс в зависимости от количества добавок

Глина	Среднее количество добавок, %			Время перемешивания, мин
	Жидкое стекло	H ₂ O	NaOH	
4,1	6,0	—	0,6	17,5
—	9,0	—	—	61
—	6,5	2,5	—	110

Исследованиями А.М. Лясса установлено, что максимальная прочность жидкостекольной массы достигается, когда вся содержащаяся в массе влага оказывается в связанном состоянии.

Быстрое упрочнение массы при вводе огнеупорной глины происходит по двум причинам: благодаря удерживанию части влаги огнеупорной глиной и замещению в глине ионов Са ионами Na, что повышает

прочность массы, так как глины, содержащие ионы Na, обладают большей связующей способностью. Поэтому в огнеупорные массы целесообразно вводить огнеупорную глину и не добавлять воду.

Установлено, что наиболее рационально применение жидкого стекла с модулем 2,8...2,9, обеспечивающим наибольшую прочность набивной массы в сыром состоянии и ее высокую огнеупорность.

Некоторые заводы получают жидкое стекло с модулем, не укладываемым в эти пределы. На таких заводах важно не вводить новые материалы, не усложнять производство, а использовать для приготовления огнеупорных масс те же материалы и оборудование, что и для производства формовочных смесей.

Так, один из заводов применяет жидкое стекло с модулем 2,35. Поэтому при внедрении набивной футеровки стен печи на этом заводе необходимо было разработать огнеупорную массу и технологию ее изготовления с применением низкомолекулярного жидкого стекла.

В этом производстве применяют староперовский формовочный песок и дружокскую глину ДН-3. На другом заводе для набивной футеровки стен печей используют тот же песок и часон-ярскую огнеупорную глину ЧПК1, близкую по свойствам к глине ДН-3, поэтому был опробован состав огнеупорной массы, % об.: кварцевый песок 88, огнеупорная глина 4, жидкое стекло 6, едкий натр 2.

Порядок ввода компонентов вначале был аналогичен общепринятому: сначала на бегунах перемешивали в течение 5 мин песок и глину до получения однородной смеси, затем в смесь добавляли NaOH для увеличения долговечности массы и перемешивали еще 3 мин до ее полного смачивания; последним вводили жидкое стекло. После 35 мин перемешивания предел прочности при сжатии огнеупорной массы в сыром состоянии составлял 0,006 МПа, а после перемешивания в течение 1 ч — 0,019 МПа. Масса обладала также достаточной газопроницаемостью (190), но была непластичной (влажность 2,4 %). Для увеличения влажности в нее добавили 1 % воды и вновь перемешали. После 2 ч перемешивания предел прочности при сжатии массы составлял 0,014 МПа, газопроницаемость 190, влажность 3 %, масса была горячей и непластичной. Во избежание высыхания массы следовало сократить длительность ее перемешивания. Для этой цели изменили порядок ввода компонентов.

При последующих экспериментах в однородную смесь песка и глины вводили жидкое стекло, чтобы в процессе перемешивания быстрее нарастала прочность огнеупорной массы в сыром состоянии за счет гидролиза силикатов:



Естественно, что до ввода едкого натра эта реакция идет быстрее и добавление NaOH последним не должно оказывать отрицательного влияния на свойства масс.

По указанной технологической схеме были приготовлены 4 массы и определены их свойства (табл. 76), причем длительность перемешивания масс значительно сократилась и составляла 60...70 мин вместо 2 ч.

Таким образом, низкомодульное жидкое стекло может быть использовано для приготовления огнеупорных масс при соблюдении следующего порядка ввода компонентов: песок → глина → жидкое стекло → NaOH.

76. Свойства огнеупорных масс*

Масса	Предел прочности при сжатии в сыром состоянии, МПа	Газопроницаемость	Влажность, %
1	0,017	180	3,4
2	0,020	190	3,2
3	0,018	170	3,6
4	0,022	190	3,1

* Огнеупорность масс 1730 °С.

На основе работы по исследованию и внедрению огнеупорных масс для монолитной набивной футеровки стен кислых дуговых сталеплавильных и чугуноплавильных печей, заменивших штучные дивасовые огнеупоры, нами разработан отраслевой стандарт «Кислые огнеупорные массы для набивной футеровки стен дуговых сталеплавильных и чугуноплавильных печей. Изготовление» ОСТ 16.0.886.034. Разработка стандарта была вызвана необходимостью установить общие требования к материалам, применяемым для изготовления огнеупорных масс, порядок подготовки этих материалов, составы масс, технологию приготовления и методы контроля их качества. В состав огнеупорных масс входит кварцевый песок, жидкое стекло, огнеупорная глина и едкий натр.

В качестве классификационных признаков материалов стандартом предусматривается класс кварцевого формовочного песка, определяемый массовой долей кремнезема; минералогический состав огнеупорной глины, определяемый основным пороодообразующим минералом (каолинитом и гидрослюдами); модуль и плотность натриевого содо-

ного жидкого стекла, плотность водного раствора технического едкого натра. Нормы требований к исходным материалам для огнеупорных масс приведены в табл. 77.

77. Требования к материалам огнеупорных масс, применяемых для набивной футеровки стен кислых дуговых сталеплавильных печей

Материал	ГОСТ	Марка	Массовая доля SiO_2 , %	Модуль	Плотность, кг/м^3
Кварцевый формовочный песок	2138-91	Пески не ниже группы К ₃ или обогащенные	≥ 97	—	—
Глина формовочная	3226-93	Все глины, основными породообразующими минералами которых являются минералы групп каолинита и гидрослюда (К)	—	—	—
Стекло натриевое жидкое содовое	13078-81	—	—	2,5...3,0	(1,43... 1,52)·10 ³
Натр едкий технический (водный раствор)	2263-79	ТХ; ТД	—	—	(1,11... 1,12)·10 ³

Примечание. Допускается применять жидкое стекло с модулем 2,35...2,50.

Кроме указанных требований, в отраслевом стандарте приведены составы огнеупорных масс. Литейные цехи применяют для изготовления формовочных смесей обогащенные, мелкие, средние и крупные пески. Чтобы не усложнять производство применением для огнеупорных масс песка определенной группы, не используемого в литейном цехе, для всех групп песков отработаны составы огнеупорных масс. Ре-

комендуемые составы огнеупорных масс для набивной футеровки стен дуговых печей приведены в табл. 78. Решающим фактором для определения количества добавок огнеупорной глины и жидкого стекла в массе является абсолютная доля мелкой (зерна < 0,2 мм) фракции песка с учетом доли крупной (зерна > 0,2 мм) фракции песка. В таблице приведены составы огнеупорных масс на основе всех групп песков, применяемых в литейных цехах.

78. Составы огнеупорных масс

Содержание в огнеупорной массе, % об.				Доля фракции песка, % об.		Группа песка по ГОСТ 2138-91
кварцевого песка	огнеупорной глины	натриевого жидкого содового стекла	раствора едкого натра	мелкой	крупной	
85,5	6,0	6,5	2	> 60	≥ 8	016 мелкий
88,0	4,0	6,0	2	≤ 60	≥ 8	016 мелкий 020 средний
87,5	4,5	6,0	2	< 60	≥ 8	016 мелкий
89,0	3,0	6,0	2	< 30	≥ 5	0315 крупный

Примечание. В отдельных случаях допускается уменьшение содержания в массе едкого натра до 0,6 %; для огнеупорных масс на основе крупного песка допускается уменьшение содержания глины до 2 %.

Свойства огнеупорных масс: предел прочности при сжатии в сыром состоянии 0,015...0,024 МПа, предел прочности при растяжении в сухом состоянии не менее 1,0 МПа, влажность 3,0...4,0 % масс.

Свойства огнеупорных масс необходимо контролировать перед выпуском массы из бегунов.

Огнеупорные массы при оценке их в качестве огнеупорного материала в сравнении с электродинасом по большинству показателей имеют явные преимущества (табл. 79).

Химический состав кремнеземистых смесей для набивной футеровки вертикальных стен кислых сталеплавильных печей, как правило, находится в пределах, %: 95...97 SiO₂; 0,2...1,1 Na₂O; 1,0...3,5

79. Сравнение свойств электродинаса и кислых огнеупорных масс

Наименование показателя	Электро- динас	Огнеупорная масса
Химический состав, %:		
SiO	96,14	96,33
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	0,75	1,47
Fe ₂ O ₃	1,0	0,56
CaO	1,91	0,24
MgO	0,02	0,08
Na ₂ O	0,2	1,02
K ₂ O	—	0,3
Огнеупорность, °С	1720	1730
Термостойкость, число теплосмен	1—2	5
Газопроницаемость	30	100
Открытая пористость, %	20,1	33,2...42,0
Кажущаяся плотность, г/см ³	1,85	1,24...1,68
Предел прочности при сжатии, МПа	31,4	12,7 (обожжен- ная при 1600 °С)
Теплопроводность, Вт/м · °С	$\lambda_{425} = 2,17$	$\lambda_{315} = 1,022$
Температура начала деформации под нагрузкой, °С	1660	1000 (обожженная)
Стойкость футеровки, число плавов	30...300	800...40 000

Al₂O₃ + TiO₂; 0,5...1,0 CaO; 0,3...0,6 MgO; 0,5...0,8 Fe₂O₃; 0,1...0,3 K₂O; 0,8...1,2 п.п.п. Огнеупорность таких масс 1730...1750 °С. Смесь приведенного химического состава обеспечивает требуемые технологические свойства (прочность, пластичность, долговечность) и высокую прочность во всех интервалах температур, возможных в дуговых сталеплавильных печах. Внедрение такой смеси полностью избавляет от не-

обходимости выполнения тяжелой операции горячей заправки стел после каждой плавки, так как футеровку достаточно поддерживать еженедельной холодной заправкой в выходные дни. Необходимые характеристики огнеупорных масс на основе кварцевого песка обеспечиваются вводом в их состав жидкого стекла, огнеупорной глины и едкого натра.

Таким образом, разработаны огнеупорные массы для монолитной футеровки кислых дуговых сталеплавильных печей для различных условий производства. Однако какие бы разные по своим характеристикам не были исходные материалы для приготовления огнеупорных масс, к ним должны предъявляться общие требования, такие как: высокая огнеупорность, пластичность, долговечность, достаточная прочность массы в сыром состоянии, порядок подготовки материалов, технологии приготовления масс, контроль их качества, технология «холодной заправки».

4.8. ТЕХНОЛОГИЯ ФУТЕРОВКИ ПЕЧЕЙ

Технологический процесс футеровки кислых дуговых сталеплавильных печей огнеупорными массами начинается с подготовки исходных материалов (как правило, это местные дешевые материалы), те же, которые применяются в литейных цехах для изготовления формовочных жидкостекляных смесей. Все материалы, используемые для приготовления огнеупорных масс для набивной футеровки, следует хранить отдельно по видам, маркам и сортам в закрытых складах, защищающих их от увлажнения и загрязнения.

Кварцевый песок должен быть высушен до остаточной влажности не более 0,5 % и затем охлажден. Сушку песка производят в установках в «кипящем слое» либо в установках барабанного типа. В момент поступления в бегуны, где приготавливается масса, песок должен иметь температуру не более 35 °С, так как применение горячего песка не обеспечивает требуемых физико-механических свойств смеси. После сушки песок пропускают через специальную установку, где он принудительно охлаждается воздухом во взвешенном состоянии.

Огнеупорную глину также применяют в предварительно высушенном (в барабанном сушиле), размолотом до порошкообразного состояния и просеянном (через сито с ячейкой 1 мм) виде. Для размола глины применяют размалывающие бегуны или шаровые мельницы.

Жидкое стекло готовят в автоклаве, исходным сырьем служит силикат натрия содовый в виде гранулята или в виде силикат-глыбы по ГОСТ 13079–93/ГОСТ Р 50418–92 «Силикат натрия растворимый. Технические условия». При загрузке автоклава выдерживается отно-

шение по массе силикат-глыбы к воде как 4:3. Для приготовления смесей жидкое стекло применяется только в охлажденном состоянии.

Для приготовления раствора едкого натра (NaOH) используют твердый натр едкий технический по ГОСТ 2263-79 «Натр едкий технический. Технические условия», который растворяют в закрытом баке при постоянном перемешивании сжатым воздухом.

Перед приготовлением огнеупорной массы необходимо измерить модуль и плотность жидкого стекла, плотность раствора едкого натра и температуру песка. Огнеупорную массу приготавливают в смешивающих бегунах, которые предварительно должны быть полностью очищены от остатков формовочной смеси. Приготовление масс для набивной футеровки не требует специального оборудования. Их приготавливают в литейных цехах в смешивающих бегунах, в которых обычно готовят формовочные смеси.

При приготовлении массы в бегуны сначала загружают песок, затем глину и перемешивают до равномерного распределения глины примерно в течение 2...4 мин. Затем добавляют едкий натр и перемешивают 30...40 с до увлажнения всей массы (по всему объему). После этого вводят жидкое стекло и смесь вновь перемешивают 16...40 мин до получения прочности в сыром состоянии 0,015...0,03 МПа.

В случае применения низкомодульного жидкого стекла (модуль 2,1...2,5) порядок ввода компонентов должен быть следующий: песок, глина, жидкое стекло, едкий натр. Это связано с тем, что в низкомодульном жидком стекле свободного кремнезема мало и упрочнение массы происходит в основном за счет гидролиза силикатов:



Поэтому при вводе едкого натра до введения жидкого стекла эта реакция идет медленно и требуемая прочность в сыром состоянии достигается при очень длительном перемешивании, при этом масса становится непластичной. Отбирать пробы для контроля качества огнеупорных масс можно только при остановленных бегунах через каждые 10...15 мин от начала перемешивания.

Если в составе массы отсутствует глина и NaOH, то в бегуны после кварцевого песка, как правило, вначале добавляют воду, перемешивают до получения однородной массы, затем дают жидкое стекло.

После приготовления массы обязательно проверяют физико-механические свойства каждого замеса. Браковочным признаком готовой массы является несоответствие требованиям по двум показателям: газопроницаемости и прочности сырых образцов на сжатие. Газопроницаемость косвенно характеризует огнеупорность и должна быть не менее 170.

Метод оценки качества огнеупорной массы по ее газопроницаемости удобен, поскольку длительность определения составляет всего 30 с. Готовую массу хранят в коробах, накрытых влажной мешковиной.

До начала кладки печи необходимо очистить внутреннюю поверхность кожуха от остатков футеровки. При капитальном ремонте на днище укладывают слой листового асбеста. Для склеивания кожуха с асбестом применяют тестообразный песчано-глинистый раствор, содержащий 75 % песка, 25 % глины и 8...12 % воды (сверх 100 %). Затем кладут шамотный и dinasовый кирпич. Например, при капитальном ремонте 5-тонной печи укладывают асбест толщиной 10 мм, два ряда — на плашку шамотного кирпича и четыре ряда — на плашку dinasового. Толщина швов между кирпичами должна быть не более 1,5 мм. Шамот кладут на растворе огнеупорной глины либо швы шамотных рядов засыпают шамотным порошком, а швы dinasовых — сухим кварцевым песком. Каждый последующий ряд кирпича кладут вперевязку с предыдущим. Кирпич у линии соединения кожуха с днищем обтесывают так, чтобы кирпич примыкал к кожуху.

После этого кожух печи покрывают слоем листового асбеста толщиной 10 мм и одним слоем шамотного кирпича (плашкой к асбесту). Для облегчения облицовки кожуха асбестом места стыков смазывают раствором состава: 80 % шамота молотого, 20 % глины огнеупорной, 5...6 литров воды на 10 л сухой смеси. Шамотный кирпич следует класть на растворе: 80 % шамота молотого, 20 % огнеупорной глины.

После этого шамотным кирпичом футеруют желоб и загрузочное окно, при этом кирпич кладут на растворе 75 % песка, 25 % огнеупорной глины и 5...6 л воды на 10 литров сухой смеси. На некоторых заводах арку рабочего окна выкладывают враспор dinasовым кирпичом по шаблону в два ряда на ребро (рис. 78). Столбики рабочего окна выкладывают из dinasового кирпича в два ряда на плашку под углом 75...80° внутрь печи.

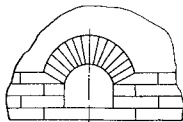


Рис. 78. Кирпичная арка над выпускным отверстием

Затем проводится кладка откосов кольцевыми рядами dinasового кирпича ступеньками (9 рядов). При этом каждый последующий ряд выкладывается вперевязку с предыдущим. Швы каждого ряда засыпают сухим кварцевым песком. При кладке откосов предусматривают отверстие для летки.

После кладки откосов в печь насыпают огнеупорную массу и набивают подину, откосы и стены. Общая толщина набивного слоя подины должна быть не менее 180 мм. Набивку стен проводят слоями не более 100 мм, а подины — 50 мм ручной или пневматической трамбовкой. Плотность набивки подины проверяют незаостренным металлическим штырем диаметром 10...15 мм. При нормальной набивке штырь не должен давать вмятину глубиной более 10 мм. После набивки контролируют внутренний диаметр печи по стенам и глубину подины. В дуговых печах емкостью 5...6 т толщина набивного слоя стен находится в пределах 300...350 мм. На некоторых заводах стены набивают по шаблону.

По окончании капитального ремонта необходимо обеспечить прочность набивной футеровки выдержкой на воздухе, чтобы сохранить целостность футеровки при перемещении печи, ее установке и первой заалке. При этом не рекомендуется продувать ее углекислым газом, как это делается при упрочнении форм, изготовленных из жидкостекляных смесей, так как механизм упрочнения при продувке жидкостекляной массы углекислым газом и при удалении влаги, как известно, различен. В первом случае прочность достигается за счет образования геля кремниевой кислоты, а во втором — за счет стекловидной пленки силиката натрия. Прочность склеивания зерен стекловидной пленкой силиката натрия во много раз выше, чем прочность склеивания гелем кремниевой кислоты. Если вначале набивную футеровку продуть углекислым газом, то последующим удалением влаги может быть достигнута прочность более низкая, чем без предварительной продувки углекислотой.

При выдерживании футеровки на воздухе упрочнение происходит главным образом за счет испарения влаги и повышения вязкости жидкого стекла. Уже через 8 ч выдержки на воздухе футеровка достаточно упрочняется, и печь может быть загружена шихтой. До этого момента накрывать печь сводом не рекомендуется. Можно сушить футеровку дровами и коксом в течение 5...8 ч.

Обычно при кирпичной футеровке стен кислых дуговых печей подину выполняют монолитной (набивной или наварной). При этом перед запуском печи в эксплуатацию после капитального ремонта ее предварительно нагревают с целью упрочнения и спекания с кирпичной футеровкой. Монолитная набивная футеровка жидкостекляной

массой позволяет отказаться от предварительного нагрева подины перед первой завалкой, т.е. отменяется длительная, сложная и трудоемкая технологическая операция.

После капитального ремонта подину печи выстилают стальным листом, загружают шихту в минимальном количестве (в 5-тонной печи масса первой плавки 4...4,5 т). Шихту для первой плавки следует подбирать чистой и мелкой, с высоким содержанием С и Si. Металл расплавляют медленно, нагревают только до температуры, позволяющей выпустить его из печи. Затем, независимо от химического состава, металл выпускают. Последующие плавки можно проводить по обычной технологии. После нескольких плавок футеровка превращается в сплошную монолитную массу. При переходе с кирпичной на набивную футеровку полезный объем печи сохраняется.

Подину и откосы после каждой плавки заправляют смесью песка с водой и жидким стеклом, что выполняется так же, как и при кирпичной футеровке стен.

В процессе эксплуатации набивная футеровка дуговой печи постоянно изнашивается (оплавляется), особенно в верхней части на 20...30 %, в связи с чем периодически ее размеры нужно восстанавливать путем нанесения нового слоя огнеупорной массы. Именно эта операция и дает возможность достичь высокой стойкости монолитной футеровки.

Наиболее рационально восстановление размеров футеровки проводить в выходной день. Эта технологическая операция получила название «холодной заправки» (через 25...35 плавки).

В порядке подготовки печи к холодной заправке необходимо особенно тщательно слить металл последней плавки, очистить подину от остатков шлака, печь не заправлять, выкачать из-под свода и залить водой для охлаждения. Перед холодной заправкой необходимо сбить с верха печи по периметру упавшие со свода и спекшиеся с футеровкой стен обломки футеровки свода.

Для холодной заправки в печь высыпают огнеупорную массу и прочную набивают выгоревшие места. В 5-тонной печи стены, как правило, после недельной эксплуатации пребудет восстанавливать на 25...30 % толщины в верхней части. Затем меняют кирпичные арки над рабочим окном и леткой, используя столбики для арок из набивной массы.

При проведении холодной заправки очень важно строго выдержать основные размеры футеровки. Следует контролировать внутренний диаметр печи по стенам, глубину подины и расстояние от центра летки до подины. Например, для 5-тонной печи эти размеры ориентировочно должны быть следующими: внутренний диаметр печи по стенам

(2350 ± 50) мм; глубина подины от верха печи (1110 ± 10) мм; расстояние от центра летки до подины (340 ± 15) мм (рис. 79). Результаты замеров еженедельно должны быть занесены в специальный журнал.

Слой футеровки стен, нанесенный при холодной заправке, прогревается теплом, аккумулированным футеровкой печи в процессе ее работы. Уже через 3...4 ч слой холодной заправки достаточно упрочняется в результате испарения влаги, и печь готова к завалке шихты. Верхний слой желоба выполняют набивным и подбивают по мере его износа.

При непрерывной работе без выходных дней печи останавливают для холодной заправки на 2...3 ч. Футеровку после выдачи последней плавки перед остановкой печи охлаждают водой, затем подбивают стены и сразу же загружают шихту. Прочность стен в этом случае достаточна для того, чтобы загрузить шихту без выдержки футеровки на воздухе. Это объясняется более высокой температурой поверхности стен печи во время ее остановки при непрерывной работе, чем при холодной заправке в выходной день.

На ряде заводов после каждой плавки производят торкретирование кирпичной футеровки стен огнеупорной массой центробежными торкрет-машинами ФМ-5А, ФМ-5Б, ФМ-6 и ФМ-38, разработанными Волгоградским ВНИИТМашем (рис. 80). В этом случае ни горячая,

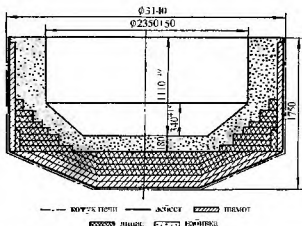


Рис. 79. Схема футеровки кислой дуговой 5-тонной сталеплавильной печи

ни холодная заправка в выходные дни не производится. Торкретирование осуществляют с помощью мостового крана массой, состоящей из кварцевого песка, 6 % жидкого стекла и 5...7 % воды. Применение футеровочных машин наиболее эффективно при наклоне стен 20...23°.

Перед выпуском плавки футеровочная машина заправляется огнеупорной массой, которая тщательно перемешивается в смесителе. После выпуска плавки в ковш ванну выкатывают (или отводят в сторону свод) и при помощи мостового крана футеровочную машину подают к ванне, совмещают ее с центром ванны и опускают, не доходя до подины на 200...300 мм. Одновременно с подъемом машины сталевар включает с ручного пульта управления подачу огнеупорной массы. Центробежный диск разбрасывает массу ровным тонким слоем на горячую поверхность стен. Под действием температуры масса спекнется с футеровкой стен.

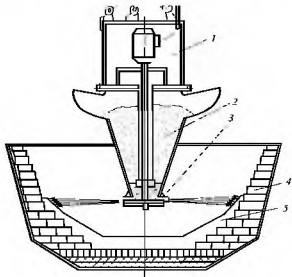


Рис. 80. Схема наварки стен 5-тонной дуговой электродуговой печи футеровочной машиной ФМ-5:

1 — футеровочная машина; 2 — огнеупорная масса; 3 — центробежный диск;
4 — армирующий слой; 5 — наварка

заглавляя все неровности и шероховатости. Когда машина достигает верха печи, ее отключают, поднимают из ванны и устанавливают на подставку для подготовки ее к следующему циклу. Цикл одной наварки не превышает 20...30 с, а со всеми подготовительными операциями — 2...3 мин. Толщина наносимого слоя футеровки 8...12 мм.

Другая центробежная машина для заправки дуговых печей была разработана на Минском тракторном заводе. Для машины использовали огнеупорную массу из люберецкого или орековского песка со средней величиной зерен 0,2 мм и влажностью до 6 и 5 % жидкого стекла плотностью 1,2 г/м³. Цикл заправки после включения машины составляет 1...1,5 мин с расходом за это время 0,7 м³ массы.

После слива очередной плавки сталевар должен специальным штырем проверить состояние подины. При наличии ямок на подине металл в них необходимо засыпать песком, перемешать и удалить с помощью штыря. Затем ямку необходимо засыпать смесью песка с жидким стеклом и подтрамбовать специальной ручной трамбовкой (удлиненной штырь с приваренной «тарелкой»). Подина и откосы печи после каждой плавки должны быть заправлены смесью песка с жидким стеклом. В случае подрыва подины ее нужно тщательно заправить смесью, смесь утрамбовать трамбовкой, уложить на подину лист железа и загружать шихту.

Технология набивной футеровки кислых дуговых сталеплавильных печей не требует какой-либо переделки печного оборудования.

Набивную футеровку можно применять в кислых дуговых сталеплавильных печах емкостью от 0,5 до 12 т любой конструкции: с выкатывающимся корпусом, с отворачивающимся сводом, с цилиндрическим и коническим кожухом, за исключением печей со стационарным сводом.

На некоторых заводах новый слой футеровки стен наносят после каждой плавки путем горячей заправки стен массой, состоящей из кварцевого песка с 6...8 % жидкого стекла. Для этого к печи приваривают специальную площадку, с которой сталевар забрасывает огнеупорную массу на выгоревшие места стен. После горячей заправки стены 6-тонной печи имеют толщину у откосов 350 мм и в верхней части 150 мм. Заправка длится 3...5 мин. Горячая заправка является тяжелой ручной операцией, выполняемой в условиях высоких температур. Для того чтобы огнеупорная масса, нанесенная вручную, приварилась к футеровке, кожухи печей должны быть коническими, а стены — наклонными (25...30°).

Попытки применить метод горячей заправки стен после каждой плавки в печах с цилиндрическим кожухом не дали положительных результатов. Следует отметить, что путем горячей заправки не удается полностью восстановить первоначальную толщину стен, поэтому на некоторых заводах, применяющих горячую заправку стен, произво-

дится также и холодная заправка стен в выходные дни. Наилучшие результаты дает регулярное восстановление размеров футеровки стен только путем холодной заправки их в выходные дни.

Внедрение ежеплавочной горячей заправки стен на многих заводах сдерживалось невозможностью замены цилиндрического кожуха печи на конический из-за ограниченной грузоподъемности транспортных средств, увеличения массы свода. Внедрение же набивной футеровки стен дуговых печей с цилиндрическим кожухом и верти-кальными стенами с помощью огнеупорных жидкостекольных масс подкреплялось многолетним опытом литейного производства по изготовлению форм для стальных отливок из быстротвердеющих жидкостекольных смесей, в том числе крупных форм с вертикальными стенками для отливок массой 5 т и более. В частности, этот опыт показал, что прочность смеси в сыром состоянии должна быть 0,020...0,035 МПа, чтобы вертикальная стенка после набивки не обвалилась под собственным весом.

Некоторые заводы переходят от кирпичной футеровки стен печи в процессе ее эксплуатации к монолитной. В этом случае во время капитального ремонта стены выкладываются из кирпича, а вместо замены кирпичной футеровки стен во время текущего ремонта через 30...40 плавов в выходной день наносят огнеупорную массу (холодная заправка) на кирпич, не выламывая имеющейся футеровки. В дальнейшем холодная заправка стен выполняется один раз в неделю, а иногда один раз в две недели и горячая заправка. Особенностью этого метода является то, что для повышения стойкости футеровки используется строительная прочность динасового кирпича, защищаемого от дальнейшего выкрашивания и оплавления монолитным слоем набивной массы. При этом упрощается процесс внедрения набивной футеровки на заводах, традиционно привыкших к кирпичной футеровке стен дуговых печей. При применении холодной заправки на кирпич завалку шихты можно производить, по-видимому, через более короткое время, чем при холодной заправке на набивную футеровку.

На ряде заводов холодную заправку печей, работающих в одну-две смены, производят один раз в сутки.

На одном из заводов стены и свод печи емкостью 0,5 т набивают огнеупорной массой из 70...75 % кварцевого песка, 30...25 % огнеупорной глины влажностью 5...7 %, приготовляемой в обычных бегунах за 8...12 мин.

В кислых печах с набивной футеровкой стен выплавляют широкий сортимент углеродистых и легированных сталей (15Л, 55Л, 20ФЛ, 35ГЛ, 32Х06Л, 40ХЛ, 110ГЛ, Х18Н9ТЛ, Х25Н20С2 и многие др.). Завалку шихты осуществляют бадьями с гибкими или жесткими лепест-

ками, с цепями, а на некоторых заводах — бадьями грейферного типа, кораблями или магнитной шайбой.

Сталь выплавляют как активным, так и кремнийвосстановительным способом. На большинстве заводов в дуговых печах с набивной футеровкой стен в процессе выплавки стали проводят окисление углерода. Температура стали в печи перед выпуском находится в пределах 1640...1730 °С.

4.9. ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ

Монолитная набивная футеровка в любом случае имеет значительно большую стойкость, чем кирпичная. Ознакомление с опытом работы набивной футеровки стен дуговых сталеплавильных печей на заводах СНГ показало, что переход с кирпичной футеровки на набивную позволяет существенно увеличить стойкость футеровки (с 30...60 до 800...40 000 плавок), т.е. печи могут работать без капитальных и текущих ремонтов в течение 20 лет*.

Возможность применения в дуговых сталеплавильных печах тех или иных огнеупорных материалов в значительной степени определяется тепловым воздействием электрических дуг на футеровку. В связи с этим исследовано воздействие электрических дуг на кислую набивную футеровку дуговых печей небольшой емкости

Исследования проводили методами моделирования на световых и математических моделях, находящих все большее применение в практике исследований, в следующей последовательности: 1) изучение распределения тепловой нагрузки на футеровку по данным светового моделирования; 2) изучение на математических моделях износа футеровки в зависимости от геометрии печи, мощности дуг и времени их воздействия на футеровку.

Физическая сущность метода светового моделирования радиационного теплообмена заключается в аналогии законов переноса излучения для частот видимой части спектра и для всех других частот электромагнитного излучения.

Световое моделирование теплового воздействия электрических дуг на футеровку дуговых сталеплавильных печей проводили на физических моделях. Физические модели были построены для ряда электродуговых печей емкостью 5...6 т различных заводов с разным углом наклона стен α , их геометрические параметры приведены в табл. 80 и на рис. 81.

* Под капитальным ремонтом в данном случае подразумевается полная замена стен и подины, под текущим — полная замена стен.

80. Геометрические параметры печей с набивной футеровкой

Но- мер печи	Угол на- клон стен, α°	$D_{фут}$, мм	$d_{фут}$, мм	σ , мм	$d_{ст}$, мм	$h_{ст}$, мм	$D_{расп}$, мм	$H_{ст}$, мм
1	0	2350±50	2350±50	550	350	400	900	770±10
2	5	2780	2200	475	350	300	900	1335±10
3	12	3280	2500	625	350	435	900	985
4	14	2700±40	2200	498	305	380	900	900

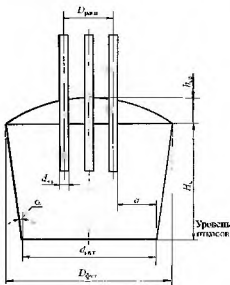


Рис. 81. Геометрия свободного пространства печей с набивной футеровкой

Световое моделирование проводилось по следующей методике [103]. Световая модель представляла собой камеру, геометрически и оптически подобную свободному пространству печи. Модели стены, свода и электродов были выполнены из бумаги, зачерненной водным раствором туши, степень черноты соответствовала степени черноты футеровки и электродов при заданной температуре печи. Дуга имитировалась люминесцентной лампой. Поверхность расплавленного металла воспроизводилась металлическим листом, степень черноты которого соответствовала степени черноты жидкой стали.

Создание оптического подобия излучения сложных геометрических поверхностей является весьма сложной задачей и не имеет однозначного решения. Моделирование излучения проводили последовательно, небольшими участками поверхности. Поверхность модели освещали узкой подсветкой, площадь которой составляла несколько процентов от площади поверхности модели и не могла внести заметных искажений в равномерный характер ее отражения (рис. 82).

Подсветку (светящуюся полосу) последовательно перемещали по всей поверхности модели и фиксировали в каждом положении световой поток от нее. Затем суммировали элементарные световые потоки и получали суммарный поток, который создавался бы при освещении поверхности модели всей светящейся поверхностью.

Для имитации излучения от всех поверхностей был использован один осветитель, состоящий из панели с электролампочками в металлическом корпусе, в котором выполнена узкая прямоугольная щель, закрытая матовым стеклом — светящаяся полоса.

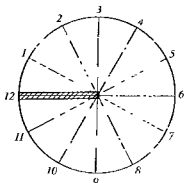


Рис. 82. Светящаяся полоса подсветки

Приемником светового потока служил кремниевый фотоэлемент размером $10 \times 15 \times 1$ с линейной характеристикой в широком диапазоне освещенности и чувствительностью, не зависящей от угла падения луча, вторичный прибор — стандартный люксметр (типа Ю-17, класс точности 1,5). Фотоэлемент укрепляли на координатном устройстве, которое позволяло перемещать его по требуемым осям.

Вся поверхность модели была разбита на 12 зон, симметричных относительно центра модели. Подсветку поверхностей осуществляли по очереди только по оси одной 12-й зоны. Суммарную облученность от всех зон в каждой точке измерения (локальную облученность $H_{\text{лок}}$, мВ) определяли из составленного на основе симметрии модели выражения

$$H_{\text{лок}} = H_{12} + H_6 + 2 \sum_{i=1}^{11} H_i,$$

где H_i — показания фотоэлемента в i -й точке измерения.

При расположении подсветки (светящейся полосы) в 1–6-й и 12-й зонах измерения светового потока на стенах проводили, перемещая датчик по образующим сверху вниз, а при измерении светового потока на своде и зеркале металла — по радиусам от центра к периферии.

Суммарная облученность (мВ · мм²) в каждой зоне поверхности зональная облученность ($H_{\text{зон}}$) — подсчитывалась по формуле:

$$H_{\text{зон}} = \sum_{i=1}^{12} H_{\text{лок}} f_i,$$

где $H_{\text{лок}}$ — локальная облученность в i -й точке измерения данной зоны, мВ; f_i — площадь i -го участка, мм², n — число участков в зоне.

Суммарная облученность каждой поверхности (поверхностная облученность $H_{\text{пов}}$) равна (мВ · мм²):

$$H_{\text{пов}} = 12H_{\text{зон}} + 12 \sum_{i=1}^{11} H_{\text{лок}} f_i.$$

Для создания в камере модели геометрической обстановки, близкой к обстановке в рабочем пространстве печи, в модель были введены три электрода, выполненные из черной бумаги в линейном масштабе модели. Используя симметричность модели, подсвечивали только одну дугу по оси 12-й зоны (рис. 83), а в расчетах учитывали воздействие всех трех дуг.

Облученность внутри камеры по периметру поверхностей модели неравномерная. Можно выделить три группы точек, эквивалентных по степени облученности:

- 1) напротив фазы — точки 4, 8, 12;
- 2) между фазами — точки 2, 6, 10;
- 3) со сдвигом на 30° от фазы — точки 1, 3, 5, 7, 9, 11.

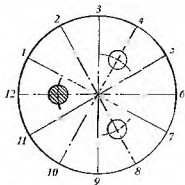


Рис. 83. Схемы подсветки дуги

Соответственно, облученность стен определяли для трех точек по периметру, причем измерения проводили аналогично измерениям без дуги (табл. 81).

81. Формулы для расчета облученности

Облученность	Уровень точки по облучению		
	1	2	3
Локальная	$H_{\text{локл}} = H_1 + H_3 + H_5$	$H_{\text{локл}} = 2H_2 + H_6$	$H_{\text{локл}} = 2H_4 + H_{12}$
Зональная	$H_{\text{зон}} = \sum_{i=1}^{i=6} H_{\text{зона}} \cdot 2i \cdot f_i$	$H_{\text{зон}} = \sum_{i=1}^{i=6} H_{\text{зона}} \cdot 2i \cdot f_i$	$H_{\text{зон}} = \sum_{i=1}^{i=6} H_{\text{зона}} \cdot 2i \cdot f_i$
Поверхностная	$H_{\text{поверх}} = 6H_{\text{локл}}$	$H_{\text{поверх}} = 3H_{\text{зон}}$	$H_{\text{поверх}} = 3H_{\text{зон}}$

Расчет проводили по формуле: $Q_{\text{св}} = JF/\Psi$, где J — показания фотоэлемента, мВ; F — площадь цилиндрического осветителя (длиной a и диаметром e).

Коэффициент i представляет собой отношение мощности дуг к облученности или падающему тепловому потоку на данный участок футеровки q :

$$q = iK_{\alpha} P_{\text{дуг}},$$

где q — облученность или падающий тепловой поток на данный участок футеровки, кВт/м²; $P_{\text{дуг}}$ — суммарная мощность дуг, кВт; i — коэф-

коэффициент облученности (тепловая нагрузка от дуг) получен при моделировании относительной облученности, $1/\text{м}^2$; $K_{\text{д}}$ — коэффициент, учитывающий долю энергии дуги, выделенную в столбе; $K_{\text{д}} \approx 0,9$ [104].

Экспериментальная проверка достоверности результатов светового моделирования показала, что величины, полученные на печи и на модели, имеют одинаковый порядок. Результаты измерений по данным светового моделирования представлены на рис. 84 в виде эиор относительной облученности дугами стен печей емкостью 5 т с разным углом наклона стен по всей высоте от уровня металла.

Относительная облученность стен рассмотрена на трех уровнях набивной футеровки: на верхнем уровне высоты стен, на высоте 200 мм выше ванны (уровень откосов) и на уровне ванны (табл. 82). Эти уровни выбраны как зоны наибольшего износа набивной футеровки стен, что хорошо известно из практики эксплуатации печей.

Из приведенных данных следует, что облученность стен уменьшается по мере удаления их от дуг по высоте печи: наибольшая облучен-

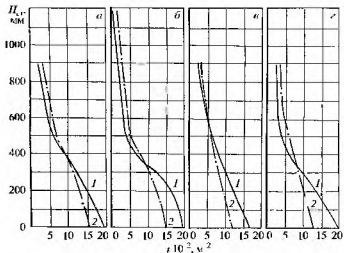


Рис. 84. Эиоры относительной облученности стен дуговых печей

1 — напротив электрода, 2 — напротив промежутков между электродами. Угол наклона стен печи и расстояние между дугами и стеной составляют соответственно:

а — 0° , 550 мм; б — 6° , 475 мм; в — 12° , 625 мм; г — 14° , 498 мм

ность на уровне металла (0,165...0,195), наименьшая на верхнем уровне стен (0,01...0,02). На верхнем уровне облученность определяется высотой стен (см. рис. 84) $H_{ст} = 1335$ мм, $i = 0,01$ м²; при $H_{ст} = 770...985$ мм, $i = 0,02$ м². На уровне 200 мм и на уровне ванны металла, в местах наибольшего износа футеровки, определяющим фактором является расстояние от дуги до стены. На уровне 200 мм выше ванны при расстоянии между дугой и стеной $a = 625$ мм $i = 0,125$ м², а при $a = 475...550$ мм $i = 0,15...0,16$ м². На уровне ванны при $a = 625$ мм $i = 0,165$ м², а при $a = 475...550$ мм $i = 0,19...0,195$ м².

82. Относительная облученность по высоте 5-тонных печей с разным углом наклона стен

Угол наклона стен печи, α°	Относительная облученность i , м ² , на уровне		
	верха печи	200 мм от уровня металла	металла
0	0,02	0,15	0,190
6	0,01	0,16	0,195
12	0,02	0,125	0,165
14	0,02	0,15	0,195

Влияние расстояния a подтверждается и практикой заводов. Так например, набивная футеровка 3-тонных дуговых печей при диаметре электродов 200 мм в течение многих лет успешно эксплуатировалась, здесь производится восстановление стен печи 1 раз в неделю. Без трудностей произошло внедрение набивной футеровки в аналогичных условиях на других заводах. В то же время на 3-тонных печах с диаметром электродов 300 мм набивная футеровка быстро оплавлялась, требовала дополнительной заправки.

Различие облученности стен против фазы и между фазами значительно сокращается по мере удаления от уровня металла по высоте стен (см. рис. 84)

Во всех печах на уровне металла максимальная облученность против фазы и между фазами различается в значениях на 5, а сверху стен — облученности против фазы и между фазами примерно равны. Это говорит о том, что на оплавление футеровки сверху печи облученность (тепловое воздействие дуг) не оказывает существенного влияния; здесь, очевидно, решающим фактором является огнеупорность массы.

На уровне металла и на высоте 200 мм, особенно против фаз, облученность существенно влияет на износ футеровки.

Для сопоставления влияния высоты и угла наклона на облученность стен рассмотрим относительную облученность i на высоте 700 мм выше ванны (табл. 83). Из этих данных видно, что при примерно равной высоте стен $H = 770$ мм и $H = 900$ мм меньшую облученность имели стены с большим углом наклона (при $\alpha = 14^\circ i = 0,022$, при $\alpha = 0^\circ i = 0,032$). Одновременное увеличение высоты H и угла наклона α способствует уменьшению облученности. Сравнение облученности на высоте 700 мм от уровня металла при $H = 1335$ и $\alpha = 6^\circ$ и при $H = 900$ и $\alpha = 14^\circ$ показало, что увеличение высоты стен и их угла наклона дают примерно одинаковый эффект ($i = 0,025$ и $0,022$)

83. Относительная облученность стен печи

Угол наклона стен печи, α , °	Высота стены печи $H_{ст}$, мм	Относительная облученность на уровне 700 мм от уровня металла i , м ⁻²
0	770	0,032
6	1335	0,025
12	985	0,034
14	900	0,022

В связи с этим необходимо еще раз подчеркнуть, что тепловое воздействие дуг на футеровку за счет ее облученности в значительно большей степени проявляется в зонах, прилегающих к уровню жидкого металла и в меньшей степени в верхней части стен печи.

С этой точки зрения важную роль играет расстояние от дуги до стены a и менее существенную — высота стены и угол наклона α .

Для оценки стойкости футеровки использовали модель многослойной стены. С помощью математического моделирования находили распределение температуры по толщине футеровки от горячей до холодной поверхности, определяли координаты места скола, соответствующие наиболее глубокому проникновению температуры 1370°C в толщину стены и также находили общее число сколов при износе рабочего слоя футеровки от начальной до конечной толщины.

В основу методики легла программа расчета на ЭВМ, которая составлена на основании полученных данных светового моделирования, данных энергетического режима, собранных на трех заводах, и допол-

нение к приведенным выше данным, характеризующим геометрию печи (табл. 84).

84. Электрический режим печей с кислой набивной футеровкой

Номер печи (по табл. 80)	Число ступеней	Напряжения на каждой ступени U , В	Рабочие токи на каждой ступени I , А	Мощность на каждой ступени P , кВт	Время работы на каждой ступени, мин
2	12	281	8220	4000	140
		250		3560	
		205		2910	
		225		3200	
		281		4000	
		250		3560	
		205		3910	
		225		3200	
		162		2310	
		147		2060	
		118		1680	
3	4	260	8000	4000	20...30
		260	8000	3800	40...50
4	12	281	8220	4000	60
		250		3550	
		205		2910	
		225		3200	
		281		4000	
		250		3500	
		205		3910	
		225		3200	
		169		2310	
		144		2060	
		118		1680	
		130		1630	

На ЭВМ моделировали участок футеровки с удельной площадью горячей поверхностью, равной 1 м^2 , находящейся в месте начала интенсивного износа футеровки стен. Материал слоев стенки характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , плотностью ρ и теплоемкостью c (табл. 85).

85. Характеристика материала

Материал	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м · °С)	Плотность, ρ , кг/м ³	Теплоемкость c , Вт с/(кг · °С)
Набивная футеровка	$0,815 + 0,00068t_{cp}$	1700	$870 + 0,19t_{cp}$
Шамот	$0,7 + 0,00064t_{cp}$	1900	$865 + 0,21t_{cp}$

Решали основное уравнение теплопроводности для одномерного теплового потока:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \text{ при } 0 < x < \delta; 0 < \tau < \infty,$$

где τ — переменное время нагрева, с; t — переменная температура тела, °С; x — переменная координата по толщине тела, м; $\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$ — температуропроводность, м²/с.

В качестве начального условия принимается распределение температуры по толщине стены к моменту открытия дуг. Условно принято считать, что стена находится в стационарном тепловом состоянии с температурой на горячей поверхности 1300°C .

Граничное условие на наружной поверхности задается как условие теплоотдачи в окружающую среду с температурой $t_{окр} = 20^\circ\text{C}$ за счет естественной конвекции.

В качестве граничного условия на горячей поверхности был задан результирующий поток:

$$q_{грч} = \epsilon_{\phi}(q_{сол} - \sigma_0\theta).$$

где ϵ_{ϕ} — степень черноты горячей поверхности футеровки; $q_{сол}$ — по данным светового моделирования; θ — температурный фактор горячей поверхности футеровки; σ_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Так как температура поверхности моделируемого участка футеровки меняется, величина ϵ_{ϕ} меняется во времени в соответствии с темпе-

ратурой горячей поверхности футеровки, на основании [103] принята зависимость

$$\varepsilon_{\text{ф}} = 1,74 - 0,000625 t_{\text{ср}}; t_{\text{ср}} = 1600 \dots 2000 \text{ К.}$$

Задачу решали для 3–5-тонных дуговых печей при следующих вариантах футеровки стен:

1) кислый набивной рабочий слой без теплоизоляции;

2) кислый набивной рабочий слой с теплоизоляцией из шамота толщиной 65 мм.

Характеристика материалов слоев стены приведена в табл. 85.

Расчеты $q_{\text{вход}}$ проводили для трех печей ДСП с мощностью дуг ($P = 2,9; 2,6; 2,9$ МВт).

При обработке результатов моделирования исходили из предположения, что число сколов от начальной до конечной толщины характеризует стойкость футеровки, т.е. чем больше число сколов, тем выше стойкость. При этом руководствовались тем, что интервал времени (число плавов) между двумя соседними сколами примерно одинаков независимо от толщины футеровки, поскольку скол зависит от способности материала противостоять объемным напряжениям [103].

Результаты моделирования приведены в табл. 86 и на рис. 85.

86. Относительная стойкость набивной футеровки 5-тонных печей

Время воздействия открытых дуг на футеровку, мин	Снижение времени воздействия открытых дуг, разы	Относительная стойкость футеровки, циклы износа	Повышение стойкости футеровки, %
Печь № 2, $P_{\text{вход д}} = 2,9$ МВт			
100	1,0	4	100
60	1,67	7	175
30	3,33	9	225
15	6,67	12	300
10	10,0	14	350
Печь № 3, $P_{\text{вход д}} = 2,6$ МВт			
100	1,0	8	100
60	1,67	10	125
40	2,6	12	150
15	6,67	17	213
10	10,0	19	238

Описание табл. 86

Время воздействия открытых дуг на футеровку, мин	Снижение времени воздействия открытых дуг, разы	Относительная стойкость футеровки, циклы износа	Повышение стойкости футеровки, %
Печь № 4, $P_{\text{вст.д.}} = 2,9 \text{ МВт}$			
80	1	7	100
40	2	9	129
30	2,67	10	143
20	4	11	157
10	8	14	200

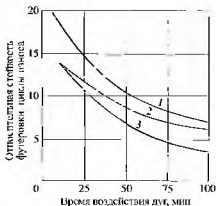


Рис. 85. Зависимость относительной стойкости футеровки 5–6-тонных печей от времени воздействия дуг:

1 — ДС-5М, $P_{\text{вст.д.}} = 2,6 \text{ МВт}$; 2 — ДС-5М, $P_{\text{вст.д.}} = 2,9 \text{ МВт}$,
3 — ДС-6М1, $P_{\text{вст.д.}} = 2,9 \text{ МВт}$

Из этих данных видно, что одним из факторов, определяющих стойкость футеровки, является время воздействия на футеровку открытых дуг. Так, при времени воздействия 10 мин количество циклов износа футеровки было 14...19, а при 100 мин воздействия — 4...8 цик-

лов. Из этого следует, что одним из мероприятий по повышению стойкости футеровки является сокращение времени воздействия открытых дуг.

В этой связи значительный интерес представляет предложенный и внедренный нами на ряде заводов технологический процесс выплавки стали в кислых электропечах с повышенным содержанием кремния в шихте, позволяющий существенно снизить время воздействия на футеровку открытых дуг.

Существенное влияние на стойкость футеровки оказывает также мощность излучения дуг. Из табл. 86 видно, что если при мощности дуг 2,9 МВт число циклов износа футеровки при 10 мин воздействия дуг 14, то на другом заводе — 19 при $P_{\text{изл}}$ 2,6 МВт. Наибольшему числу циклов износа соответствует меньшая мощность дуг при воздействии в течение 100 мин.

При длительном воздействии открытых дуг стойкость футеровки зависит и от геометрии печи, в частности, от расстояния a между дугой и стеной.

При одинаковом времени воздействия дуг (100 мин) и одинаковой мощности дуг (2,9 МВт) число циклов износа футеровки в 2 раза больше (8 циклов), чем в другом случае (4 цикла). По-видимому, это объясняется большим расстоянием от дуг до стен (498 против 475 мм).

Таким образом, исследование показало, что наибольшее влияние на облученность, нагрев и износ футеровки стен электродуговой печи оказывают расстояние между дугой и стеной и время воздействия на футеровку открытых дуг. Последний фактор необходимо учитывать при разработке технологических процессов выплавки стали в кислых электропечах, стремясь к максимальному сокращению продолжительности окислительного и восстановительного периодов и изменению мощности излучения дуг.

Анализ работы дуговых печей с набивной футеровкой показал, что главным фактором, определяющим стойкость набивной футеровки, является своевременное и качественное восстановление ее размеров в процессе эксплуатации. Стойкость монолитной футеровки стен (от замены до замены) на различных заводах колеблется в широких пределах и может отличаться в 50 раз. Например, на одном заводе печи работают без ремонта стен полгода, на другом — до 20 лет.

В значительной степени стойкость футеровки при прочих равных условиях может определяться огнеупорностью массы, зависящей от химического состава массы и прежде всего от содержания в массе оксидов натрия и калия, вносимых жидким стеклом. Например, увеличение содержания в массе оксида натрия на 0,4 % снижает ее огнеупорность на 20°C.

В то же время количество введенного жидкого стекла влияет на прочность футеровки при высоких температурах. При длительном нахождении массы (приготовленной с добавкой жидкого стекла) в этих условиях зерна кварца спекаются расплавленным силикатом и огнеупорная масса упрочняется за счет спекания. Поэтому, чем больше число мелких фракций в зерновой основе массы, тем больше поверхность раздела и тем больше необходимость в жидком стекле для достижения достаточной прочности массы при высоких температурах. Но, учитывая отрицательное влияние жидкого стекла на огнеупорность массы, увеличивать его содержание можно в ограниченных пределах. Чем больше в массе мелкой фракции песка, тем меньше прочность за счет спекания и тем ниже стойкость набивной футеровки.

Стойкость набивной футеровки в значительной степени зависит от правильного выбора зерновой основы — кварцевого песка. Так, при использовании песка не ниже K_1 с огнеупорностью 1760...1770 °С и соответственно огнеупорностью массы 1730...1740 °С в среднем по данным 18 заводов стойкость футеровки составила 6500 плавов, а при использовании полужирного песка с огнеупорностью 1710 °С — 1500 плавов.

Существенное значение для стойкости набивной футеровки стен имеет вместимость печи (рис. 86). Эта зависимость построена по результатам обследования 87 печей. Чем дальше от стен отстоят электроды, тем выше стойкость набивной футеровки. С увеличением номинальной вместимости печи на 1 т стойкость набивной футеровки стен повышается в среднем на 2360 плавов.

Существенно влияет на стойкость футеровки отношение диаметров печи и электродов; например, изменение отношения 4:1 до 3,5:1 повышает коэффициент излучения на 11 %.

Существенное значение имеет наклон электродов. Их необходимо устанавливать в электрододержателях так, чтобы они имели наклон к

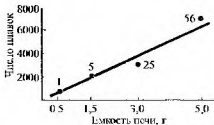


Рис. 86. Зависимость стойкости набивной футеровки стен от емкости печи (цифры у точек — число обследованных печей)

центру печи либо были установлены строго вертикально. Нельзя допускать наклон электродов в сторону стен.

Эта закономерность подтверждается результатами исследований тепловой работы кислой набивной футеровки стен дуговых сталеплавильных печей вместимостью 5...6 т в зависимости от геометрии печи, выполненных методом светового моделирования на физических моделях.

Из геометрических факторов, как уже отмечено выше, наибольшее влияние на облученность, нагрев и износ футеровки стен при прочих равных условиях оказывает расстояние между дугой и стеной. Влияние этого фактора при одинаковой тепловой мощности дуги подтверждается практикой заводов.

Из геометрических факторов на стойкость футеровки влияет также угол наклона стен: в печах с цилиндрическим кожухом средняя стойкость футеровки составила 4000 плавов, а с коническим в аналогичных условиях — 5700 плавов. Однако удельный расход электроэнергии в последних существенно выше (2714 против 2531 МДж/т).

На стойкость футеровки влияет окисленность металла, которая характеризуется содержанием углерода в выплавляемой стали. Так как $[C] \cdot [O] = \text{const}$, то чем меньше в стали углерода, тем больше, соответственно, кислорода и тем больше химическое воздействие металла и шлака на кислую футеровку (рис. 87).

На прочность футеровки при ее спекании положительно влияет высокая температура выпуска стали (при условии высокой огнеупорности масе). Зависимость стойкости футеровки N от температуры t (в пределах 1625...1710 °С) выпуска стали может быть выражена уравнением, полученным методом наименьших квадратов:

$$N = -178\,000 + 110,24t$$

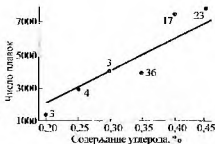


Рис. 87. Зависимость стойкости набивной футеровки стен дуговых печей от среднего содержания углерода в выплавляемых сталях (цифры у точек — число обследованных пещей)

Так, например, при $t = 1645$ °С стойкость футеровки $N = 3345$ плавов, а при $t = 1695$ °С $N = 8857$ плавов. Эти данные получены на 22 заводах, на которых сталь выплавляется в кислых дуговых электропечах с набивной футеровкой. Положительное влияние температуры выпуска стали объясняется тем, что набивная масса в отличие от штучных огнеупоров не подвергается предварительному обжигу, а спекание футеровки происходит непосредственно в печи во время плавки (рис. 88).

Существенное влияние оказывает отношение массы плавки к объему печи (при значении этого показателя 1,0...1,3 износ футеровки значительно меньше, чем при $\sim 1,4$). Стойкость футеровки при выплавке стали по одношлаковой технологии значительно выше, чем при выплавке стали по двухшлаковой технологии. Оказывает также влияние электрический режим плавки и ряд других факторов. Одним из способов повышения стойкости футеровки является применение пенных шлаков.

Большое влияние на стойкость футеровки оказывает перегруз печей, который, как правило, не должен превышать 40 % номинальной емкости. Однако в ряде случаев перегруз достигает 2,7 и более раз, при этом плавка ведется на стенах печи, увеличивается ее длительность и футеровка стен оплавливается. Также снижает стойкость футеровки неполный слив металла и шлака из печи после плавки, нерегулярная заправка откосов и подины.

Большое влияние на стойкость набивной футеровки оказывает газопроницаемость смеси: с понижением газопроницаемости разгар футеровки увеличивается. При понижении газопроницаемости на каждые 10 единиц (от 180 и ниже) толщина стен через 4 суток работы печи уменьшается в среднем на 50 мм. На стойкость футеровки влияет также прочность смеси на сжатие: с уменьшением прочности на сжатие стойкость футеровки понижается (рис. 89). Влияние газопроницаемости и прочности смеси на сжатие объясняется, по-видимому, тем, что разрушение футеровки стен происходит не только в результате воздействия высокой температуры, но и в результате давления газов, находящегося в атмосфере печи, которое возрастает с повышением температуры в рабочем пространстве печи.

В большинстве случаев применение набивной футеровки обеспечивает высокую стойкость футеровки — от 5000 до 15 000 плавов до капитального ремонта. На ряде заводов капитальный ремонт набивной футеровки производят только из-за необходимости замены кожуха печи, т.е. механического оборудования.

В результате применения набивной футеровки стен печей взамен кирпичной снижается трудоемкость ремонтных работ и, соответственно, фонд заработной платы футеровщиков, высвобождаются мощности огнеупорных

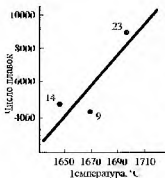


Рис. 88. Зависимость стойкости набивной футеровки стен от температуры выпуска стали (цифры у точек — число обследованных печей)

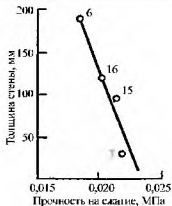


Рис. 89. Влияние прочности на сжатие смеси для холодной заправки на стойкость набивной футеровки 5-тонной кислой дуговой печи

заводов, улучшается организация производства в литейных цехах за счет бесперебойного снабжения формовочных отделений жидким металлом, сокращается расход dinasового кирпича (например, для 5-тонной печи — до 250 т/год), сокращаются в сталепитательных цехах площади для хранения огнеупоров, себестоимость 1 т литья снижается на 0,5 %.

Для организации производства огнеупорных масс не требуется дополнительных капиталовложений.

Глава 5

КОНСТРУКЦИЯ И ФУТЕРОВКА ИНДУКЦИОННЫХ СТАЛЕПЛАВИТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Индукционные печи имеют известные преимущества перед дуговыми печами: отсутствие выбросов в атмосферу твердых частиц, низкий угар, отсутствие шума

5.1. КОНСТРУКЦИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

Конструкция индукционной печи приведена на рис. 90.

Индукционная печь — это электропечь, работающая по принципу трансформатора, у которого первичной обмоткой является водоохлаждаемая катушка-индуктор, а вторичной обмоткой — находящийся в тигле металл. Нагрев и расплавление металла происходит за счет протекающих в нем токов, которые возникают под воздействием электромагнитного поля, создаваемого индуктором. При этом возникают также электродинамические силы, которые обеспечивают интенсивное перемешивание металла и, соответственно, равномерность температуры и однородность расплавленного металла.

ГОСТ 12.2.007.9—93 «Безопасность электротермического оборудования» разделяет оборудование по частоте тока следующим образом:

- низкочастотное оборудование, рабочая частота которого ниже или равна 60 Гц;
- среднечастотное оборудование, рабочая частота которого выше 60 Гц, но ниже или равна 10 кГц;
- высокочастотное оборудование, рабочая частота которого выше 10 кГц, но ниже или равна 300 МГц;
- сверхвысокочастотное оборудование, рабочая частота которого выше 300 МГц.

Индукционные сталеплавильные печи работают в средних частотах, как правило, в диапазоне 100...3000 Гц. В них выплавляют широкий сортамент углеродистых и легированных сталей.

В мире выпускают индукционные среднечастотные тигельные сталеплавильные печи вместимостью от 0,25 кг до 100 т.

Во многих случаях в комплект оборудования индукционной печи входит один набор электрооборудования и два тигля (рис. 91). При такой схеме расположения оборудования в одной печи идет процесс

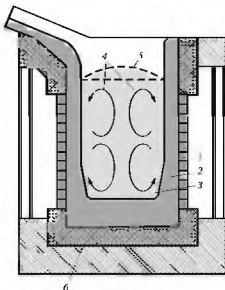


Рис. 90. Схема конструкции индукционной печи:

1 — индуктор; 2 — набивная масса; 3 — расплав; 4 — мгновенный поток, перемещающий расплав; 5 — максимальный уровень расплава; 6 — термоизоляция

плавки, другая печь находится в режиме выдержки. Обе печи могут работать одновременно в режиме плавки при 50% мощности. Возможны также работы по футеровке одной печи, в то время как в другой печи происходит спекание.

Индукционные сталеплавильные печи, как правило, имеют следующие технические характеристики:

- производительность 0,13...40,0 т/ч;
- мощность преобразователя 10...20 000 кВт;
- удельная мощность 700...1000 кВт/т;
- номинальное напряжение питающей сети:
 - трансформаторов 380...10 000 В;
 - преобразователей 380...10 000 В;
 - цепей управления 24, 220 В;

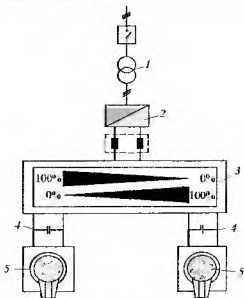


Рис. 91. Конструкции двухтрубной индукционной печи:

1 — трансформатор; 2 — выпрямитель; 3 — преобразователь; 4 — конденсаторные батареи; 5 — печи (тиглы)

— $\cos \varphi$ — не менее 0,95;

— удельный расход электроэнергии по расплавлению 520...1150 кВт · ч/т. (Согласно ГОСТ 28721-90 «Печи индукционные тигельные средней частоты со статическим преобразователем для плавки ферритовой стали» максимально допустимый удельный расход электрической энергии на тонну выплавленной стали для печей номинальной мощностью 160...4800 кВт и номинальной массой полезной шихты 100...10 000 кг должен быть в пределах 600...720 кВт · ч);

— КПД преобразователя 0,92...0,975;

— электрический КПД печи на твердой завалке — до 0,95;

— расход охлаждающей технической воды 4,0...80,0 м³/ч;

— давление воды в системе водяного охлаждения 0,2...0,6 МПа.

Нормальная работа индукционных сталеплавильных печей в значительной степени зависит от качества охлаждающей воды, к которой предъявляются следующие требования (табл. 87).

87. Требования к охлаждающей воде

Наименование требований	Номера предприятий — изготовителей печей				
	1	2	3	4	5
Содержание взвешенных веществ, мг/л, не более	10	10	10	10	10
Общая жесткость, мг-экв/л, не более	3,5	3	3	4	4
Карбонатная жесткость, мг-экв/л	1,5...2,5	Не более 5	—	—	—
pH	7,0...8,5	7,0...8,0	6,5...8,5	5,0...7,5	5,0...7,5
Свободная углекислота (CO ₂), мг/л, не более	12	Не должно быть	—	4	4
Окисляемость перманганатная, мг/л, не более (по содержанию кислорода)	4	3	—	—	—
Удельное электропроводное, Ом/см, при t = 20 °C, не менее	4000	10 000	4000	20 000	20 000
Хлориды (Cl ₂), мг/л, не более	10	Активно-го хлора не должно быть	—	10	4
Аммиак (NH ₃), мг/л, не более	4	—	—	4	2
Сульфаты (SO ₄), мг/л, не более	250	—	—	—	—

Продолжение табл. 87

Наименование требований	Номера предприятий — изготовителей печей				
	1	2	3	4	5
Нитраты (NO_2), мг/л, не более	30			2	Нитратов не должно быть
Железо общее (Fe), мг/л, не более	0,2	0,03		0,2	0,2
Содержание масел	Не должно быть			Не должно быть	
Содержание смолообразующих продуктов	Не должно быть			Не должно быть	
Аммоний (NH_4^+)	Не должно быть				
Нитраты (NO_2)	Не должно быть				
Содержание примесей, образующих осадок, мг/л	—	Не должно быть	10		
Содержание нефтепродуктов		—		Не должно быть	
Содержание примесей, вызывающих коррозию металлов и порчу изоляции				Не должно быть	
Температура охлаждающей воды, входящей в элементы электропечей, °С	Не ниже 15, но не выше 25 при прямой или оборотной системе, не выше 40 °С при двухконтурной системе	15...25	18...30	15...20	

Описание табл. 87

Наименование требований	Номера предприятий — изготовителей печей				
	1	2	3	4	5
Температура воды на выходе из элементов электропечей, °С, не более	50 при прямой или обратной системе, 65 при двухконтурной системе, из индуктора 65, при замкнутом водоохлаждении 72	35...50	40 (из индуктора 60)	40...50	—
Давление охлаждающей воды в подводящей системе, МПа	0,3...0,6	0,4...0,6	Не более 0,4	0,25...0,4	—
Суммарный расход технической воды, м ³ /ч	—	—	—	10	—

Температура охлаждающей воды не должна быть ниже температуры окружающего воздуха более чем на 15 °С (во избежание появления росы).

Индукционные сталеплавильные печи могут работать при следующих условиях эксплуатации:

- закрытое помещение;
- высота над уровнем моря не более 1000 м;
- температура окружающего воздуха 5...40 °С;
- температура охлаждающей воды 5...25 °С;
- отсутствие в воздухе агрессивных газов и примесей, разрушающих изоляцию и металлы;
- отсутствие резких толчков, ударов и вибрации;
- относительная влажность окружающей среды при температуре 20 °С до 90 %, при температуре 25...30 °С до 80 %, при температуре 40 °С до 50 %;
- окружающая среда должна быть невзрывоопасной.

Комплект оборудования индукционной сталеплавильной печи включает в себя следующие составляющие: индукционная плавильная печь (одна или две), источник питания — преобразователь частоты, блок конденсаторов, система охлаждения (рис. 92), токоподвод, пульт дистанционного управления, гидропривод, шинный провод, узел контроля охлаждающей воды, система контроля состояния футеровки, переключатель напряжения, выпрямитель переменного тока, трансформатор, система управления, шкаф управления, приспособление для набивки футеровки, шаблон, маслостановная установка, устройство ввода высокого напряжения, гибкие связи, механизм наклона печи, вспомогательное оборудование, теплообменник, система весов.

В последние годы (2000–2008 гг.) проведены большие работы по развитию конструкции индукционных среднечастотных печей. Много сделано, например, в Российской электротехнологической компании «РЭЛТЕК», г. Екатеринбург (совместно с Уральским Государственным техническим университетом — Уральским политехническим институтом).

Индукционные печи, выпускаемые на этом предприятии, имеют корпус из коррозионно-стойкой стали; индуктор из прямоугольной медной трубки, толщина стенки которой выбрана для обеспечения максимальной прочности и минимальных электротехнических потерь,

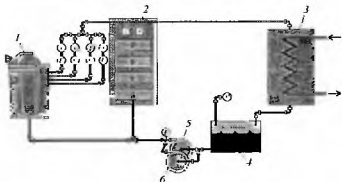


Рис. 92. Система охлаждения индукционной печи:

1 — печь; 2 — батарея конденсаторов; 3 — теплообменник; 4 — аварийная установка подачи воды; 5 — насос; 6 — резервный насос; F — датчик расхода воды; T — датчик температуры воды; P — датчик давления

при этом индуктор выполняется в виде отдельных секций, к которым подводится управляемый поток энергии (рис. 93). Секции индуктора намотаны в разных направлениях, каждый виток катушки закреплен специальными установочными фиксаторами. Вокруг индуктора установлены подохлаждаемые магнитопроводы.

В печах вместимостью 6...16 т предусмотрено взвешивающее устройство. Витки индуктора зафиксированы на вертикальных изоляционных стойках. Поддувная часть печи выполнена из литого армированного жаропрочного бетона. Для снижения тепловых потерь над тиглем установлена крышка с гидромеханизмом поворота. Имеется также гидромеханизм наклона печи. Существенной особенностью конструкции печей этого предприятия является то, что система питания позволяет перераспределять мощность по секциям индуктора, другими словами, сфокусировать мощность в отдельных зонах тигра печи и обеспечить различные виды активного перемешивания металла.

Данная система электропитания позволяет реализовать двухчастотный режим плавки, при котором плавку металла ведут на повышенных частотах, а при перегреве расплава, когда идет процесс науглерожива-

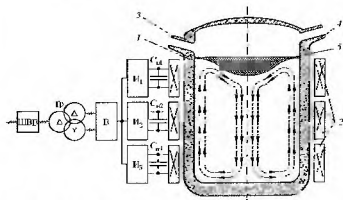


Рис. 93. Схема индукционной тигельной печи средней частоты с трехсекционным индуктором и автономным питанием каждой секции [109]:

1 — тигель, 2 — секции индуктора, 3 — желоб для слива шлака; 4 — желоб для слива металла, 5 — шлаковая лунка, И₁, И₂, И₃ — секции преобразователя; В — выпрямитель, C_{c1}, C_{c2}, C_{c3} — блок конденсаторов

ния и требуется активное перемешивание расплава по всему объему ванны, частоту питающего тока снижают [105].

Система электропитания токами двух частот обеспечивает возможность управления параметрами электромагнитного поля, а также осуществляет регулирование мощности печи и уровней токов средней и низкой частоты на разных стадиях плавки. Предложен также метод многопостовой плавки одновременно в нескольких печах (в сочетании с двухчастотной плавкой) [106]. Системы электропитания, построенные на мощных, полностью управляемых полупроводниковых приборах, позволяют расширить технологические возможности управления процессом плавки металла, используя метод двух частот и метод зонного фокусирования мощности.

В системах электропитания используют тиристоры и силовые транзисторные модули.

Компанией «РЭЛТЕК» в области систем электропитания печей средней частоты предложены фазоинверсные преобразователи частоты, которые позволяют, максимально используя оборудование индукционных тигельных печей промышленной частоты, реализовать двухчастотный метод плавки [107].

На основе среднечастотной тигельной печи создан многофункциональный плавильный агрегат, в котором плавку осуществляют в условиях вращения расплава в плавильной камере (рис. 94) [108]. В этом агрегате в дополнение к индукционной печи размещен ряд устройств. Вращение расплава обеспечивается МГД-устройством.

Подобного рода агрегаты называют турбоиндукционными среднечастотными печами, в которых сочетаются преимущества индукционной плавки металла с возможностью активного вовлечения шлака в расплав за счет создания турбулентного движения расплава с обратным мениском. В этом случае находящийся на поверхности расплава шлак активно вовлекается в него и взаимодействует с расплавом. Регулирование частоты электромагнитного поля, управление силовым воздействием на расплав металла и конвективными потоками металла обеспечиваются специальными системами электропитания, которые строятся на основе многоэнергочанальных полупроводниковых преобразователей частоты, работающих в режиме формирования двухчастотного тока в обмотках индукционных печей.

Компания «РЭЛТЕК» разработала ряд индукционных плавильных агрегатов с емкостью тигля от 0,25 до 30 кг по стали [110]. Источником питания является тиристорный полупроводниковый генератор. Для тепловой защиты индуктора и реализации различных способов разлива металла специально разработана теплоизоляционная конструкция из керамики, выполненная в виде раковины и собранная из

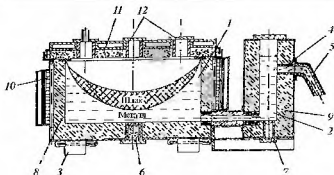


Рис. 94. Многофункциональный плавильный агрегат [108]:

1 — плавильная камера, 2 — дополнительная камера, 3 — МГД-устройство, 4, 5 — лоток и металлопровод для слива металла в ковш, 6 — донная решетка для слива металла в ковш, 7 — донная решетка для слива шлака в ковш, 8, 9 — футеровка, 10 — индуктор; 11, 12 — крышка с отверстиями

фасонных керамических деталей, внутри которой устанавливается тигель.

Малые плавильно-литейные системы с емкостью печей до 1 кг выполняют конструктивно объединенными с литейными системами. В ряде конструкций предусмотрен переворот плавильного узла и опоки с вакуумированием пространства под литейной формой. Другим примером исполнения объединенной плавильно-литейной системы являются центробежные установки. Плавильный модуль малой емкости может выполняться как отдельный агрегат, в том числе с поворотным тиглем, размещенным в индукторе или с лифтовой системой перемещения индуктора относительно стационарного тигля, на который опускается на время плавки индуктор [110]. Плавильная установка малой емкости может иметь одно- или двухпустовое исполнение. При двухпустовом исполнении плавка металла может производиться одновременно в двух тиглях.

В ряде конструкций компания «РЭЛТЕК» применяет, кроме основного канала электропитания, дополнительный канал электропитания малой мощности, состоящий из преобразователя частоты и блока конденсаторов. Установленная мощность оборудования вспомогательного канала электропитания составляет $\leq 10\%$ от мощности основного канала. Особенно эффективна двухпустовая плавка с распределитель-

ной системой электропитания на основе мультиэнергетического преобразователя частоты, в котором энергия подводится по одному каналу, а отводится по нескольким с возможностью независимого плавного перераспределения потоков энергии по каждому из них. При такой системе электропитания отсутствует сложное переключающее устройство печей.

Компания «РЭЛТЕК» производит системы двухпостовой одновременной плавки с распределительной системой электропитания. Плавильные установки снабжены цифровыми системами управления. Контроль процесса плавки обеспечивается компьютерной системой, осуществляющей рациональную стыковку всех видов технологических операций [111].

Некоторые особенности конструкции индукционных среднечастотных сталеплавильных печей производства фирмы АВР (Германия): открытая конструкция корпуса; вибродемпфирующая конструкция магнитопровода повышенной жесткости; верхнее бетонное кольцо как отдельный элемент конструкции; транзисторные преобразователи; современные тиристорные преобразователи с четырехтактным резонансным контуром, защищенные от коротких замыканий; непрерывное регулирование мощности; бесступенчатое свободное распределение энергии между двумя печами; цифровая система управления преобразователем.

С точки зрения конструкции среднечастотных индукционных печей одной из ведущих мировых фирм является фирма EGES (Турция) [112]. Здесь разработана такая конструкция индуктора, которая обеспечивает постоянную мощность во все периоды плавки.

Компоновка комплекса обеспечивает минимальную протяженность токопроводов, а их сечение позволяет потреблять минимальное количество энергии.

Индукторы фирмы EGES имеют один или два охлаждающих витка у основания. Число витков зависит от размера печи. Кроме того, периферийные части индуктора механически связаны с соседними, что обеспечивает большую безымянность от термических воздействий. Этому же способствует применение специальных изоляционных материалов. Эта конструкция предотвращает механическую деформацию индуктора. Особенно это актуально для сталеплавильных печей из-за возможного термического расширения шаблона во время спекания, что может привести к деформации нижней части индуктора. Например, в некоторых печах донное соединение индуктора после нескольких месяцев работы начинает контактировать с близлежащим магнитопроводом. Смещение магнитопровода для предотвращения соприкосновения витка с магнитопроводом может увеличить срок эксплуатации индуктора, но не на много. Кроме того, это позволяет ремонтировать индуктор, извлекая его из печи.

Фирма EGES исключила возможную деформацию витков индуктора, добавив дополнительные охлаждающие витки в донной части, жестко соединив их с соседними витками. Также были применены специальные конические жаропрочные кирпичи в донной части вместо заливного монолита, поскольку донный бетон необходимо было время от времени ломать и затем снова формовать и отливать при замене индуктора, например из-за проникновения металла. Еще один существенный недостаток цельнолитого конического бетонного дна — это необходимость устранения возможной повышенной влажности.

Для верхней части печей фирма EGES применяет жаропрочный бетонный элемент со стальной рамой особенно на печах большого объема, где футеровочный материал печи не охлаждается в верхней бетонной части, несмотря на охлаждение в области индуктора.

Разработчики фирмы добавили дополнительное охлаждение в верхней бетонной части, присоединив верхнюю часть к печи таким образом, чтобы она прижималась к индуктору, а не к стальной раме. Кроме того, был применен термический нагрев верхней бетонной части, чтобы удалить влагу.

В плавильных системах водоохлаждаемые кабели имеют отдельную систему охлаждения. После длительной работы печи, если появляется какое-либо повреждение в водоохлаждаемом кабеле, его можно заменить менее чем за 10 мин без нарушения и остановки охлаждения индуктора печи. Это обеспечивает проведение ремонта и замены кабелей без ограничения по времени, с соблюдением всех требований по технике безопасности.

Печи фирмы EGES отличаются оригинальной конструкцией индуктора, монолитно помещенного в огнеупорный бетон на глиноземной основе. Испытания герметичности индуктора проводятся при давлении 3,0...3,5 МПа (30...35 атм), т.е. в 5–6 раз выше рабочего давления (при норме 1,5 значения рабочего давления). На печах применяются преобразователи с контуром параллельного резонанса; автоматическая система, обеспечивающая постоянную мощность. Печи оснащены пультом дистанционного компьютерного управления преобразователем и гидросистемой; управляемыми выпрямителями на основе тиристоров; батареей конденсаторов преобразователей более 600 кВт, устанавливаемой под платформу рядом с печью; печи оснащены электронным индикатором утечки тока; применяется модульная конструкция электронного блока; обеспечивается постоянный контроль температуры и расхода воды в системе охлаждения.

Также одной из ведущих фирм по производству индукционных сталеплавильных среднечастотных печей является фирма Inductotherm (Англия). Эта фирма выпускает, например, 25-тонные индукционные

сталеплавильные печи в стальном корпусе, работающие на частоте 180 Гц [113]. Комплект оборудования 25-тонной печи включает в себя два тигля, источник питания и систему управления. В автоматическом режиме регулируется мощность.

Одна из характерных особенностей такой установки — возможность непрерывного питания двух печей в режиме перекрестной плавки. Источник питания адаптирован для передового компьютерного мониторинга и управления, что расширяет возможности и повышает технические характеристики системы, а единая панель управления, использующая возможности современных технологий, обеспечивает абсолютную надежность в процессе плавки. Механизированы процессы футеровки печи, выбивки футеровки, снятия шлака, загрузки шихты. Система управления ведет 100 %-ный учет материалов, прошедших через плавильные печи.

Многолетний опыт производства индукционных среднечастотных сталеплавильных печей имеет Новозыбковский завод «Индуктор» (г. Новозыбков Брянской области). В последние годы здесь также проведен ряд усовершенствований конструкции печей [114]. Так, верхняя теплоизоляционная глыба, ранее изготавливаемая из набора абразивных плит, теперь цельнозаливная из высокоглиноземистых цементов, армированная иглами мелкой проволоки из коррозионно-стойкой стали.

Подина выполняется из быстросменного блока, предварительно изготовленного в отдельной форме и состоит из двух половин, материал — высокоглиноземистые цементы. Индуктор дополнительно изолируется лентой, пропитанной кремнеорганическим лаком и эмалью. Проводится стяжка витков индуктора продольными шпильками, что исключает вибрацию и межвитковые замыкания в процессе эксплуатации. Шкаф управления совмещен с пультом дистанционного управления. В целях диагностики состояния футеровки и изоляции индуктора применен специальный контроллер. Для контроля охлаждающей воды ртутные датчики заменены на терморезисторные, а в тиристорном преобразователе частоты применены силовые модули.

Источниками питания для индукционных печей, как правило, являются статические преобразователи частоты — тиристорные или транзисторные [115]. Преобразователь преобразует трехфазный или шестифазный ток промышленной частоты в переменный однофазный ток средней частоты.

Тиристорные преобразователи частоты работают на параллельный колебательный контур, образованный индуктором и компенсирующим конденсатором. При мощности свыше 1600 кВт напряжение на индукторе может достигать 2000 В.

Транзисторные преобразователи могут работать как на параллельный, так и на последовательный колебательный контур.

Большинство выпускаемых до недавнего времени тиристорных преобразователей было собрано по принципиальной схеме параллельного инвертора тока. В настоящий момент разрабатывается резонансный инвертор напряжения, что позволит отказаться от сглаживающего реактора, снизить тем самым массу и уменьшить габариты преобразователя.

Преобразователи частоты могут быть укомплектованы по выбору заказчика двумя вариантами системы управления:

- аналоговым контроллером — в современном конструктивном исполнении с применением современных электрических компонентов;
- программируемым контроллером на базе микропроцессора Texas instrument

Применение микропроцессорной системы управления повышает функциональные возможности преобразователей, прежде всего за счет упрощения наладки, повышения надежности.

Все источники имеют водяное охлаждение. Допускается применение воды из заводской магистрали или оборотной воды.

В последнее время все больший спрос находят водо-водяные теплообменники, в которых контур охлаждения преобразователя заполняется дистиллированной водой [115].

Система электропитания, применяемая, например фирмой АВР, состоит из следующих компонентов: блок питания (питание системы электропитания и питание вспомогательных приводов), масляный насос, устройство мониторинга охлаждающей воды, конденсаторы, система мониторинга изоляции, выключатель заземления, автоматическое ограничение нагрузки. Преобразователи для мощности < 1 МВт спроектированы по модульному принципу, когда каждый модуль состоит из выпрямителя и инвертора. Для уровня мощности > 1 МВт используются тиристорные преобразователи частоты. Оба типа преобразователей водоохлаждаемые и имеют общую с печью и конденсаторным блоком цепь охлаждения. Мощность одного источника питания распределяется между двумя или несколькими печами.

В преобразователе с помощью трехфазного мостового выпрямителя и сглаживающего дросселя вырабатывается постоянный ток. Затем этот постоянный ток в расположенном далее коммутируемом инверторе преобразуется в переменный ток с прямоугольной формой колебаний и соответствующей частотой. На рис. 95 показана электрическая схема статического преобразователя производства фирмы АВР.

Преобразователь компании «РЭЛТЕК» представляет собой шкаф с выходными шинами, охлаждается чаще всего дистиллированной водой. Управление преобразователем осуществляется с передней панели, на которую вынесены кнопки управления, лампы индикации и приборы контроля. В диапазоне частот 250...500 Гц используются статиче-

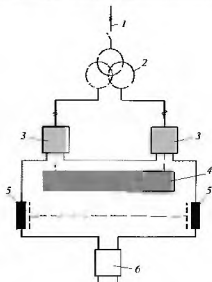


Рис. 95. Электрическая схема статического преобразователя фирмы AVR:

1 — высоковольтный автоматический выключатель, 2 — высоковольтный трансформатор выпрямителя, 3 — выпрямитель, 4 — электроника управления, 5 — сглаживающие дроссели, 6 — инвертор

ские преобразователи частоты с управляемыми выпрямителями и инверторами тока параллельного типа, собранными на тиристорах. Составными частями силовой схемы тиристорного преобразователя являются: автоматические выключатели, ограничители перенапряжений, два выпрямителя, сглаживающие реакторы, два инвертора, пусковые импульсные устройства. Компанией «РЭЛТЕК» разработаны несколько серий преобразователей частоты, которые выполняются по разным схемотехническим решениям на основе силовых однооперационных тиристоров. Одна из серий охватывает широкий спектр исполнений по мощности 160...10 000 кВт и частоте 0,25...4,0 кГц.

В зависимости от мощности в преобразователях используются 6-, 12- или 24-фазные управляемые выпрямители, имеющие достаточно высокие энергетические характеристики и обеспечивающие широкий

диапазон регулирования мощности. Для двухфазовой среднечастотной плавки металлов преобразователи строятся по схеме многофазных инверторов, питание которых осуществляется от общего выпрямителя. Схема выпрямления зависит от мощности преобразователя, а инвертор строится по двухфазовой схеме.

Преобразователи оснащены системами:

- внутренней самодиагностики и защиты;
- многоконтурного автоматического регулирования;
- дистанционного управления и регулирования;
- отображения параметров преобразователя.

Высокий КПД (не ниже 0,95). Охлаждение — водяное, двухконтурное.

Преобразователи фирмы EGES работают по принципу парциального резонанса, при уровне самой высокой мощности тиристоры используют около половины максимально допустимого тока. За работой преобразователя установлен электронный контроль.

На печах фирмы EGES обеспечивается полная постоянная мощность с момента загрузки. Постоянная мощность обеспечивается системой автоматически, без вмешательства оператора, даже при значительном изменении напряжения (минус 20 %, плюс 15 %). Общий выход по энергии выше 95 %. Регулировка мощности при необходимости производится при помощи программируемого логического контроллера. При выключении преобразователя сначала плавно понижается мощность, а затем выключается система (мягкая остановка). Печи оснащены электронным индикатором утечки тока на землю с регулируемой чувствительностью для постоянного контроля уровня утечки в системе.

В преобразователях производства предприятия «Электротехнология» (г. Екатеринбург) установлены электрические реле протока; имеются резервные насосы, включающиеся автоматически при аварийной остановке основных насосов; преобразователи защищены на входе цепи подавления перенапряжения.

На рис. 96 показана электрическая схема преобразователя фирмы OTTO JUNKER

Выпрямители для индукционных печей также, как правило, управляются тиристорами. В шкафу выпрямителя устанавливается система защиты от превышения напряжения.

Система охлаждения преобразователя представляет собой замкнутую систему, использующую деионизированную воду. Преобразователь охлаждается при помощи охлаждающей воды печи через водяной теплообменник пластинчатого типа. Могут применяться также газовые охладители. Катушка индуктора может охлаждаться следующими способами: при помощи градирни испарительного типа (открытый контур), при

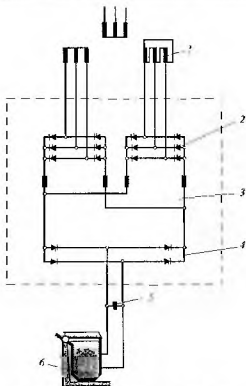


Рис. 96. Электрическая схема статического преобразователя фирмы OTTO JUNKER:

- 1 — трансформатор, 2 — выпрямитель, 3 — промежуточный контур,
4 — инвертор, 5 — конденсатор; 6 — печь

помощи воздушно/водообменника вентиляторного/радиаторного типа (замкнутый контур), при помощи водяного радиатора типа «Балтимор» (замкнутый контур), при помощи комбинирования градириет испарительного типа и водяного теплообменника пластинчатого типа (замкну-

тый контур). Теплообменник предназначен для обеспечения обмена тепла между рабочей жидкостью и охлаждающей водой в двухконтурной системе охлаждения. Конденсаторная батарея предназначена для компенсации реактивной мощности индукционных печей, конденсаторы также имеют водяное охлаждение, как правило, двухконтурное с использованием теплообменников.

Применение замкнутой системы охлаждения с теплообменником целесообразнее, чем система от общей сети, так как химически чистая вода внутреннего контура обеспечивает длительную надежную работу элементов комплекса и требует менее трудоемкого профилактического ухода, необходимость которого вызвана отложением солей на стенках охлаждающей системы.

Кроме того, замкнутая система позволяет вести контроль качества охлаждающей воды, при необходимости повышать удельное электрическое сопротивление и, таким образом, позволяет избежать серьезных осложнений, которые могут возникнуть при появлении в воде электролитических материалов.

Для индукционных печей чаще всего применяется водяное охлаждение элементов оборудования (индуктора, преобразователя, конденсаторов, гибких кабелей и др.). Системы водоснабжения следующие: прямоточная, оборотная и двухконтурная (состоящая из внутреннего замкнутого контура охлаждения элементов электропечи с закрытым охлаждением воды в теплообменном аппарате, и внешнего контура, выполненного в зависимости от конкретных условий потребителя).

В системе водяного охлаждения устанавливают реле и термодатчики для контроля протока, давления и температуры охлаждающей воды.

Система управления индукционной среднечастотной печью может включать в себя следующие функции: отслеживание всех состояний печи; показ информации на экране; управление процессами плавки, выдержки, спекания и холодного старта; расчет шихты; запись нарушений процесса; связь с периферийными устройствами; обслуживание по модемной связи; анализ состояния футеровки; автоматическое поддержание температурного режима с выдачей информации, точное определение энергии перегрева и расчет подачи энергии, вычисление требуемых материалов для коррекции химического состава, включает аварийный сигнал.

Основой системы управления является программируемый логический контроллер. Центральный пульт управления представляет собой пылезащищенный электротехнический шкаф. Для управления, контроля и протоколирования информации используется плавильный процессор, который соединен с интерфейсами, с системой управления статическим преобразователем частоты, весами тигельной печи, про-

граммируемым логическим контроллером печи, устройством для измерения температуры (термопарой погружения), дополнительными терминалами управления, спектрометром, нестандартной системой управления процессом, модемом для передачи данных, громкоговорятелями для голосового выхода.

Плавильный процессор является комплексным блоком управления, который встраивается сзади в дверную панель щита управления. Спереди находится жидкокристаллический экран для вывода данных, справа — герметичная клавиатура. Под экраном располагается дисковод с защищающим от пыли покрытием, ключ блокировки клавиатуры и порт для внешней клавиатуры. Устройство имеет различные печатные платы, к которым подключаются периферийные устройства.

Для надежной работы индукционной сталеплавильной печи важную роль играет качество изготовления водосохлаждаемого индуктора (рис. 97). В данной книге обобщен опыт изготовления индукторов на Новозыбковском заводе «Индуктор», предприятиях «РЭЛТЕК» и «Электротехнология» (Россия), фирмах OTTO JUNKER и AWP (Германия), EGES (Турция) [116].

Существенным фактором качественного изготовления индукторов является выделение этого процесса в самостоятельное производство. Отдельные цеха по производству индукторов имеются на Новозыбковском заводе «Индуктор» и фирме OTTO JUNKER.

На указанных предприятиях, кроме Новозыбковского завода, индукторы индукционных плавильных печей изготавливают из полого медного профиля прямоугольного сечения, на Новозыбковском заводе «Индуктор» получают крупную полую трубу, и на специальной установке про-

филь превращают в прямоугольный. Этот вариант экономичнее, так как полая медная труба дешевле прямоугольного профиля. Поступающую медь подвергают отжигу до и после профилирования для снятия внутренних напряжений.

На фирме EGES внутреннюю поверхность катушки индуктора покрывают специальной обмазкой, которая выдерживает температуру до 1800 °С.

Важнейшей технологической операцией изготовления индуктора является его навивка. Перед навивкой практически все изготовители проводят сварку (пайку) его частей для обеспечения требуемой длины индуктора (с последующей зачисткой мест



Рис. 97. Индуктор

сварки); в некоторых случаях сварку индуктора проводят аргонодуговым способом.

На заводе «Индуктор» эту операцию выполняют на токарно-карусельном станке, на фирме OTTO JUNKER и в компании «РЭЛТЕК» — с помощью специально разработанного станка собственного производства на барабанах, на фирме АВР — с помощью механизированного вращающегося устройства собственной разработки на шаблон, а на фирме EGES — на оправке собственного изготовления с самоотверждающим бандажом.

После наливки на всех предприятиях-изготовителях проводят при варку конструктивных элементов, в том числе шпилек, штуцеров, бобышек, выводов и т. д.

В компании «РЭЛТЕК» перед сваркой проводят отжиг индуктора установку его в специальную оправку, контроль геометрических размеров, слесарные операции. После приварки деталей на всех указанных предприятиях проводят гидротесты индуктора водой по различным технологиям, например, на заводе «Индуктор» — на специальном стенде под давлением 1 МПа (рабочее давление 0,6 МПа) в течение 30 мин. При таком же давлении проводят гидротесты и на фирме АВР — но в течение 24 ч.

На фирме EGES при том же рабочем давлении 0,6 МПа гидротесты индуктора проводят при давлении 3,6 МПа, т. е. в 6 раз больше рабочего давления.

Очень важной технологической операцией при изготовлении индуктора является выполнение его изоляции. На заводе «Индуктор» в специальной ванне на специальном приспособлении проводят двухслойную обмотку витков индуктора изоляционными материалами с двукратной пропиткой каждого слоя лаком. На фирме OTTO JUNKER после обмотки и фиксации витков проводят трехразовую пропитку в ванне изоляционным лаком, а затем после сушки в печи — повторное покрытие лаком и тремя слоями специального изоляционного материала для внешней защиты индуктора; после этого индуктор подвергают гидротестам и облицовывают непроводящим током бетоном в специальном приспособлении с повторной сушкой в вакуумной печи. На фирме АВР для изоляции индуктора используют эмаль, растылая ее в камере, а на фирме EGES — двустороннее и двухразовое покрытие эпоксидной краской и жаростойким стекловолокном толщиной 10 мм.

На предприятии «Электротехнология» (г. Екатеринбург) изоляцию индуктора выполняют следующим образом

- поверхность индуктора (катушки) перед нанесением изоляции зачищают и обезжиривают бензином или уайт-спиритом;
- по голой меди катушки наносят лак;

- производят обмотку стеклолентой в полуперекрывтие с натяжением и тщательно промазывают катушку лаком;
- повторно производят обмотку стеклолентой и промазывают катушку лаком, т.е. получают трехслойную изоляцию;
- между всеми витками катушки индуктора кладут прокладки из листового стеклотекстолита; прокладки промазывают лаком (толщина прокладок, как правило, составляет 1...3 мм);
- собранный индуктор стягивают в осевом направлении с помощью специального приспособления и затем тщательно промазывают по всей поверхности лаком, сушат при температуре 80...120 °С в течение не менее 2 ч;
- просушенный индуктор запекают при температуре 185 ± 5 °С не менее 2 ч.

На всех предприятиях после изоляции индуктора обязательной операцией являет сушка его в печи. Так, на заводе «Индуктор» вначале проводят низкотемпературную сушку индуктора, а затем, после восстановления на специальном стенде его размеров (возможно, потерянных при обмотке), проводят трехступенчатую сушку: низкотемпературную (24 °С) в течение 2 ч, среднетемпературную (120 °С) в течение 4 ч и затем высокотемпературную (180 °С) в течение 6 ч.

Ключевыми операциями по изготовлению индуктора являются гидронспытания, контроль геометрических размеров, испытание на пружинение при 2,5 кВ в течение 1 мин и проверка сопротивления изоляции, которое должно быть не менее 1 МОм.

На фирме EGES готовый индуктор обматывают теплоустойчивой тканью и помещают в огнеупорный бетон на глиноземной основе.

Важнейшим узлом комплекта оборудования индукционной печи является корпус печи с тиглем и индуктором. Этот узел состоит из корпуса печи, верхней части печи, индуктора, короткозамкнутого кольца, магнитопроводов, бетонного кольца, приспособления для подсоединения питания и охлаждающей воды, тигра печи.

Корпус печи, как правило, представляет собой стальную рамную конструкцию, которая используется для установки или присоединения других узлов.

Верхняя часть печи представляет собой сварную конструкцию с установленным в ней сплошным бетонным кольцом и средствами крепления, расположенными снаружи печи. Она используется для крепления индуктора в верхней части корпуса печи и дает возможность быстро заменить индуктор и магнитопроводы, что позволяет с помощью предварительно изготовленного бетонного кольца быстро пускать печь и, таким образом, сокращает длительность простоев во время выполнения ремонта.

Индуктор состоит из одной, двух или трех параллельных медных катушек с водяным охлаждением, которые изолированы и отделены друг от друга слоем изоляции.

Короткозамкнутое кольцо минимизирует нагрев корпуса.

Магнитопроводы расположены concentрично индуктору. Они проводят магнитный поток за пределами индуктора и воспринимают радиальные усилия, возникающие вследствие теплового расширения. Для этого они закреплены в корпусе печи. Магнитопроводы смонтированы в охлаждаемом водой кожухе, выполненном из фигурного алюминиевого профиля, полученного методом экструзии.

Нижнее бетонное кольцо, на которое опирается индуктор, является нижней частью корпуса печи.

К корпусу печи прикреплены различные приспособления для подсоединения питания и охлаждающей воды. Электропитание подводится с использованием гибких водоохлаждаемых кабелей. В тигель помещают шихту для плавления.

Индукционные печи имеют механизм наклона для слива металла и механизм обратного наклона для слива шлака, устройства для пентилляции, для загрузки шихты.

Под печью выполняется фундамент, который должен исключить передачу на электромоторы резких толчков, вибраций и обеспечить возможность присоски жидкого металла в аварийных случаях. В конструкции комплекта оборудования индукционной печи предусматривается аварийное водоснабжение и резервное электропитание.

Одной из составных частей комплекта оборудования индукционных печей является гидропривод, предназначенный для наклона и подъема плавильных печей, при разливе металла. Гидропривод эксплуатируется на чистых минеральных маслах с кинематической вязкостью 16...45 мм² с⁻¹ при температуре окружающей среды 5...45 °С.

Гидропривод состоит из гидростанции с масляным баком, насоса высокого давления, электродвигателя, гидроаппаратуры и комплекта монтажных частей, включающих в себя рукава высокого давления, изоляторы, шланги, соединительные штуцера и др. Трубопроводы и рукава высокого давления соединяют гидростанцию с исполнительными гидроцилиндрами. Гидростанция предназначена для подачи рабочей жидкости из бака к рабочим органам. Масло, заливаемое в бак гидростанции, должно быть очищено от посторонних частиц размером более 0,025 мм. Управление гидроприводом производится с пульта управления. Давление масла в гидроприводе контролируется манометром. В случае падения давления в системе гидропривода встроенные в гидроцилиндры гидрозамки (клапаны безопасности) гарантируют плавное возвращение печи в исходное положение.

В последние годы сконструирован электромеханический привод поворота тигля [117].

Надежная работа индукционных печей в значительной степени определяется уровнем технологии их изготовления. Можно, например, отметить такие технологические процессы изготовления индукционных печей на фирме АВР, как нанесение противопожарных защитных покрытий на шланги водяного охлаждения; установка на цилиндр гидросистемы экрана, защищающего от попадания жидкого металла; автоматическая линия резки полосы для магнитопроводов с программным управлением и др.

Одним из направлений индукционной плавки является вакуумная плавка. В вакуумных индукционных печах изготавливают сплавы с высокими физическими и химическими свойствами для деталей самолетостроения, космонавтики, ядерной промышленности и других отраслей. Известны одно- и двухкамерные вакуумные индукционные печи с вертикальным и горизонтальным исполнением, с одним или двумя тиглями

Например, серийный выпуск вакуумных индукционных сталеплавильных печей в течение ряда лет производится на фирме ULVAC (Япония). В последние годы введено раздельное вакуумирование плавильной печи и разливочного ковша, в результате чего значительно повысилась производительность печей. Вакуумные индукционные печи выпускают емкостью от 50 кг до 15 т, с рабочей частотой 500...4000 Гц. Индуктор состоит из секций

На вакуумных печах фирмы ULVAC катушка индуктора подвешивается хомутом из стали, легированной кремнием и укреплена рамой из коррозионно-стойкой стали; вся эта конструкция поддерживает и защищает катушку. Имеются специальные системы загрузки. Фирма выпускает вакуумные комплекты плавки и литья с расположением формы под тиглем, а также центробежные системы, когда разлижка металла происходит с высокой скоростью. Существует также метод инжекции литья. Кроме того, фирмой разработаны вакуумные индукционные печи горизонтального и вертикального кузовообразного типа.

Компания «РЭЛТЕК» (г. Екатеринбург) выпускает вакуумные индукционные сталеплавильные печи емкостью 0,0005...0,4 т, рабочей частотой 1...440 кГц, мощностью источников питания 3...320 кВт. В состав комплекта оборудования вакуумной установки входят следующие комплекты: источник питания (тиристорный полупроводниковый преобразователь частоты); камера вакуумная; блок компенсирующих конденсаторов; система охлаждения; механизм подъема изложницы; устройство загрузки и замера температуры; вакуумная система (насосы, клапаны, вакуумметры и др.); гидравлическая сис-

тема; пневматическая система; комплект шинопроводов и охлаждаемых тоководов; площадка обслуживания; электрооборудование; система контроля вакуума.

Так же как и открытые индукционные печи, вакуумные печи имеют механизм наклона

Вакуумные печи должны работать в следующих условиях: высота над уровнем моря не более 1000 м; температура окружающего воздуха 5...40 °С; температура охлаждающей воды 5...25 °С; относительная влажность воздуха до 80% при температуре 25 °С; отсутствие в воздухе агрессивных газов и примесей, разрушающих изоляцию и металлы; отсутствие в охлаждающей технической воде примесей, образующих осадок; отсутствие резких толчков, ударов, тряски; температура охлаждающей воды не должна быть ниже температуры окружающего воздуха более чем на 15 °С (во избежание появления росы); жесткость воды не более 5 мг/л. А также окружающая среда не должна быть взрывоопасна.

Приведем некоторые примеры отечественных разработок уникальных вакуумных индукционных плавильных печей

Так, институтом ВИАМ в 2002 г. была спроектирована, изготовлена, смонтирована и введена в эксплуатацию плавильно-разливочная установка ВИАМ-2002 [118]. Установка состоит из плавильной камеры, источника питания (тиристорный преобразователь) и вакуумной системы (4 вакуумных насоса). В плавильную камеру помещен керамический тигель с механизмом поворота для заливки металла в изложницу, закрепленную на поворотном кронштейне вместе с тиглем. На плавильной камере установлена шлюзовая камера, в которой находится термомпара погружения для измерения температуры расплава и отборник проб для экспресс-анализа. На крышках камеры расположен дозатор для дошигтовки и система подогрева керамического фильтра.

Технические характеристики установки: мощность 140 кВт, масса металла в тигле 10 и 25 кг, скорость откачки вакуумной системы 500 л/с. Установка оснащена двухуровневой компьютерной системой, управляющей всем технологическим процессом: созданием и поддержанием вакуума, расквашиванием и сливом металла, отбором проб и измерением температуры, определением времени присадки легирующих элементов и их экспресс-анализа. Готовый расплав фильтруется через подогретый до 1000 °С керамический фильтр, установленный в заливочную чашу. В управляющей программе заложены массив блокировок.

Все параметры технологического процесса фиксируются в цифровой и графической форме, постоянно отображаются на экране дисплея и записываются на жесткий диск компьютера с возможностью последующей распечатки информации или повторения процесса выплавки. На

установке получают сплавы с содержанием, % мас.: 0,001...0,003 С; 0,0002...0,0005 S; 0,005...0,0008 O; 0,0004...0,0009 N [118].

Другой пример — индукционная вакуумная плавильная установка, разработанная и изготовленная ОАО «Электромеханика» по техническому заданию предприятия «Салют» [119]. Это опытно-промышленная установка с технологией плавки в тигле с донным сливом (рис. 98) и индукционной высокотемпературной печью нагрева формы с металлическим нагревателем. Источники питания индукторов — тиристорные преобразователи с высокочастотными трансформаторами.

Тигель имеет в верхней части графитовые крышку и подложку по дну. Между печами устанавливают водоохлаждаемый стол. Плавильная печь оснащена магнитопроводом на термоизолирующей подложке, под водоохлаждаемым столом — печь нагрева формы. Система управления плавкой регулирует скорости нагрева шихты и расплава при непрерывном контроле температуры термоларой погружения. Емкость тигля — 80 кг.

5.2. ФУТЕРОВКА ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

За рубежом для индукционных сталеплавильных печей не используют кислую футеровку. Ряд предприятий Англии, Швеции, Германии, Чехии, США и Японии применяет для кислой футеровки кварцитовые массы фирмы АВ Forshammels Bergverk (Швеция). Кислые массы «Родонит», «Родонит силика микс», «Родонит силика микс супер» обладают высокой термостойкостью, устойчивостью против шлакоразъедания и поэтому считаются наилучшими. Гранулометрический состав двух последних при размере зерен 0...0,1; 0,1...0,6 и 0,6...5 мм соответственно 30; 20 и 50 %, огнеупорность этих смесей 1760 и 1780 °С. Химический состав: 98...99 и 98,5...99 % SiO₂; 0,5...1 и 0,4...0,6 % Al₂O₃; 0,4...0,6 и 0,3...0,5 % Fe₂O₃.

На одном из заводов Германии для футеровки 1,5-тонной низкочастотной печи применяют массу на основе кварцита высокой чистоты с 10 % природного связующего (мука «Корбета») мелкой фракции. Гранулометрический состав этой массы при размере зерен до 0,063; 0,063...0,2; 0,2...1,0 и 1...3 мм соответственно 15; 30; 30 и 25 %. Химический состав фракций до и более 0,063 мм соответственно 91,5 и 95,5 % SiO₂; 2,4 и 0,5 % Al₂O₃+TiO₂; 1,2 и 0,9 % Fe₂O₃; 0,7 и 0,6 % CaO; 1,6 и 0,2 % MgO; 0,19 и 0,11 % K₂O; 0,04 и 0,02 % Na₂O; 0,4 и 0,1 % SO₃; 1,5 и 0,7 % п.п. Стойкость футеровки 80 плавов.

На другом металлургическом заводе для футеровки 25-тонной индукционной печи, выплавляющей легированную сталь, применяют кварцитовые массы двух составов из основных составляющих: 99,17 и

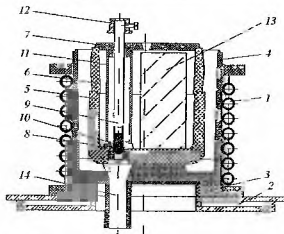


Рис. 98. Индукционная плавильная печь с тиглем донового слива [119]:

1 — индуктор, 2 — водоохлаждаемый стол, 3 — теплоизоляция, 4 — охранный стакан, 5 — тигель с доновым сливом, 6 — подставка тигля, 7 — крышка тигля, 8 — сливная втулка, 9 — стопор, 10 — коллечок стола, 11 — экран стопора, 12 — шляпка стопора, 13 — шихтовый заготовок, 14 — сливная втулка охранный стакана

98,90% SiO_2 ; 0,3 и 0,6% Al_2O_3 ; 0,07 и 0,07% TiO_2 ; 0,06 и 0,2% Fe_2O_3 ; 0,04 и 0,07% CaO ; 0,02 и 0,07% MgO ; 0,08 и 0,06% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$.

На металлургическом заводе Schalker Verein акционерного общества Rhein Stahl - Hüttenwerke (Германия) 13-тонные индукционные сталеплавильные печи футеруют кварцитом с добавками 1,5% борной кислоты. Подобную футеровку использует и фирма АВР (Германия) для 60-тонных сталеплавильных печей.

В Чехии для плавки стали используют кислый материал «Сурацит» (кристаллический кварцит), содержащий 89...97% SiO_2 . В качестве спекающей добавки применяют борную кислоту, борный ангидрид, буру, а в некоторых случаях фосфатные, моносаломофосфатные и хромосаломофосфатные связки.

В США, Англии для футеровки 5–30-тонных печей при выплавке стали используют в основном импортные кварциты. В США импортный кварцит заменили новой кислой массой (табл. 88), содержащей 2% борной кислоты.

88. Характеристики огнеупорных масс, используемых в США

Материал для футеровки	ρ , г/см ³	δ , %	$\sigma_{сж}$, кПа
Импортный кварцит	1,81/1,52	0,3/9,5	29400/9510
Новая масса США	1,93/1,55	0,3/7,6	27800/5390
Обычная масса США	1,75/1,48	0,7/9,4	16660/1666

Примечание. В числителе значение, соответствующее нагреву материала до 1100 °С, в знаменателе — до 1600 °С.

В Германии повышения качества и ускорения спекания огнеупорной массы достигают добавлением безводного борного ангидрида взамен борной кислоты, содержащей 43 % кристаллической воды. Более чем в 30 % всей футеровочной массы в Германии добавляют борный ангидрид. Частично его заменяют высокоогнеупорными оксидами или сухими фосфатными связками для увеличения стойкости футеровки. Из других кислых материалов в Англии и США применяют цирконовые массы на глинистой и химической связках.

Наряду с кислыми футеровками за рубежом стали чаще применять основную футеровку. Фирма Weitscher Magnesite Works (Австрия) разработала и внедрила основную футеровку, содержащую, % по мас.: 60...96 MgO; 0...28 Al₂O₃; 0...21 Cr₂O₃; 5...25 SiO₂; 0,5...10 Fe₂O₃, для плавки в индукционных печах марганцовистых сталей (до 14 % Mn), коррозионно-стойких сталей, а также сталей, легированных Al и Ti. Огнеупорность этих масс 1600...1700 °С. Стойкость футеровки 135–170 плавов с подварками через 14–16 плавов.

Фирма Voshum AG (Германия) исследовала поведение магнезитовой футеровки (с добавлением хромистой руды) на 3,6-тонной печи. Стойкость футеровки (~60 плавов) специальной ее обработкой довели до 200 плавов. Фирма применяет основную футеровку на индукционных сталеплавильных печах емкостью до 32 т.

Фирма AB Forshammers Bergverk выпускает массу «Родонит BS» с ~95 % MgO, огнеупорностью 2000 °С. В Швеции для футеровки 5-тонной индукционной сталеплавильной печи применяют известняковый кирпич, а на заводах фирмы «Латроб Стал» (США) для внутреннего слоя футеровки 30-тонной вакуумной индукционной печи, в которой доводят металл, выплавленный в открытой дуговой печи, — высококремнистый магнезито-шпинелидный кирпич. Фирма AB Forshammers Bergverk выпускает высокоглиноземистые массы, специально предназначенные для футеровки индукционных сталеплавильных печей.

В Швеции индукционные сталеплавильные печи емкостью до 10 т футеруют набивными массами шпинельного типа стойкостью 50–150 плавок, а в США 1,5–30-тонные печи — корундовым кирпичом стойкостью 100 плавок.

Иногда для выплавки специальных марок стали за рубежом пользуются тиглями из кристаллического известняка. В них удобно проводить десульфурацию и обесфосфоривание расплава. Однако этот материал склонен к трещинообразованию и отечивается при охлаждении. Применение же кирпича из кристаллического известняка, спрессованного под высоким давлением и обожженного при 1650 °С, позволяет в значительной мере сократить трещинообразование и повысить срок службы футеровки. Такой кирпич применяют для 1–1,2-тонных печей, и в Швеции опробовали на 5-тонных печах.

Как видно, за рубежом накоплен значительный опыт футеровки индукционных сталеплавильных печей средней и большой емкости.

Нами проведено также обобщение опыта футеровки индукционных печей средней емкости в СНГ. Как правило, печи имеют кислую футеровку.

Основой огнеупорной массы (наполнителем) кислой футеровки является кварцит Олручского карьера Житомирской области или кварцевый песок Аникшляйского карьера Литвы и маршаллит Болотниковского карьера Челябинской области. Иногда в состав наполнителя вводят также мелкий кварцевый песок. Химический состав огнеупорных наполнителей приведен в табл. 89.

89. Химический состав кислых огнеупорных наполнителей

Наполнитель	Содержание компонентов, % по мас.				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO + MgO	Na ₂ O + K ₂ O
Олручский кварцит	≥ 97	≤ 1,5	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Люберецкий кварцевый песок	≥ 97	—	≤ 0,75	≤ 1,2	≤ 1,2
Аникшляйский кварцевый песок	≥ 98	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,3	≤ 0,15
Болотниковский маршаллит	≥ 96	1,5	≤ 0,7	≤ 0,3	≤ 0,3

Огнеупорную основу смешивают с борной кислотой в бегунах, в лопастных смесителях 10...15 мин, кварцевый песок и маршаллит пред-

варительно 2...3 ч обжигают в барабанной печи при 1200...1300 °С, кроме того, песок просеивают и сортируют по фракциям.

В состав основной футеровки 8-тонной индукционной печи входят магнезитовый порошок, порошок плавленого магнезита и белый электрокорунд. Химический состав указанных наполнителей для основной футеровки приведен в табл. 90.

90. Химический состав основных огнеупорных наполнителей

Наполнитель	Содержание компонентов, % по мас.				
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
Магнезитовый порошок	≥ 87	—	≤ 4...5	≤ 4...6	—
Плавленый магнезит	≥ 90	—	—	—	≤ 1,5
Белый электрокорунд	—	≤ 96	≤ 1	—	≤ 2

Магнезитовый порошок содержит фракции размером до 1 мм 50...85 % и свыше 4 мм ≤ 5 %; плавленый магнезит состоит из зерен размером 0,8...3 мм; электрокорунд — до 0,05 мм.

Состав огнеупорной футеровки различен для подины, стен и верхней части тигля на уровне шлакового пояса. В состав подины входит 60 % магнезитового порошка и 40 % электрокорунда, стен — 55 % плавленого магнезита и 45 % электрокорунда. На уровне шлакового пояса тот же состав с добавкой 1,2 % борной кислоты. Компоненты смешивают 10...15 мин в смесителе барабанного типа.

Для 6-тонных индукционных печей, выплавляющих чугун, применяют огнеупорные массы на основе дистен-силлиманита. Дистен-силлиманит содержит 60 % Al₂O₃, 38 % SiO₂ и 2 % примесей. Размер зерен концентрата дистен-силлиманита: порошкообразного 0,05 мм, зернистого 0,1...0,16 мм, а электрокорунда > 1 мм. Состав массы колеблется в следующих пределах: 10...15 % порошкообразного дистен-силлиманита; 40...45 % зернистого дистен-силлиманита; 42...50 % электрокорунда. В качестве связующего применяют борную кислоту.

15- и 30-тонные тигли футеруют корундовым кирпичом американской фирмы General Refractories Company, а 7,5-тонные — нейтральной огнеупорной массой американской фирмы Norton Company. Зерновой состав массы: 10...15 мм — 15,9 %; 5...2 мм — 13,1 %; 2...0,5 мм — 28,6 %; 0,5...0,2 мм — 14,1 %; 0,2...0,09 мм — 9,3 %; < 0,09 мм — 19 %. Минералогический состав: 74 % периклаза MgO; 23 % электрокорунда; 3 % стекла. Огнеупорность массы 1980 °С.

Для сравнения футеровок с различными наполнителями, применяемых в СНГ для сталеплавильных печей емкостью > 1 т, исследовали комплекс свойств этих масс, влияющих на тепловое, механическое и химическое воздействие металла и шлака на тигель печи. Образцы для испытаний размером 50 × 36 мм и влажностью 4 % формовали на прессе с максимальным давлением 1470 МПа. Результаты испытаний приведены в табл. 91, химический состав исследованных кислых масс в табл. 92.

Сравнение свойств основной и кислых масс показывает, что основная масса имела наиболее высокую кажущуюся пористость после обжига, дополнительный линейный рост, огнеупорность, температуру начала разрушения. В то же время она имела наименьшую термостойкость (число теплосмен). Среди исследованных кислых масс наилучшие показатели механической прочности и температуры деформации под нагрузкой имела масса на основе овручского кварцита марки ПКМ, а по огнеупорности — масса на основе аниксийского кварцевого песка и болотниковского маршалита.

Технология футеровки печей сводится к следующему. Вначале ручной трамбовкой бойком диаметром 70–100 мм набивают подину печи, затем на подину устанавливают секционный стальной выплавляемый шаблон, укладывают на дно шаблона груз 0,5...1,0 т и пневматическими трамбовками с гладкими наконечником или пневмовибраторами набивают стены печи, на некоторых заводах пневмотрамбовку для набивки стен заменили ручной трамбовкой с острым наконечником или электровибраторами фирмы Busch.

Толщина футеровки стен определяется объемом тигля и составляет для печей емкостью 2,5...3,6 т 65...75 мм, а для печей емкостью 6...8 т 120 мм. Иногда 1,5-тонные печи имеют толщину стен тигля 120 мм.

На большинстве заводов первая фаза спекания тигля производится электронагревом, газовой горелкой или жидким металлом.

Критическая толщина футеровки и ее состояние контролируются сингализатором проседания тигля либо визуально.

На большинстве заводов, футерующих печи массой на основе кварцита, по мере износа футеровки ее частично ремонтируют нанесением массы на поврежденные места. Основная футеровка восстанавливается горячей заправкой, а кислая футеровка — холодной заправкой (нанесением огнеупорной массы на ошлакованный слой охлажденной футеровки), иногда перед холодной заправкой тигля полностью снимают ошлакованный слой, благодаря чему достигается лучшее спекание старого и нового слоев футеровки.

Достигнутая на отечественных заводах стойкость футеровки индукционных сталеплавильных печей емкостью от 1,5 до 30 т характеризуется следующими данными.

91. Характеристики огнеупорных масс для индукционных печей

Тип массы	Компоненты наполнителя	Состав исследуемой массы	Воздушная пористость % (плотность $\rho/\text{г/см}^3$)		Дополнительный линейный рост при 1600°C	Механическая прочность, МПа		Огнеупорность, °C	Температура °C деформации под нагрузкой 196 кПа		Термостойкость, час до теплового сдвига	Максимальная глубина проникновения шлака в футеровку, мм
			до обжига	после обжига		высушенного образца	после обжига при 1600°C		начала разрушения	полного разрушения		
Кислая	Кварцевит	100 % округлого кварцевит ПЖМ, 1,2% борной кислоты	18,0 (2,12)	20,35 (1,83)	13,65	2,16	26,5	1750	1550	1620	3	8
Кислая	Кварцевит кварцевый песок	65 % округлого кварцита (размер зерен до 3 мм) 35 % лобовитового песка, 1,4% борной кислоты	14,85 (2,21)	15,15 (1,955)	12,95	0,88	20,8	1730	1490	1585	4	16

Вальца	Кларс- ный песок картина нит	диаметр свой песок флюксиско свой нитр- шашит зер- нового со- става	21,7 (2,0)	25,35 (1,72)	14,35	0,49	16,2	1760	1530	1610	4	12
Остори- на	Пазде- ный нитр- нежит электроль- руда	Паздевый нитролит флюксиско 7 мм 28,8 %; 2 мм 19,4 %; 1 0,8 мм, 5,6 % 46,2 % шен- трисоруды	21,05 (2,845)	34,4 (2,36)	16,45	—	—	3060	3460	1690	1	—

92. Химический состав исследованных масс

Но- мер мас- сы	Содержание оксидов, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	Cl ₂ O ₃	P ₂ O ₅	П.п.п.
1	93,44	2,44	0,94	0,18	0,39	0,37	0,29	—	—	1,58
2	94,41	—	2,75	0,50	0,30	0,45	0,25	—	—	1,58
3	91,26	3,68	0,92	—	2,81	—	0,42	—	—	1,14

Стойкость основной футеровки индукционной печи емкостью 8 и 65...70 плавков. Стойкость нейтральной футеровки индукционных печей емкостью 6 т, выплавляющих синтетический чугун, 30...45 дней при пятидневной рабочей неделе с остановкой на выходные дни (в данном случае стойкость исчисляется не числом плавков, так как печи работают с «болотом»). Стойкость кислой футеровки печей емкостью 2,5...3,6 т, как правило, 60...80 плавков, 6 т — 18 плавков. Стойкость кислой футеровки 1,5-тонных индукционных сталеплавильных печей на одном из заводов 200...400 плавков. Достижению такой высокой стойкости, очевидно, способствовали следующие факторы:

- относительно большая первоначальная толщина футеровки стен (120 мм);
- удаление ошлакованного слоя футеровки перед холодной заправкой (восстановление поврежденных мест футеровки);
- рациональное сочетание в составе огнеупорной массы кварцита и кварцевого песка крупной и мелкой фракций;
- применение острого наконечника трамбовки при футеровке стен.

Стойкость футеровки индукционных печей емкостью 6...10 т, выплавляющих синтетический чугун, при трехсменной работе 60...90 дней. Существенное влияние на достижение высокой стойкости оказало исключение охлаждения футеровки в течение плавильной кампании (в выходные дни во всех печах выдерживают жидкий расплав металла на $\frac{2}{3}$ высоты тигля с закрытыми крышками).

Приведенные материалы показывают, что в СНГ накоплен положительный опыт футеровки индукционных сталеплавильных печей емкостью 1,5...30 т, дающий основание для широкого их использования в сталелитейных цехах.

В большинстве сталелитейных цехов в качестве основы формовочных смесей применяют средний песок группы 02. Поэтому целесообразна разработка огнеупорной массы на основе крупной фракции ов-

ручского кварцита с добавкой среднего кварцевого песка (группы 02), с тем чтобы не вводить в производство новые материалы (применение в одном литейном цехе двух марок кварцевых песков затруднительно) и тем самым не усложнять его. При этом необходимо выбрать оптимальное количество связующего — борной кислоты. С этой целью нами было проведено специальное исследование.

В качестве добавки для образования в массе мелкой фракции использовали кварцевый песок группы К₁ Вишневого участка Староверовского карьера. Основной компонент в этом песке — кварц (97...98 %), в небольшом количестве содержатся полевые шпаты (до 1...1,5 %) и акцессорные минералы (до 1 %). Огнеупорность староверовского песка 1770 °С. Зерновой состав песка: фракции крупнее 0,63 мм 0,1 %; 0,63...0,40 мм 0,32 %; 0,40...0,315 мм 14,82 %; 0,315...0,20 мм 70,19 %; 0,20...0,16 мм 13,22 %; 0,16...0,10 мм 0,43 %; 0,10...0,063 мм 0,22 %; 0,063...0,05 мм 0,01 %; мельче 0,05 мм 0,01 %; глинистой составляющей 0,43 %.

Проведенными нами ранее исследованиями установлено, что для получения оптимальной плотности огнеупорной массы наиболее рационально вводить в нее староверовский песок в количестве 15...20 % (объемные доли). Содержание борной кислоты в исследуемых массах колебалось в пределах 0,5...1,5 % (сверх 100 %). Вещественный и зерновой составы масс приведены в табл. 93

93. Составы исследованных масс

Но- мер массы	Содержание компонентов, %			Содержание, %, фракций, мм					
	квар- цит	песок	борная кислота (сверх 100 %)	> .	3...2	2...1	1...0,5	0,5... 0,088	< 0,088
1	80	20	0,5	36,5	8,0	10,0	4,8	23,0	17,7
2	80	20	1,0	35,1	8,5	9,3	4,6	23,0	19,5
3	80	20	1,5	36,5	8,2	10,1	4,8	24,1	16,3
4	85	15	0,5	30,6	8,6	10,5	6,1	25,5	18,7
5	85	15	1,0	39,5	8,5	11,8	5,0	18,9	16,3
6	85	15	1,5	40,7	9,4	9,5	4,5	17,0	18,9

Исследовали следующие физико-механические свойства: линейный рост, открытую пористость, кажущуюся плотность, предел прочности при сжатии, термостойкость. Все определения производили по стандартным методикам.

Средние результаты испытания приведены в табл. 94–97.

94. Линейный рост образцов при обжиге^a, %

Но- мер мас- сы	Температура обжига, °С										
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
1	0,30	0,40	0,70	0,45	0,65	0,80	0,80	1,13	1,92	2,95	6,75
	0,20	0,60	0,40	0,75	0,80	0,90	0,82	1,15	1,68	3,07	7,12
2	0,30	0,40	0,62	0,53	0,45	0,58	0,80	0,95	1,82	2,85	6,70
	0,23	0,55	0,75	0,55	0,78	0,95	0,63	1,03	1,78	2,90	7,27
3	0,25	0,38	0,90	0,35	0,60	0,73	0,60	1,05	1,50	2,93	6,92
	0,35	0,58	0,30	0,40	0,85	0,95	0,55	1,03	1,58	2,75	6,98
4	0,08	0,55	0,43	0,70	0,43	0,75	1,10	1,08	1,46	1,00	6,52
	0,20	0,70	0,83	0,60	0,75	0,90	0,90	1,28	1,15	2,52	5,47
5	0,13	0,53	0,85	0,48	0,80	0,55	0,88	1,02	1,32	2,85	7,30
	0,38	0,70	0,98	0,60	0,85	0,95	1,02	1,35	1,55	3,18	7,45
6	0,18	0,60	0,60	0,48	0,50	0,88	0,67	1,18	1,80	2,70	7,15
	0,30	0,83	0,58	0,65	0,51	0,80	0,98	1,25	1,65	3,12	7,18

^a В числителе — по диаметру, в знаменателе — по высоте.

95. Открытая пористость образцов, %

Но- мер мас- сы	Температура обжига, °С										
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
1	24,15	23,39	24,49	25,55	26,09	25,48	24,93	24,36	25,20	25,70	29,72
2	23,45	23,28	25,05	26,21	25,75	26,12	23,44	24,30	25,04	24,74	30,31
3	20,50	22,45	23,61	25,70	24,83	25,82	24,18	24,40	24,13	25,06	29,29

Описание табл. 95

Но- мер мас- сы	Температура обжига, °С										
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
4	22,50	23,60	23,98	23,87	23,36	24,54	23,16	23,40	23,90	25,13	27,90
5	24,40	23,12	23,44	26,34	25,79	24,73	23,20	24,03	24,42	25,40	29,46
6	23,10	28,94	24,72	27,58	28,32	26,50	24,41	24,99	25,14	25,45	30,87

96. Кажущаяся плотность образцов, г/см³

Но- мер мас- сы	Температура обжига, °С										
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
1	2,01	2,03	1,99	1,96	1,95	1,97	1,97	1,98	1,93	1,86	1,68
2	2,00	2,02	1,97	1,93	1,95	1,94	2,01	1,97	1,93	1,88	1,66
3	2,06	2,03	1,99	1,93	1,97	1,95	1,98	1,96	1,95	1,87	1,68
4	2,04	2,01	2,02	2,01	2,03	1,99	2,03	2,01	1,97	1,91	1,73
5	2,05	2,02	2,01	1,93	1,95	1,98	2,03	1,98	1,95	1,88	1,67
6	2,01	1,99	1,93	1,89	1,87	1,93	1,98	1,95	1,91	1,85	1,64

97. Предел прочности при сжатии образцов, МПа

Но- мер мас- сы	Температура обжига, °С										
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
1	1,8	1,1	1,3	0,9	1,0	3,2	4,5	5,4	6,9	5,5	4,0
2	1,8	2,5	1,7	0,3	—	2,4	5,5	6,1	4,8	4,5	3,5
3	2,6	2,8	3,0	1,9	0,7	2,7	6,1	6,9	4,8	3,9	5,0
4	0,7	1,0	1,0	1,5	1,6	2,6	3,7	6,2	6,4	4,8	4,3
5	2,0	2,5	2,4	1,4	1,5	4,1	4,5	5,0	3,9	2,8	3,0
6	2,9	3,7	2,7	1,8	1,5	3,9	5,5	5,1	3,1	4,4	4,9

При определении термостойкости получены следующие средние показатели: 6, 15, 18, 2, 13 и 18 теплосмен 850 °С — воздух соответственно для масс № 1...6.

Как следует из приведенных данных, исследованные массы существенно не различались по показателям линейного роста, открытой пористости и кажущейся плотности. В то же время массы, содержащие 1,5 % борной кислоты, по сравнению с массами, содержащими 0,5 и 1,0 % борной кислоты, имели повышенные показатели по пределу прочности при сжатии и термостойкости, что, по видимому, обусловлено лучшим спеканием при большем количестве связующего.

Массы были испытаны в промышленных условиях для футеровки индукционных сталеплавильных печей вместимостью 1 т в условиях порционной разливки. Футеровку изготовляли из масс № 2, 3, 4 и 6. Стойкость футеровки из масс № 2 и 4 составила в среднем (по трем кампаниям) 32 плавки, из массы № 3 — 38 плавков, из массы № 6 — 40 плавков. Средняя стойкость футеровки из аналогичных масс, содержащих добавки мелкого песка, составляет в аналогичных условиях, как правило, 38—40 плавков.

Таким образом, проведенная работа показала, что для футеровки индукционных сталеплавильных печей можно применять огнеупорную массу на основе овручского кварцита с добавками 15...20 % среднего песка и 1,5 % борной кислоты.

Рациональному зерновому составу футеровки соответствует такое распределение огнеупорного материала по зерновым фракциям, которое обеспечивает минимальную пористость уплотненной массы. Максимальная плотность футеровки способствует снижению усушки футеровочной массы в процессе ее спекания, уменьшению смачиваемости футеровки расплавом и шлаком, увеличению прочности массы вследствие более полного цементирования крупных фракций мелкими, повышению теплопроводности, снижению трудоемкости при уплотнении футеровки. Оптимальный зерновой состав футеровочной массы можно определить расчетным методом.

В последние годы ряд работ в области футеровки индукционных печей провели разработчики (они же изготовители) печи. Сложность решения вопросов стойкости футеровки индукционных печей связана с тем, что футеровка в индукционных тигельных печах подвержена механическим воздействиям, особенно в печах большой вместимости, и абразивному износу из-за активного перемешивания расплава. С другой стороны, толщина футеровки существенно влияет на эффективность работы печи, поэтому ее стремятся сделать, по возможности, более тонкой, что приводит к работе при больших температурных градиентах.

Для плавки сплавов черных металлов футеровку индукционных печей обычно выполняют из кварцевой набивной массы, которая обладает высокой абразивной стойкостью, незначительно изменяет объем при нагреве, имеет низкую стоимость. Однако ее невысокая термостойкость, образование легкоплавких соединений при взаимодействии с расплавом и относительно низкая предельная температура эксплуатации (1640 °С) обусловили поиск других материалов с более высокими характеристиками. Особый интерес среди огнеупоров нового поколения вызывают низкоцементные и керамические огнеупорные бетоны, обладающие высокими прочностью, плотностью, огнеупорностью, термостойкостью и шлакостойкостью. Так, применение керамобетонов в виде фасонных изделий для футеровки индукционных печей увеличивает стойкость футеровки в 10 раз [105].

Предприятие «Электротехнология» (г. Екатеринбург) разработало технологию заливки подины печи огнеупорным бетоном из смеси 80 % шамотного заполнителя и 20 % высокоглиноземистого цемента. Заполнитель с цементом перемешивают в сухом виде, затем добавляют воду до получения однородной массы (консистенции сметаны). Бетон уплотняют трамбованием до заполнения всего объема подины и выдерживают в течение 4...5 суток с момента заливки. Для футеровки тигля по инструкции предприятия «Электротехнология» применяют набивную массу на основе молотого первоуральского кварцита с содержанием SiO_2 не менее 97,5 %. Другой способ — это футеровка на основе магнезита с добавлением электрокорунда. Перед набивкой тигля индуктор обмазывают одним из составов, приведенных в табл. 98.

Покрытый обмазкой индуктор обкладывают изнутри слоем миканита толщиной 0,5...1 мм, затем асбестовым картоном толщиной 5 мм, после чего распорными кольцами миканит и асбест прижимают к стенкам индуктора (по мере набивки распорные кольца извлекают). Тигель набивают первоуральским кварцитом марки ИКМИ-97,5 влажностью не более 0,5 %. Содержание SiO_2 в кварците 97,5...98,8 %. В состав массы для подины тигля вводят 1,2 % борной кислоты или 1,1 % борного ангидрида; в состав массы, набиваемой до уровня 2/3 общей высоты тигля — 1,3 % борной кислоты или 1,3 % борного ангидрида, а для стенок верхней части тигля (1/3 части общей высоты тигля) — 1,8 % борной кислоты или 1,5 % борного ангидрида.

Первоуральский кварцит для средней части тигля должен содержать 97,5...98,5 % SiO_2 , а для верхней части — 97,5...98,2 % SiO_2 . Футеровочную массу перемешивают в лопастных смесителях 5...10 мин до получения однородной массы. На подину, покрытую листовым асбестом, насыпают слой чистого кварцита (равный $1/3$ толщины днища) и утрамбовывают. Затем набивают подину футеровочной массой с помо-

98. Состав обзакзок индуктора

Номер состава	Материал	ГОСТ или ТУ	% по массе	Примечание
I	Бакелитовый лак	ГОСТ 901-78	30	Тщательно смешанные компоненты наносят на внутреннюю поверхность индуктора, предварительно покрытую свежим слоем бальничного лака. Сушка при 50...60 °С, в течение 24 ч
	Кварц молотый	ГОСТ 9077-82	70	
:	Высокоглиноземистый цемент (технический алюминат натрия)	ТУ 21-2060-84	30	Затворяют водой до консистенции густой сметаны, небольшими порциями быстро наносят на внутреннюю поверхность индуктора и после 3...4 суток влажной выдержки просеивают
	Кварц молотый пылевидный или кварцевый песок крупность не более 1 мм	ГОСТ 9077-82	70	

щью вибротрамбовки слоями 50...60 мм, устанавливают шаблон, центрируют его деревянными клиньями, загружают грузом или шишкой на $\frac{1}{3}$ емкости печи, затем производят набивку слоями толщиной 40...50 мм. Масса для набивки тигля должна быть неэлектропроводна.

Фирма EGES в своей инструкции печи рекомендует для стали кислую футеровку, набиваемую специальными ручными инструментами или вибраторами. Особое внимание уделяется сушке футеровки, для чего разработана специальная программа сушки с контролем уровня влажности и отображением данных на дисплее.

Компанией «РЭЛТЕК» освоена технология механизированной вибронбивки керамбетона в печах вместимостью 1...10 т и разработан комплекс механизмов для реализации этого метода.

Практически все изготовители индукционных печей устанавливают сигнализаторы состояния футеровки. Так, компания «РЭЛТЕК»

устанавливает индикатор сопротивления футеровки печи. Сигнализатор предприятия «Электротехнология» работает на принципе измерения тока утечки с фиксацией сопротивления системы индуктора относительно земли. Реле аварийного сигнала срабатывает при суммарном сопротивлении футеровки и изоляции в пределах 3...10 кОм. Сигнализатор состояния футеровки состоит из шкафа сигнализации и электродов, устанавливаемых непосредственно на печь. Шкаф сигнализации оборудован сигнальными лампами и сигнальной сиреной, сообщающими об аварийном состоянии футеровки.

Одной из зарубежных фирм разработана новая система измерения температуры и контроля состояния печи OCP (Optical-Coil-Protection). В качестве датчика в системе используется оптико-волоконный сенсор, измерительные характеристики которого наилучшим образом подходят для контроля состояния тигля в печи, поскольку на него не действуют помехи, создаваемые электромагнитным излучением. Работа сенсора основана на проводимости световых волн [121].

Однако мировая практика эксплуатации индукционных плавильных печей свидетельствует о том, что наличие сигнализирующих индикаторов не гарантирует безаварийную работу футеровки печи. Более надежный способ контроля состояния футеровки — периодические замеры внутреннего диаметра футеровки специальным инструментом, что позволяет своевременно получить информацию о состоянии футеровки и при необходимости заменить футеровку. Примером может служить практика эксплуатации 12-тонной индукционной печи производства фирмы EGES на заводе ANADOLU DOKUM SAN.A.S. в г. Измит (Турция), где старший мастер печи после каждой плавки с помощью специального инструмента замеряет внутренний диаметр печи. Первоначальная толщина футеровки 140...150 мм, при остаточной толщине 50...60 мм футеровку выбивают с помощью специального механизма, стойкость футеровки 90–100 плавков [120]. Для этой печи применяется нейтральная футеровка, массу для которой поставляет немецкая фирма Dbeltinger.

Известны также положительные результаты применения для футеровки индукционных печей карельского кварцита месторождения «Нестерова гора». Стойкость футеровки 25-тонных индукционных тигельных печей на основе карельского кварцита 250–260 плавков (стойкость футеровки на основе шведского кварцита — 200 плавков). Большие запасы, благоприятные условия залегания и добыча карельских кварцитов позволяет рассматривать их как сырьевую базу при производстве футеровочных масс для индукционных плавильных печей.

Глава 6

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

6.1. ТРЕБОВАНИЯ К ШИХТОВЫМ МАТЕРИАЛАМ, ЗАГРУЗКА И ПЛАВЛЕНИЕ ШИХТЫ

Расход шихтовых материалов для выплавки стали в кислых электропечах, как правило, нормируется на 1 т годного литья. Металлозавалка на 1 т годного литья зависит от выхода годного (отношения массы годного литья к массе металлозавалки), который обычно находится в пределах 60...65 %. Угар и безвозвратные потери (всплески, потери металла со шлаком, потери металла при отрезке литников и прибылей и т.д.) составляют 5...6 %, а остальная часть металлозавалки расходуется на литейный возврат (литники, прибыли, скрап, сливы и брак).

Стальной лом. Основную часть шихты для плавки стали в кислых электропечах составляет стальной лом, который представляет собой четыре вида шихтовых материалов: кусковой стальной лом (как правило, на машиностроительных заводах это разрезанные отходы сварочного производства), разделанный литейный возврат, пакетированные отходы тонколистовой стали и брикетированная или рассыпчатая дробленая стружка.

При выплавке стали в кислых печах необходимо применять стальной лом известного химического состава. С этой целью наиболее целесообразно использовать металлические отходы, образующиеся в производстве того завода, на котором работают кислые электропечи, или заводов — потребителей литья. Такая возможность имеется на большинстве машиностроительных заводов. Для этого в сварочных цехах организуют посты для резки кускового лома, в штамповочных цехах — линии пакетирования отходов тонколистовой стали, в механических — брикетирования стружки (рис. 99). Необходимо также на каждом заводе, выплавляющем сталь в кислых электропечах, создавать скрапоразделочные цехи и участки для подготовки шихты.

Требования к стальному лому устанавливает ГОСТ 2787—75 «Металлы черные вторичные. Общие технические условия». Кусковой лом должен быть удобным для загрузки плавильных агрегатов. В его состав

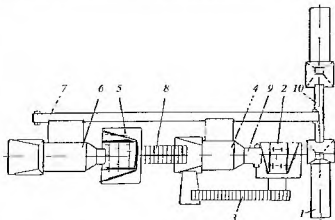


Рис. 99. Механизированная линия переработки стальной стружки

1 — брикет-пресс, 2, 5 — валковые дробилки, 3, 8 — пластичные конвейеры, 4, 6 — барильчатые грохота, 7, 9 — ленточные конвейеры, 10 — реверсивный ленточный конвейер

не допускается проволока и изделия из проволоки, наличие лома и отходов цветных металлов. Углеродистые лом и отходы не должны смешиваться с легированными. Металл не должен быть горелым, разрезанным кислотами и проржавленным. Размеры куска стального лома и отходов: № 1 — $300 \times 200 \times 150$ мм, № 2 — $600 \times 350 \times 250$ мм, № 3 — $800 \times 500 \times 500$ мм, № 4 — $200 \times 150 \times 100$ мм. Толщина металла — не менее 6...8 мм. Трубы должны иметь наружный диаметр не более 150 мм и толщину стенки не менее 8 мм, при большем диаметре трубы должны быть сплюснены или разрезаны по образующей. Масса кусков для разного состава лома и отходов должна быть не менее 0,025...2 кг, но не более 20...40 кг.

Брикеты должны быть спрессованы из стальной стружки, не смешанной с чугуновой стружкой и стружкой из цветных металлов. Брикетуемая углеродистая стружка не должна смешиваться с легированной. Не допускается брикетирование проржавленной, горелой и разрезанной кислотами стружки. Масса брикетов должна быть не менее 2 кг и не более 50 кг при плотности не менее $4500\text{--}5000$ кг/м³.

Пакеты должны быть спрессованы из чистых легковесных стальных отходов. Прессуемая углеродистая сталь не должна смешиваться с легированной. Не допускается прессование луженого, эмалированного, оцинкованного, покрытого другими цветными металлами, разъеденного кислотами, проржавленного и горелого металла. Пакеты должны иметь размеры не более $2000 \times 1050 \times 750$ мм и плотность не менее $1200 \dots 2000$ кг/м³; масса пакетов должна быть не менее 40 кг.

Все вторичные черные металлы должны проверяться на взрывобезопасность и из них должны удаляться все предметы, содержащие взрывоопасные, горючие и легковоспламеняющиеся вещества. Боеприпасы должны быть обезврежены.

При сборе, сортировке и подготовке стального лома необходимо разделять углеродистые и легированные отходы. В ломе для плавки углеродистой стали в кислых электропечах не допускаются примеси цветных металлов: никеля, хрома, меди, олова, свинца, цинка, сурьмы, мышьяка и других, так как эти элементы при кристаллизации концентрируются на границах зерен металла и резко ухудшают его ковкость, прокаляемость и другие свойства. Шихта должна быть по возможности менее окисленной, содержащей минимальное количество S и P. Шихтовые материалы, особенно стружка, должны быть очищены от масла и других загрязнений. Лом не должен быть ржавым, так как при этом вносится в металл значительное количество водорода (1 % ржавчины вносит на 1 т стали $2,5$ м³ H₂). Возврат литейного производства необходимо очищать от остатков отработанной формовочной смеси и стержней. Перед загрузкой в бадн шихта должна быть тщательно осмотрена и в целях взрывобезопасности освобождена от военного лома, полых предметов, льда и снега.

Наиболее целесообразно иметь в составе шихты максимально возможное количество тяжеловесного лома, чтобы производить загрузку в один прием. Подвалки шихты увеличивают продолжительность плавки и расход электроэнергии. Как правило, в шихте может содержаться кускового стального лома до 50 %, брикетированной стружки до 30 %, пакетированных отходов до 35 %.

В соответствии с ГОСТ 2787—75 вторичные черные металлы подразделяют по содержанию углерода на классы, по наличию легирующих элементов — на категории (А — углеродистые, Б — легированные).

В последние годы расширяется применение металлизированных окатышей продукта прямого восстановления железа из обогащенных железных руд или окатышей. Они содержат 85...97 % железа.

Наупероживатели. В качестве наупероживателя, как правило, применяют передельный чугун (ГОСТ 805—95) марок П1 и П2, содержащий $< 0,9$ % Si; $< 1,5$ % Mn; $\leq 0,3$ % P и $0,05$ % S.

В табл. 99 приведен химический состав марок передельного чугуна, предназначенных для сталеплавильного производства

99. Химический состав, % мас., передельного чугуна для сталеплавильного производства

Марка чугуна	Кремний	Марганец			
		Группы			
		1	2	3	4
П1	Св. 0,5 до 0,9 включ.	До 0,5 включ.	Св. 0,5 до 1,0 включ.	Св. 1,0 до 1,5 включ.	
П2	До 0,5 включ.	До 0,5 включ.	Св. 0,5 до 1,0 включ.	Св. 1,0 до 1,5 включ.	

Описание таблицы 99

Марка чугуна	Фосфор, не более			Сера, не более				
	класса			категории				
	А	Б	В	1	2	3	4	5
П1	0,1	0,2	0,3	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
П2	0,1	0,2	0,3	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05

По содержанию марганца передельный чугун подразделяют на группы, по содержанию фосфора — на классы и по содержанию серы — на категории.

Для науглероживания стали применяют также кокс и электродный бой.

Шлакообразующие. В кислой электропечи в период плавления шихты формируется шлак, составляющими которого, в основном, являются оксиды железа, образующиеся в результате окисления шихты под действием печной атмосферы, а также содержащиеся в шихте в виде окисной пленки металлолома, окалины и руды; продукты взаимодействия оксидов железа с кремнеземом футеровки; оксиды марганца и кремния, сформировавшиеся в период плавления в результате окисления шихты; кремнезем, попавший с шихтой в виде песка. Дальнейшее формирование кислого шлака происходит за счет присадок железной руды, песка и известняка.

В качестве окислителя в печах как с кислой, так и с основной футеровкой применяют железную руду, содержащую в зависимости от месторождения и категории от 58,4 до 65 % Fe. Железная руда должна быть кусковой (для электропечи куски не более 25...60 мм), массовая доля влаги не более 3...11 %. В качестве окислителя можно использовать железорудные окатыши. Для ускорения окислительных процессов применяют газообразный кислород чистотой выше 99 %.

Раскислители, модификаторы и легирующие [122]. Большая часть раскислителей, модификаторов и легирующих являются ферросплавами, основой которых являются элементы, создающие с железом двухкомпонентные или более сложные композиции [129]. ГОСТ Р 50724.1-94 (ИСО 8954-1-90) «Ферросплавы материалы. Термины и определения» определяет ферросплав как сплав, состоящий из не менее 4 % железа и нескольких металлических и (или) неметаллических элементов, предназначенный для введения в расплав в качестве легирующего сплава, раскислителя, десульфуратора и модификатора и используемый в сталеплавильной и литейной промышленности. Основные компоненты ферросплавов называют ведущими элементами, от физико-химических свойств которых во многом зависят свойства ферросплавов.

К ведущим относятся элементы Si, Mn, Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Zr, Ni, Co, Al, Ca, B, Ba, Sr, Mg, PЗМ, P, Se, Ta, Te. В ферросплавах в больших или меньших количествах присутствуют элементы-примеси: P, S, Cu, Sn, Sb, Bi, O, H, N и др.

Качество ферросплавов характеризуется содержанием и пределами колебаний ведущего элемента, концентрацией регламентируемых сопутствующих примесей, гранулометрическим составом, плотностью, состоянием поверхности кусков, температурой плавления, содержанием неметаллических включений и вкраплений шлака.

Основным показателем качества ферросплава является его химический состав и прежде всего содержание в нем ведущего элемента.

Важной характеристикой качества ферросплава является его гранулометрический состав, поскольку при правильном его выборе ускоряется процесс расплавления, обеспечивается высокое усвоение легирующего элемента стальной ванной. Важное значение имеют также механические свойства ферросплавов, поскольку от них зависит выбор дробильных устройств для получения сплавов заданного гранулометрического состава.

Ферросплавы классифицируют по виду применяемых восстановителей (углеродотермические, силикотермические и алюмотермические процессы), по виду используемого агрегата (электропечной, металлотермической, доменной, электролитической и специальные способы), по технологическим признакам (непрерывные, пе-

риодические, бесшлаковые, шлаковые, флюсовые и бесфлюсовые процессы) [129].

Ферросилиций. Применяют для раскисления и легирования стали. Это большая группа сплавов железа и кремния, требования к которым устанавливает ГОСТ 1415–93 (ИСО 5445–80) «Ферросилиций. Технические требования и условия поставки». Химический состав марок ферросилиция приведен в табл. 100.

100. Химический состав ферросилиция

Марка	Si	C	S	P	Al	Mn	Cr
ФС90	Св. 87 до 95 включ.	0,1	0,02	0,03	3,5	0,3	0,2
ФС75	Сл. 74 до 80 включ.	0,1	0,02	0,04	3,0	0,4	0,3
20ФС70	Св. 68 до 74 включ.	0,1	0,02	0,04	2,0	0,4	0,4
ФС70Al	Сл. 68 до 74 включ.	0,1	0,02	0,04	1,0	0,3	0,3
ФС65	Св. 63 до 68 включ.	0,1	0,02	0,05	2,5	0,4	0,4
ФС50	Сл. 47 до 52 включ.	0,1	0,02	0,05	1,8	0,6	0,5
ФС45	Сл. 41 до 47 включ.	0,2	0,02	0,05	2,0	1,0	0,5
ФС25	Сл. 23 до 29 включ.	0,8	0,02	0,06	1,0	1,0	0,8
ФС20	Сл. 19 до 23 включ.	1,0	0,02	0,10	1,0	1,0	0,8

Предельно допустимая концентрация (ПДК) пыли кремния в пересчете на SiO_2 в воздухе рабочей зоны — 2 мг/м^3 (ГОСТ 12.1.005–88). Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) и температура самовоспламенения ($t_{\text{св}}$) аэрозоля различных марок ферросилиция имеют значения, приведенные в табл. 101.

Ферросилиций с массовой долей кремния 30...90 % выделяет водород и токсичный фосфин.

101. Нижний концентрационный предел распространения пламени и температура самовоспламенения ферросилиция

Показатель	Марки			
	ФС90	ФС75	ФС65	ФС45
НКПР, г/м^3	240	150	400	1000
$t_{\text{св}}$, °C	980	Более 1000	Более 1000	-

Размер кусков ферросилиция в зависимости от его класса крупности по ГОСТ 1415–93 должен быть 3,2...315 мм. ГОСТ 1415–93 регламентирует также для всех марок ферросилиция, изготовляемого в чушках и в кусках, количество мелочи, проходящей через сито 20×20 мк (5...10 %). Ферросилиций не должен быть загрязнен инородными материалами.

Кремний кристаллический. Применяется для раскисления и легирования специальных сталей и сплавов. Требования к нему определены ГОСТ 2169–69 «Кремний технический. Технические условия». Марки кремния и химический состав приведены в табл. 102.

102. Марки и химический состав, % мас., кремния кристаллического

Марка кремния	Si , не менее	Примеси, не более			
		Fe	Al	Ca	Сумма определяемых примесей
Kp00	99,0	0,4	0,3	0,4	1,0
Kp0	98,8	0,5	0,4	0,4	1,2
Kp1	98,0	0,7	0,7	0,6	2,0
Kp2	97,0	1,0	1,2	0,8	3,0
Kp3	96,0	1,5	1,5	1,5	4,0

Кремний изготавливают в виде кусков размерами 20...300 мм с допус- каемым содержанием фракции менее 20 мм не более 10 % массы партии.

Марганец (ферромарганец). Марганец используется как раскислитель и легирующий элемент при выплавке стали в виде различных марганце- вых ферросплавов, а также в виде металлического марганца техниче- ской чистоты (96...99 % Mn). В настоящее время наиболее распростра- ненными марганцевыми ферросплавами являются следующие: ферромарганец (ГОСТ 4755—91 «Ферромарганец. Технические требова- ния и условия поставки»), ферросиликомарганец (ГОСТ 4756—91 «Фер- росиликомарганец. Технические требования и условия поставки»), ме- таллический марганец (ГОСТ 6008—85 «Металлический марганец. Технические требования и условия поставки») и азотированный метал- лический марганец (ГОСТ 6008—90), содержащий 2...8 % N.

Марки и химический состав ферромарганца приведены в табл. 103.

103. Марки и химический состав, % мас., ферромарганца

Группа	Марка	Mn	C	Si	P для классов		S
					А	Б	
не более							
Низкоугле- родистые	ФМн90	Св. 85,0 до 95,0 включ	0,5	1,8	0,05	0,30	0,02
Среднеугле- родистые	ФМн88	Св. 85,0 до 95,0 включ	2,0	3,0	0,10	0,40	0,02
Высокоугле- родистые	ФМн78	Св. 75,0 до 82,0 включ	7,0	6,0	0,05	0,70	0,02
	ФМн70	Св. 65,0 до 75,0 включ	7,0	6,0	0,30	0,70	0,02

ГОСТ 4755—91 устанавливает также требования по химическому составу азотированного ферромарганца (табл. 104).

104. Химический состав, % мас., азотированного ферромарганца

Марка	Mn, не менее	C		Si	S	P	N	
		более	до и включ.				более	до и включ.
Пылевидный	80,0	0,1	0,5	2	0,030	0,15	1,5	2,5
Спеченный	69,0	0,1	0,5	2	0,030	0,30	4,0	8,0
						0,15		
						0,35		
		0,5	2,0	2	0,030	0,20		

Ферромарганец изготавливают в кусках массой не более 20 кг или в дробленом виде. Дробленый ферромарганец поставляют по классам крупности (ГОСТ 4755–91) с размерами кусков от 5 до 200 мм; количество мелочи, проходящей через сито с отверстиями 20 × 20 мм, в зависимости от марки и группы ферромарганца не должно превышать 10...20 % массы партии.

Ферросиликомарганец. Применяется для раскисления и легирования стали и сплавов. Это ферросплав, основой которого являются марганец с массовой долей не менее 60 % и кремний с массовой долей 10...25 %. Требования к ферросиликомарганцу определяет ГОСТ 4756–91 (ИСО 5447–80) «Ферросиликомарганец. Технические требования и условия поставки». Химический состав приведен в табл. 105.

105. Марки и химический состав, % мас., ферросиликомарганца

Марка	Si	Mn, не менее	C	P, классов		S
				А	Б	
не более						
MnС25	Св. 25	60,0	0,5	0,05	0,25	0,02
MnС22	Св. 20,0 до 25,0 включ.	65,0	1,0	0,10	0,35	0,02
MnС17	Св. 15,0 до 20,0 включ.	65,0	2,5	0,10	0,60	0,02
MnС12	Св. 10,0 до 15,0 включ.	65,0	3,5	0,10	0,60	0,02

Ферросиликомарганец различных классов поставляется в кусках размером 5...200 мм. Количество мешочка, проходящей через сито 20 × 20 мм, не должно превышать 15 % массы партии. Куски массой более 20 кг не должны превышать 5 % массы партии.

Металлический и азотированный марганец. Применяется для легирования специальных сталей и сплавов. Азотированный марганец (2...6 % N) используют при производстве многих марок стали. При выплавке коррозионно-стойких сталей аустенитного класса азот вводится как заменитель части никеля и его содержание достигает 0,5...0,6 %. Марки и химический состав металлического и азотированного марганца приведены в табл. 106 (ГОСТ 6008—90 «Марганец металлический и марганец азотированный. Технические условия»).

Предельно допустимая концентрация (ПДК) пыли марганца в воздухе рабочей зоны в пересчете на MnO_2 — 0,3 мг/м³ (ГОСТ 12.1.005—88).

106. Марки и химический состав, % мас., металлического и азотированного марганца

Марка	Способ производства	Mn, не менее	C	Si, P, S			N, не более
				Si	P	S	
Mn998	Электролитический	99,8	0,01	—	0,003	0,03	—
Mn997		99,7	0,06	—	0,005	0,10	—
Mn965	Электротермический	96,5	0,10	0,8	0,05	0,05	—
Mn95		95,0	0,20	1,8	0,07	0,05	—
Mn92H6	Азотирование электролитического	92,0	0,10	—	0,005	0,10	6,0
Mn87H6	Азотирование электротермического	87,0	0,20	1,8	0,07	0,05	6,0
Mn89H4		89,0	0,20	1,8	0,07	0,05	4,0
Mn91H2		91,0	0,20	1,8	0,07	0,05	2,0

Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) составляет:

90 г/м³ — для металлического марганца;

1000 г/м³ — для азотированного марганца.

Температура воспламенения аэрозоля составляет:

240 °С — для металлического марганца;

620 °С — для азотированного марганца.

Количество мелочи, проходящей через сито с размерами ячеек 2 × 2 мм, не должно превышать 5 % массы партии, а 10 × 10 мм и 5 × 5 мм — 10 %. Масса кусков должна быть не более 15 кг. Нормативы содержания марганца в объемах окружающей среды приведены в табл. 107.

107. Нормативы содержания марганца в объемах окружающей среды (ПДК)

Элемент или вещество	Воздух рабочей зоны, мг/м ³	Атмосферный воздух		Вода водосточников, мг/л	Почва, в 1 кг, мг	Класс опасности
		Максимальная разовая доза, мг/м	Среднесуточная доза, мг/м ³			
Марганец	0,3	—	—	0,1	1500	3
Марганец и его соединения в пересчете на MnO ₂ ; оксиды марганца в пересчете на MnO ₂	—	0,01	0,001	—	—	1
Аэрозоль конденсации	0,05	—	—	—	—	1

Алюминий. Для раскисления стали используется алюминий по ГОСТ 295–98 «Алюминий для раскисления, производства ферросплавов и алюминотермии. Технические условия».

Алюминий по этому стандарту изготавливается из первичного сырья или из лома и отходов алюминиевых сплавов, в том числе для раскисления в чушках и гранулах. Химический состав алюминия должен соответствовать табл. 108.

108. Марки и химический состав, % мас., алюминия

Марка	Al + Mg, не менее	В том числе Mg, не более	Примеси, не более					всего
			Cu	Zn	Si	Pb	Sn	
AB97	97,0	0,1	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	3,0
AB91	91,0	3,0	3,0	0,8	3,0	0,3	0,2	9,0
AB87	87,0	3,0	3,8	3,3	5,0	0,3	0,2	13,0

Чушки изготовляют массой не более 20 кг с пережимами и без пережимов, а также малогабаритные чушки массой не более 4 кг. Допускается изготовление крупногабаритных чушек массой более 200 кг. Гранулы изготовляют чечевицеобразными массой 0,5...15 г.

Силикокальций. Силикокальций, предназначенный для раскисления сталей и сплавов, изготовливают по ГОСТ 4762-71 «Силикокальций. Технические условия». Марки и химический состав силикокальция должны соответствовать табл. 109.

109. Марки и химический состав, % мас., силикокальция

Марка	Ca, не ме- нее	Si	Fe	Al	C	P
				не более		
СК10(ч)	10	Не менее 50	Не менее 25	1,0	0,2	0,02
СК10	10	Не менее 50	Не менее 20	1,5	0,5	0,04
СК15(ч)	15	Не менее 50	Не менее 20	1,0	0,2	0,02
СК15	15	Не менее 50	Не менее 15	1,5	0,5	0,04
СК20	20	Не менее 50	Не более 15	2,0	1,0	0,04
СК25(ч)	25	Не менее 55	Не более 10	2,0	0,5	0,04
СК25	25	50...70	Не более 12	2,0	1,0	0,04
СК30(ч)	30	Не менее 55	Не более 6	2,0	0,5	0,04

Окончание табл. 109

Марка	Са, не ме- нее	Si	Fe	Al	C	P
				не более		
СК30	30	50...70	Не более 6	2,0	1,0	0,04
С40К10	10	40...50	Не менее 25	1,0	0,2	0,02
С40К15	15	40...50	Не менее 20	1,0	0,2	0,02

В зависимости от класса крупности ГОСТ 4762–71 допускает размер кусков силикокальция до 200 мм. Предельно допустимая концентрация (ПДК) пыли SiO_2 в воздухе рабочей зоны — 2 мг/м^3 по ГОСТ 12.1.005–88. Нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ) пыли (размер частиц менее 50 мкм) сплавов силикокальция — $42...67 \text{ г/м}^3$, температура воспламенения аэрозоля — $650...795 \text{ }^\circ\text{C}$. Силикокальций в кусках размером свыше 2 мм в нормальных условиях не горюч, пожаро- и взрывобезопасен. Под действием воды из сплава выделяются пожаровзрывоопасные газы: водород, ацетилен. Количество выделяемых газов возрастает по мере увеличения содержания кальция и уменьшения размера частиц.

Ферросиликобарий. Алюминобарий. Применяется в качестве раскислителя и модификатора при выплавке стали и сплавов. Обычно барий сплавляют с каким-либо металлом, придающим ему стойкость [129]. Высокой раскислительной способностью обладают сплавы системы Al—Ba (алюминобарий), поскольку каждый компонент в отдельности имеет высокое сродство к кислороду. Эти лигатуры могут применяться и как модификаторы структуры конструкционных сталей и различных сплавов на железной основе. Химический состав Al—Ba лигатуры приведен в табл. 110.

110. Марки и химический состав, % мас., Al—Ba лигатуры

Марка	≥ Ba	≥ Si	≥ Fe	Al
АБА-45	45	0,9	0,7	Остальное
АБА-40	40	1,0	0,8	Остальное

Ферросиликостронций. Применяется для глубокой десульфурации и дефосфорации специальных сталей и сплавов. Для получения комплексного сплава стронция с барием, а также прямого легирования

стали и сплавов Sr и Ba, рационально использовать концентраты, содержащие карбонаты SrCO₃ и BaCO₃. Концентрат марки БСК-2 крупностью до 10 мм имеет следующий химический состав, % мас.:

SrO	BaO	CaO	SiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	CO ₂
5,5	16,0	21,5	24,8	0,9	3,0	1,5	4,0	18,0

Ферротитан. Применяется для легирования, раскисления и дегазации стали и сплавов. При выплавке коррозионно-стойкой и жаропрочной стали титан используют как стабилизатор, связывающий углерод в прочные карбиды и препятствующий образованию карбидов хрома. Титан уменьшает интеркристаллитную коррозию и улучшает свариваемость и коррозионную стойкость хромоникелевых сталей. Требования к ферротитану устанавливает ГОСТ 4761-91 (ИСО 5454-80) «Ферротитан. Технические требования и условия поставки».

Марки и химический состав приведены в табл. 111.

Максимальный размер частиц ферротитана должен быть не более 200 мкм. Ферротитан изготавливают в кусках не более 15 кг. Количество мелочи, проходящей через сито с размерами ячеек 10 × 10 мм, не должно превышать для различных марок 6...10%. ПДК пыли титана в воздухе рабочей зоны — 10 мг/м³. Нижний концентрационный предел воспламенения пыли — 140 г/см³ (ГОСТ 12.1.041-83). Ферротитан в нормальных условиях негорюч, пожаро- и взрывобезопасен.

Ферросиликоцирконий и ферроалюминцирконий. Циrконий используют в качестве раскислителя и микролегирующей добавки при выплавке стали. Марки и химический состав ферросиликоциркония приведены в табл. 112, а ферроалюминциркония — в табл. 113.

Бериллий. Используется для раскисления и легирования стали. В сочетании бериллия с никелем и хромом можно получать хромоникелевые стали (12% Cr, 11% Ni, 1% Be), имеющие высокую прочность и твердость при повышенных температурах. Конструкционный бериллий содержит до 97% Be. Бериллий и его соединения являются сильно токсичными веществами, поэтому его применение связано со строгим соблюдением правил техники безопасности.

Феррохром. Хром обладает высокими антикоррозионными свойствами и в качестве легирующего элемента входит в марки многих сталей и сплавов. Содержание хрома в сталях в зависимости от назначения и предъявляемых к ним требований изменяется от десятых долей процента до 30...40%. Используя хром как основной легирующий элемент и добавляя в сталь аустенито- (Ni, Mn, C, Si, N) и ферритообразующие (Al, V, Si, Ti, Mo, W, Nb, Ta) элементы, получают стали аустенито-

111. Марки и химический состав, % мас., ферротитана

Марка	Ti	Al	Si	C	P	S	Cu	V	Mo	Zr	Sn	Mn	Cr
	не более												
ФТн70С05	68...75	3	0,5	0,2	0,05	0,05	0,2	0,6	0,6	0,5	0,10	—	—
ФТн70С08	68...75	4	0,8	0,3	0,03	0,03	0,3	1,8	2,0	1,5	0,15	0,8	0,8
ФТн70С05Сн03	65...75	3	0,5	0,3	0,03	0,03	0,3	2,5	2,5	1,0	0,30	—	—
ФТн70С1	65...75	3	1	0,4	0,05	0,05	0,4	3,0	2,5	2,0	0,15	—	—
ФТн35С5	28...40	8	5	0,2	0,04	0,04	2	0,4	0,2	0,2	0,04	—	—
ФТн35С7	28...40	9	7	0,2	0,07	0,05	3	0,8	0,5	0,2	0,05	—	—
ФТн35С8	28...40	14	8	0,2	0,07	0,07	3	1,0	1,0	0,7	0,08	—	—
ФТн30	28...37	8	4	0,12	0,04	0,03	0,4	0,8	0,4	0,2	0,01	—	—
ФТн25	20...30	5...25	5...30	1,0	0,08	0,03	—	—	—	—	—	—	—

мартенситной и ферритной структуры [129]. Феррохром подразделяется на три группы: высоко-, средне- и низкоуглеродистый. Требования к феррохрому изложены в ГОСТ 4757–91 (ИСО 5448–81) «Феррохром. Технические требования и условия поставки». Содержание хрома в феррохроме различных марок находится в пределах 45...95 % (табл. 114).

112. Марки и химический состав, % мас., ферросиликоциркония

Марка	Zr не менее	Al	не более				Si;Zr
			C	P	S	Cu	
ФСЦр50	45	9,0	0,2	0,14	0,02	3,0	0,55
ФСЦр40	38	7,5	0,2	0,15	0,02	3,0	1,1
ФСЦр35	35	6,0	0,2	0,15	0,02	3,0	1,3
ФСЦр30	28	6,0	0,4	0,20	0,04	3,0	1,5
ФСЦр25	20	5,0	0,5	0,25	0,04	3,5	1,7

113. Марки и химический состав, % мас., ферроалюминциркония (ТУ 14-5-40–84)

Марка*	Zr не менее	Al	Si	не более			
				C	H	S	Ni
ФАЦр18	18	18	3,5	0,08	0,08	0,008	0,4
ФАЦр15	15	18	3,0	0,20	0,15	0,01	0,4

* Fe — оставшее.

114. Содержание хрома, %, в различных марках феррохрома

Содержание хрома	Обозначение
45,0...55,0	FeCr50
55,0...65,0	FeCr60
65,0...75,0	FeCr70
75,0...85,0	FeCr80
85,0...95,0	FeCr90

Химический состав высокоуглеродистого феррохрома с повышенным содержанием фосфора приведен в табл. 115.

115. Химический состав, % мас., высокоуглеродистого феррохрома с повышенным содержанием фосфора

Обозначение	Сг	С	Si		P	S	
			более	до и включ.			
FeCr...C50	В диапазоне от 45,0 до 75,0 включ. по табл. 114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	Сп. 4,0 до 6,0 включ.			0,05	0,10	
FeCr...C50LS			—	1,5			0,05
FeCr...C50Si2			1,5	3,0			0,10
FeCr...C50Si2LS							0,05
FeCr...C50Si4			3,0	5,0			0,10
FeCr...C50Si4LS							0,05
FeCr...C50Si7			5,0	10,0			0,05
FeCr...C70		Сп. 6,0 до 8,0 включ.	—	1,5	0,05	0,10	
FeCr...C70LS							0,05
FeCr...C70Si2			1,5	3,0			0,10
FeCr...C70Si2LS							0,05
FeCr...C70Si4			3,0	5,0			0,10
FeCr...C70Si4LS							0,05
FeCr...C70Si6			5,0	8,0			0,05
FeCr...C90		Сп. 8,0 до 10,0 включ.	—	1,5	0,05	0,10	
FeCr...C90LS							0,05
FeCr...C90Si2			1,5	3,0			0,10
FeCr...C90Si2LS							0,05
FeCr...C90Si4			3,0	5,0			0,10
FeCr...C90Si4LS							0,05

Химический состав высокоуглеродистого феррохрома с низким содержанием фосфора приведен в табл.116.

116. Химический состав, % мас., высокоуглеродистого феррохрома с низким содержанием фосфора

Обозначение	Cr	C	Si		P	S		
			более	до и включ.	не более			
FeCr...C50LP	В диапазоне от 45,0 до 75,0 включ. по табл.114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	Св. 4,0 до 6,0 включ.			0,03	0,10		
FeCr...C50LSLP			—	1,5		0,05		
FeCr...C50Si2LP			1,5	3,0		0,10		
FeCr...C50Si2LSLP						0,05		
FeCr...C50Si4LP			3,0	5,0		0,10		
FeCr...C50Si4LSLP						0,05		
FeCr...C50Si7LP			5,0	10,0		0,05		
FeCr...C70LP			Св. 6,0 до 8,0 включ.	—		1,5	0,03	0,10
FeCr...C70LSLP								0,05
FeCr...C70Si2LP				1,5		3,0		0,10
FeCr...C70Si2LSLP								0,05
FeCr...C70Si4LP				3,0		5,0		0,10
FeCr...C70Si4LSLP								0,05
FeCr...C70Si6LP				5,0		8,0		0,05
FeCr...C90LP	Св. 8,0 до 10,0 включ.	—		1,5	0,03	0,10		
FeCr...C90LSLP						0,05		
FeCr...C90Si2LP		1,5		3,0		0,10		
FeCr...C90Si2LSLP				0,05				
FeCr...C90Si4LP		3,0	5,0	0,10				
FeCr...C90Si4LSLP				0,05				

Химический состав среднеуглеродистого феррохрома с повышенным содержанием фосфора приведен в табл. 117.

117. Химический состав, % мас., среднеуглеродистого феррохрома с повышенным содержанием фосфора

Обозначение	Cr	C		Si	P	S
		более	до и включ.			
FeCr...C10	В диапазоне от 45,0 до 75,0 включ. по табл.114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	0,5	1,0	1,5	0,05	0,05
FeCr...C20		1,0	2,0			
FeCr...C40		2,0	4,0			

Химический состав среднеуглеродистого феррохрома с низким содержанием фосфора приведен в табл. 118

118. Химический состав, % мас., среднеуглеродистого феррохрома с низким содержанием фосфора

Обозначение	Cr	C		Si	P	S
		более	до и включ.			
FeCr...C10LP	В диапазоне от 45,0 до 75,0 включ. по табл.114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	0,5	1,0	1,5	0,03	0,03
FeCr...C20LP		1,0	2,0			
FeCr...C40LP		2,0	4,0			

Химический состав низкоуглеродистого феррохрома с повышенным содержанием фосфора приведен в табл. 119.

Химический состав низкоуглеродистого феррохрома с низким содержанием фосфора приведен в табл. 120.

119. Химический состав, % мас., низкоуглеродистого феррохрома с повышенным содержанием фосфора

Обозначение	Cr	C		Si	P	S	N
		более	до и включ.				
FeCr...C01	В диапазоне от 45,0 до 75,0 включ. по табл. 114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	—	0,015	1,5	0,05	0,03	0,15
FeCr...C03		0,015	0,030				
FeCr...C05		0,030	0,050				
FeCr...C1		0,050	0,10				
FeCr...C2		0,10	0,25				
FeCr...C5		0,25	0,50				

120. Химический состав, % мас., низкоуглеродистого феррохрома с низким содержанием фосфора

Обозначение	Cr	C		Si	P	S	N
		более	до и включ.				
FeCr...C01LP	В диапазоне от 45,0 до 75,0 включ. по табл. 114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	—	0,015	1,5	0,03	0,03	0,15
FeCr...C03LP		0,015	0,030				
FeCr...C05LP		0,030	0,050				
FeCr...C1LP		0,050	0,10				
FeCr...C2LP		0,10	0,25				
FeCr...C5LP		0,25	0,50				

Химический состав низкоуглеродистого феррохрома с высоким содержанием хрома приведен в табл. 121.

Химический состав низкоуглеродистого феррохрома, содержащего азот, приведен в табл. 122.

121. Химический состав, % мас., низкоуглеродистого феррохрома с высоким содержанием хрома

Обозначение	Cr	C		Si	P	S	Ni	Co	N
		более	до и включ.	не более					
FeCr...C01	В диапазоне от 75,0 до 95,0 включ. по табл. 114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	—	0,015	1,5	0,02	0,03	0,15	0,02	0,20
FeCr...C03		0,015	0,030						
FeCr...C05		0,030	0,050						

122. Химический состав, % мас., низкоуглеродистого феррохрома, содержащего азот

Обозначение	Cr	C	Si	P	S	N	
		не более		не более		более	до и включ.
Плавильный FeCr...C1N3	В диапазоне от 45,0 до 75,0 включ. по табл. 114 выбирается один из установленных стандартных диапазонов содержания хрома	0,10	Не более 1,5	0,03	0,025	2,0	4,0
Спеченный FeCr...C1N7			Не более 1,5			4,0	10,0
Спеченный FeCr...C1N7Si				Более 1,5			

Феррохром поставляется в кусках массой не более 20 кг или в виде дробленых и просеянных частиц. Высокоуглеродистый феррохром допускается изготавливать в чушках массой не более 30 кг. Размер кусков феррохрома в зависимости от класса крупности может быть в пределах от 5 до 315 мм.

При изготовлении феррохрома с установленной массой куска или чушки количество мелочи, проходящей через сетку с размерами ячеек 20×20 мм, не должно превышать 10 % массы партии для высокоуглеродистого феррохрома и 5 % — для низкоуглеродистого азотиrowанного и среднеуглеродистого феррохрома.

Изготавливают низко- и среднеуглеродистый феррохром средней плотности не менее $7,10 \text{ г/см}^3$ и высокоуглеродистый феррохром средней плотности не менее $6,8 \text{ г/см}^3$.

Поверхность и излом кусков феррохрома не должны иметь резко выраженных включений шлака, песка и других инородных материалов.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) феррохрома металлического в воздухе рабочей зоны — 2 мг/м^3 в соответствии с ГОСТ 12.1.005—88.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) хроматов, бихроматов (в пересчете на CrO_3) в воздухе рабочей зоны — $0,1 \text{ мг/м}^3$ в соответствии с ГОСТ 12.1.005—88.

Феррохром в кусках, гранулах и в дробленном виде негорюч, пожаро- и взрывобезопасен.

Ферросиликохром. Применяется для раскисления и легирования стали. Требования к ферросиликохрому определяет ГОСТ 11861—91 (ИСО 5449—80) «Ферросиликохром. Технические требования и условия поставки». Химический состав ферросиликохрома приведен в табл. 123.

Ферросиликохром изготавливают в кусках массой не более 20 кг. При этом допускается наличие кусков массой от 20 до 30 кг в количестве не более 10 %.

При изготовлении ферросиликохрома с установленной массой куска количество мелочи, проходящей через сито с размерами ячеек 20×20 мм, не должно быть более 5 % от массы партии.

Размер кусков в зависимости от класса может быть от 5 до 315 мм.

Металлический хром. Применяется для легирования стали. Требования к металлическому хрому определены ГОСТ 5905—2004 (ИСО 10387:1994) «Хром металлический. Технические требования и условия поставки». Химический состав металлического хрома приведен в табл. 124.

123. Химический состав, % мас., ферросиликохрома

Марка	Кремний	Cr	C	P	S
		не менее	не более		
ФХС20	От 16 до 23	48	4,5	0,04	0,02
ФХС20P				0,05	
ФХС33	От 30 до 37	40	0,9	0,03	
ФХС33P				0,04	
ФХС40	От 37 до 45	35	0,2	0,03	
ФХС40P				0,04	
ФХС48	Св. 45	28	0,1	0,03	
ФХС48P				0,04	

Примечание. В обозначении марок ферросиликохрома буквы означают: Ф — железо, Х — хром, С — кремний, P — фосфор.

124. Химический состав, % мас., металлического хрома

Марка металличе- ского хрома	Cr, не менее	Si	Al	Fe	C	S	P	Cu
		не более						
X99H1	99,0	0,2	0,5	0,5	0,01	0,02	0,005	0,005
X99H2	99,0	0,2	0,2	0,5	0,03	0,02	0,01	0,008
X99H4	99,0	0,2	0,2	0,5	0,03	0,02	0,02	0,01
X99H5	99,0	0,2	0,5	0,5	0,03	0,02	0,02	0,01
X99	99,0	0,2	0,5	0,5	0,03	0,02	0,02	0,02
X98,5	98,5	0,4	0,7	0,6	0,03	0,02	0,02	0,02
X97,5	97,5	0,5	1,5	1,2	0,05	0,04	0,03	0,05

Окончание таблицы 124

Марка металличе- ского хрома	As	Bi	Sb	Zn	Pb	Sn	Co	N
	не более							
X99H1	0,01	0,0004	0,002	0,005	0,0005	0,004	—	0,01
X99H2	0,01	0,0005	0,006	0,006	0,0008	0,004	0,005	0,02
X99H4	0,01	0,0005	0,008	0,006	0,0008	0,004	0,005	0,04
X99H5	0,01	0,0005	0,008	0,006	0,0008	0,004	—	0,05
X99	0,01	0,0005	0,008	0,01	0,001	0,004	—	—
X98,5	0,01	0,0005	0,008	0,01	0,001	0,004	—	—
X97,5	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. В обозначении марок буквы означают: X — хром, H — азот. Цифры означают минимальное содержание хрома в процентах и максимальное содержание азота в сотых долях процента.

Металлический хром поставляют в кусках массой не более 10 кг или в виде дробленых и просеянных частиц. Диапазон размеров частиц в зависимости от класса крупности находится в пределах 2...100 мм.

При изготовлении металлического хрома в кусках количество мелочи, проходящей через сито с размерами ячеек 10 × 10 мм, не должно превышать 10 % массы партии.

Пыль оксидов хрома способна вызывать аллергические заболевания. Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны (ПДК) — 1,0 мг/м³.

Пыль металлического хрома размером частиц менее 74 мкм относится к горючим веществам, взрывоопасна.

Ферросплавы с редкоземельными металлами (РЗМ). К редкоземельным металлам относятся лантан, лантаноиды (от церия до лютеция и III группы Периодической системы Д.И. Менделеева), а также скандий и иттрий. В металлургии используются, в основном, три редкоземельных металла: иттрий, лантан и церий, хотя в ферросплавах этого вида могут присутствовать в различных количествах и другие РЗМ. Ферросплавы с РЗМ используют при производстве стали для раскисления, модифицирования структуры стали и изменения состава неметалличе-

ских включений, поскольку содержащиеся в оксидных фазах MnO , SiO_2 и Al_2O_3 могут восстанавливаться РЗМ, вводимыми в жидкую сталь. Ферросплавы с редкоземельными металлами выплавляют углеродотермическим, алюминотермическим и электролитическим способами, способ выплавки влияет на содержание в ферросплаве алюминия. Химический состав ферросплавов с РЗМ приведен в табл. 125 [130].

125. Марки и химический состав, % мас., ферросплавов с РЗМ

Марка	Σ РЗМ	Si	Al*
ФС30РЗМ30	30...40	30...50	(2...4) / (4...8)
ФС30РЗМ20	20...30	30...55	(2...3) / (3...6)
ФС30РЗМ15	15...20	30...60	(2...6) / (6...10)
ФС30РЗМ10	10...15	30...60	(2...3) / (3...6)
ФС30РЗМ5	5...10	30...60	(2...8) / (6...15)

* В числителе углеродотермический способ, в знаменателе алюминотермический.

Ферровольфрам. Применяется для легирования стали, например, быстрорежущей. Требования к ферровольфраму определены ГОСТ 17293–93 «Ферровольфрам. Технические требования и условия поставки». Марки и химический состав ферровольфрама приведены в табл. 126.

Ферровольфрам поставляют в частицах с максимальным размером до 100 мм. Количество кусков, оставшихся на сетке 100×100 мм, должно быть не более 5 % массы партии, а количество мелочи, проходящей через сетку с размерами ячеек 5×5 мм, не более 10 %.

Ферромolibден. Используется для производства легированных сталей в качестве легирующего элемента. Требования к ферромolibдену изложены в ГОСТ 4759–91 (ИСО 5452–80) «Ферромolibден. Технические требования и условия поставки». Марки и химический состав ферромolibдена приведены в табл. 127.

Ферромolibден поставляется в кусках или в виде дробленых и просеянных частиц в зависимости от класса размерами от 2 до 100 мм. Пыль ферромolibдена обладает общетоксичным и фиброгенным действием. Предельно допустимая концентрация пыли молибдена и его нерастворимых соединений в воздухе рабочей зоны 6 мг/м^3 . Ферромolibден в нормальных условиях негорюч, пожаро- и взрывобезопасен.

126. Марки и химический состав, % мас., ферровольфрама

Марка	W	Si	C	Mn	Cu	Al	P	As	Sb	Al	Mo	Sn
		не более										
FeW80	70,0...85,0	1,0	1,0	0,6	0,25	0,05	0,06	0,10	0,05	0,10	1,0	0,10
FeW80LC	70,0...85,0	1,0	0,10	1,0	0,20	0,05	0,08	0,10	0,05	1,0	0,50	0,10

127. Марки и химический состав, % мас., ферромolibдена

Марка	Mo	W	Si	C	P	S	Cu	As	Sn	Sb	Ph	Zn	Bi
		не более											
ФМо60 (нк)	60	0,3	0,5	0,05	0,05	0,10	0,5	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ФМо60	60	0,3	0,8	0,05	0,05	0,10	0,5	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ФМо58 (жк)	58	0,5	0,5	0,08	0,05	0,10	0,8	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
ФМо58	58	0,5	1,0	0,08	0,05	0,12	0,8	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
ФМо55	55	0,8	1,5	0,10	0,10	0,15	1,0	—	0,05	0,05	—	—	—
ФМо50	50	—	3,0	0,50	0,10	0,50	2,0	—	0,10	0,10	—	—	—

Феррованадий. Ванадий используют как один из основных легирующих элементов при выплавке быстрорежущей, легированной, инструментальной и хладостойкой конструкционной сталей. При легировании ванадием до 0,15...0,25 % резко повышаются прочность, вязкость, сопротивление усталости и износостойкость стали. Ванадий является одновременно раскисляющим и карбонитридообразующим элементом. Образует карбиды, ванадий измельчает структуру стали, в сталях аустенитного класса он стабилизирует феррит при высоких температурах и низком содержании углерода [130]. Присадка азотированного ванадия в стальную ванну сопровождается растворением азота, а при кристаллизации слитков и термической обработке металлопроката нитрид ванадия выделяется в виде самостоятельной фазы VN или карбонитрида V[C, N] [122].

Требования к феррованадию определяет ГОСТ 27130—94 «Феррованадий. Технические требования и условия поставки». Марки и химический состав феррованадия приведены в табл. 128.

128. Марки и химический состав, % мас., феррованадия

Марки	V	Не более							
		Mn	Si	C	Cu	As	Al	P	S
ФВд50У0,4	48...60	2,7	1,8	0,40	0,2	0,01	0,2	0,07	0,02
ФВд50У0,5	48...60	4,0	2,0	0,50	0,2	0,01	0,3	0,07	0,02
ФВд50У0,6	48...60	5,0	2,0	0,60	0,2	0,02	0,3	0,07	0,03
ФВд50У0,3	Не менее 50	0,2	2,0	0,30	0,2	0,05	2,5	0,10	0,10
ФВд50У0,75	Не менее 50	0,2	2,0	0,75	0,2	0,05	2,5	0,10	0,10
ФВд40У0,5	35...48	2,0	2,0	0,50	0,4	0,03	0,5	0,08	0,05
ФВд40У0,75	35...48	4,0	2,0	0,75	0,4	0,03	0,5	0,08	0,05
ФВд40У1	35...48	6,0	2,0	1,00	0,4	0,03	0,5	0,10	0,05

Феррованадий изготовляют дробленным в кусках массой не более 5 кг. Количество мелочи, проходящей через сито с размером ячеек

10 × 10 мм, не должно превышать 5 % от массы партии, количество мелочи, проходящей через сито с размером ячеек 2 × 2 мм, — не более 3 % от массы партии. Размеры частиц — до 100 мм в зависимости от класса крупности.

Пыль феррованадия является высокоопасной.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) пыли феррованадия в воздухе рабочей зоны составляет 1 мг/м³ в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) оксида ванадия в воздухе рабочей зоны составляет 0,5 мг/м³ в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88.

Феррованадий в нормальных условиях негорюч, пожаровзрывобезопасен. Нижний концентрационный предел воспламенения порошка феррованадия с размером частиц менее 74 мкм — 1300 г/м³, температура самовоспламенения в слое — 400 °С, в облаке — 440 °С.

Никель. Ферроникель. Никель применяется для легирования многих марок стали. Первичный никель, используемый для легирования сталей, должен соответствовать ГОСТ 849–2008 «Никель первичный. Технические условия», который вводится в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2009 года взамен ГОСТ 849–97. Химический состав никеля по ГОСТ 849–2008 приведен в табл. 129.

129. Марки и химический состав, % мас., никеля

Марка	Ni + Co, не менее	В том числе Co, не более	Примеси, не более						
			C	Mg	Al	Si	P	S	Mn
H-0	99,99	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
H-1Au	99,95	0,10	0,01	0,001	—	0,002	0,001	0,001	—
H-1y	99,95	0,10	0,01	0,001	—	0,002	0,001	0,001	—
H-1	99,93	0,10	0,01	0,001	—	0,002	0,001	0,001	—
H-2	99,8	0,15	0,02	—	—	0,002	—	0,003	—
H-3	98,6	0,7	0,10	—	—	—	—	0,003	—
H-4	97,6	0,7	0,15	—	—	—	—	0,004	—

Окончание таблицы 129

Марка	Примеси, не более								
	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi
H-0	0,002	0,001	0,0005	0,0005	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0001
H-1Au	0,01	0,01	0,0010	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0001
H-1y	0,01	0,015	0,0010	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003
H-1	0,02	0,02	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0006
H-2	0,04	0,04	0,005	—	—	—	—	0,01	—
H-3	—	0,6	—	—	—	—	—	—	—
H-4	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—

Никель изготавливают в виде: катодных листов; полос и пластин произвольного размера, нарезанных из листов; обрезки, гранул и слитков. Масса слитков должна быть не более 25 кг.

Ферроникель производится на Побужском ферроникелевом комбинате (Украина).

Химический состав ферроникеля производства Побужского ферроникелевого комбината приведен в табл. 130 [122].

130. Химический состав ферроникеля производства Побужского ферроникелевого комбината

Элемент	Содержание элемента, %, в составе марки		
	ФН-5М	ФН-6 (ФСН)	FeNi 20*
Ni	5...25	12...18	15...25
Co	0,3...0,6	0,5...0,8	**
Si	Не более 0,3	Не более 0,4	Не более 0,4
C	Не более 0,1	1,0...2,5	1,0...2,5
Cr	Не более 0,3	Не более 2,0	Не более 2,0
S	Не более 0,08	Не более 0,1	Не более 0,4
P	Не более 0,03	Не более 0,03	Не более 0,03
Fe	Основа	Основа	Основа

* По международному стандарту ISO 6501:1998 (E)
 ** Отношение Co/Ni — 1/20 — 1/40 (для следения)

При использовании побужской руды получают бедный ферроникель (4...6 % Ni). Импортная никелевая руда из Новой Каледонии позволяет выплавлять ферроникель с содержанием 15...25 % Ni [122]. Масса слитка ферроникеля 25...35 кг. В России ферроникель выплавляют на Бурукхальском заводе (Оренбургская область) с содержанием Ni 14...16 % [122].

Ферробор. Бор — микролегирующий элемент. Даже при небольших добавках в стали он оказывает большое влияние на комплекс механических свойств. Бор влияет на прокаливаемость стали, причем это проявляется наиболее значительно при концентрациях его в твердом растворе в пределах 0,001...0,004 % [122]. Требования к ферробору изложены в ГОСТ 14848—69 «Ферробор. Технические условия». Марки и химический состав ферробора приведены в табл. 131.

131. Марки и химический состав, % мас., ферробора

Марка	В, не менее	Si	Al	C	S	P	Ca
		не более					
ФБ20	20	2	3	0,05	0,01	0,02	0,05
ФБ17	17	3	3	0,20	0,02	0,03	0,10
ФБ12	12	10	10	—	—	—	—
ФБ6	6	10	10	—	—	—	—

Ферробор поставляется в кусках массой не более 10 кг. При этом количество мелочи, проходящей через грохот с отверстиями 10 × 10 мм, не должно превышать 5 % общей массы ферробора. Размер частиц в зависимости от класса крупности — до 100 мм.

Ферроникобий. Ниобий широко используют в виде ферроникобия для микролегирования конструкционных сталей, в том числе низколегированных трубных сталей для магистральных нефтепроводов, и хромоникелевых нержавеющей сталей для предотвращения межкристаллитной коррозии [130]. Требования к ферроникобию определяет ГОСТ 16773—2003 (ИСО 5453:1980) «Ферроникобий. Технические требования и условия поставки». Марки и химический состав ферроникобия (с указанием суммы ниобия и тантала) приведены в табл. 132.

Ферроникобий поставляют в кусках или в виде дробленых и просеянных частиц. Размер частиц — до 100 мм.

132. Марки и химический состав, % мас., ферроникобия

Марка ферроникобия	Ni + Ta, в пределах	Ta	Si	Al	Ti не более	C	S	P
ФН660	55...65	1,0	1,5	3,0	1,0	0,1	0,03	0,10
ФН658	50...65	1,0	2,0	6,0	1,0	0,2	0,03	0,15
ФН658(ф)	50...65	—	2,0	6,0	2,0	0,3	0,05	0,40
ФН655(ф)	55...65	—	5,0	8,0	2,0	0,5	0,3	2,0
ФН655С	50...64	—	15	4,0	8,0	0,2	0,03	0,30
ФН650С	40...65	—	20	6,0	—	0,5	0,05	0,50

Пыль ферроникобия обладает умеренным фиброгенным действием. Предельно допустимая концентрация пыли ферроникобия в воздухе рабочей зоны — 10,0 мг/м³.

Пыль ферроникобия относится к горючим веществам.

У ферроникобия нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) для разных марок в зависимости от содержания тантала, титана и алюминия находится в пределах 800...1500 г/м³, температура воспламенения 1200...1500 °С (в слое и во взвеси).

Медь. Применяется для легирования стали. Требования к меди определены ГОСТ 859—2001 «Медь. Марки». Химический состав меди приведен в табл. 133.

133. Химический состав, % мас., меди

Элемент	Массовая доля для марок			
	M00к	M0к	M1к	M2к
Медь, не менее	—	99,97	99,95	99,93
Примеси по группам, не более				
1 Висмут	0,00020	0,0005	0,001	0,001
Селен	0,00020	—	—	—
Теллур	0,00020	—	—	—
Сумма 1-й группы	0,00030	—	—	—

Описание табл. 133

Элемент	Массовая доля для марок			
	M00к	M0к	M1к	M2к
2 Хром	—	—	—	—
Марганец	—	—	—	—
Сурьма	0,0004	0,001	0,002	0,002
Кадмий	—	—	—	—
Мышьяк	0,0005	0,001	0,002	0,002
Фосфор	—	0,001	0,002	0,002
Сумма 2-й группы	0,0015	—	—	—
3 Свинец	0,0005	0,001	0,003	0,005
4 Сера	0,0015	0,002	0,004	0,010
5 Олово	—	0,001	0,002	0,002
Никель	—	0,001	0,002	0,003
Железо	0,0010	0,001	0,003	0,005
Кремний	—	—	—	—
Цинк	—	0,001	0,003	0,004
Кобальт	—	—	—	—
Сумма 5-й группы	0,0020	—	—	—
6 Серебро	0,0020	0,002	0,003	0,003
Сумма перечисленных примесей	0,0065	—	—	—
Кислород, не более	0,01	0,015	0,02	0,03

Загрузка и плавление шихты. Загрузка шихты в печь, как правило, производится через верх печи с помощью загрузочных бадей. Перед загрузкой печь должна быть тщательно очищена от остатков металла и шлака, подина и откосы в поврежденных местах заправлены смесью

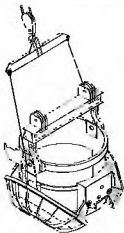


Рис. 100. Загрузочная бадейка грейферного типа

песка с жидким стеклом. Укладку шихты в бадейке обычно производят таким образом, чтобы мелкая и легковесная шихта расположилась в нижней (с целью предупреждения от повреждения днища бадейки и подины печи) и верхней (с целью лучшего уплотнения) части бадейки, а в средней части — кусковой стальной лом и литейный возврат. Под электроды подкладывается кокс или электродный бой. Укладка шихты производится с таким расчетом, чтобы между кусками не оставались большие зазоры. Особенно важна плотность верхнего слоя завалки. Необходимо контролировать точность массы шихты, поступающей на плавку.

На рис. 100...102 показаны: бадейка грейферного типа, схема раскрытия бадейки грейферного типа и схема раскрытой бадейки грейферного типа.

В кислой электропечи период плавления является наиболее продолжительным по сравнению с другими периодами (60...70 % от общей длительности плавки), и его форсирование существенно влияет на сокращение продолжительности плавки в целом. Период плавления поглощает соответственно 60...70 % электроэнергии, расходуемой на плавку. Для быстрого расплавления металлической завалки в кислой электропечи необходимы правильная шихтовка, плотная укладка шихты, работа на максимальной мощности, минимальные тепловые потери.

На некоторых заводах для сокращения периода плавления шихту подогревают вне печи или в печи за счет тепла сжигаемых газов. Энергетические параметры дуговых печей небольшой вместимости создают объективные условия для интенсификации периода плавления. Проблема интенсификации периода плавления в печах с кислой футеровкой сводится прежде всего к максимальному использованию мощности печного трансформатора.

В процессе плавления следят за тем, чтобы не образовывались мосты и шихта не оседала на откосах. Наиболее быстро процесс идет при компактной укладке шихты, ее быстром и одновременном оседании по всему объему рабочего пространства печи и самоуплотнении. В этом случае отсутствуют потери времени на подъем электродов для организации обвалов шихты.

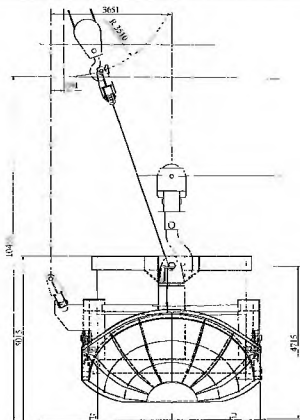


Рис. 101. Схема раскрытия бады грейферного типа

В начале периода плавления для установления контакта электродов с шихтой, начала проплавления колодцев и во избежание поджога свода длинными дугами в течение 5...10 мин работают на небольшой мощности при коротких дугах. После образования колодцев длинные

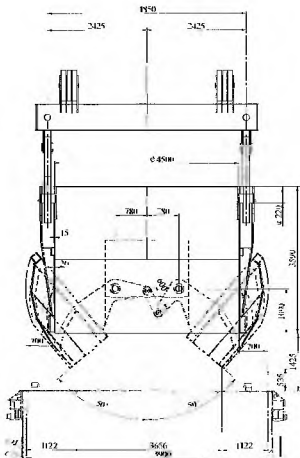


Рис. 102. Схема раскрытой бадьи грейферного типа

дуги экранированы шихтой и не вызывают перегрева футеровки. С этого момента весь период плавления проводится на максимальной мощности при наивысших напряжении и силе тока. По данным К.Х. Хайрова, в аналогичных условиях при напряжении 160 В шихта расплавилась за 146 мин, при 190 В — за 125 мин, при 220 В — за 112 мин, при 235 В — за 109 мин.

На некоторых заводах для ускорения периода плавления с помощью металлических трубок диаметром не менее 12,7 мм в течение 10...20 мин под давлением 500...700 кПа в зону действия электрического дуг вдувают кислород. При расходе кислорода 4...6 м³/т длительность плавления сокращается на 10...20 мин [131].

В процессе плавления окисляются главным образом Si, Mn и Fe. В зоне дуг металл частично испаряется (2...3 %); пары металла, окисляясь, удаляются в виде бурого дыма. Выделение белого дыма свидетельствует о восстановлении кремния из подины, при этом отключают печь и сталкивают под электроды твердые куски шихты или вводят шлакообразующие материалы.

Для наводки шлака в период плавления в печь прищипывают кварцевый песок, а, при необходимости, железную руду и известняк. Первый шлак периода плавления, когда еще имеются нерасплавленные куски шихты, содержит 36...38 % SiO₂; 31...35 % FeO; 8...9 % Fe₂O₃; 19...21 % MnO; 1...1,5 % Al₂O₃. К концу периода плавления ванна имеет нормальный шлаковый покров не более 4 % от массы плавки.

6.2. ПРОДУКТ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА — ШИХТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

В мире накоплен опыт применения продуктов прямого восстановления железа в дуговых сталеплавильных печах, например, на фирме ACINDAR, Аргентина, заводе Stelco, Канада, Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК), Россия, заводе Inmetco, США, электрометаллургическом заводе в г. Гамбург, Германия, электрометаллургическом мини-заводе Hamil Steel, ОАЭ и многих других [123].

В настоящее время мировые мощности по производству железа прямого восстановления превышают 50 млн т, а мировое производство — более 40 млн т.

Анализ работы дуговых сталеплавильных печей с применением в шихте продуктов прямого восстановления железа позволяет сделать следующие выводы:

— наиболее целесообразно загружать в дуговую печь продукты прямого восстановления железа в горячем состоянии и в брикетированном виде (например, известен положительный опыт загрузки в дуговую печь

металлизированных окатышей с температурой 700...750 °С). Можно использовать комбинацию из горячих и холодных брикетов;

- целесообразно устанавливать оборудование для прямого восстановления железа и брикетирования продуктов прямого восстановления железа в непосредственной близости к электросталеплавильным печам. Опыт использования брикетированных продуктов прямого восстановления железа в электросталеплавильном производстве фирмы ACINDAR (Аргентина) подтверждает жизнеспособность объединения производства прямого восстановления железа и электросталеплавильного производства [128]. Существует система NOTLINK, при которой используется сила тяжести горячих брикетов — шахтную печь прямого восстановления подсоединяют непосредственно к смежной дуговой печи. Производительность дуговой печи при этом возрастает на 20 %;

- применение в шихте для электросталеплавильных печей продуктов прямого восстановления железа более экономично, чем выплавка стали с использованием 100 % стального лома;

- повышается выход годного;

- применение продуктов прямого восстановления железа приводит к увеличению производительности дуговых сталеплавильных печей. Например, замена стального лома на металлизированные окатыши в 30-тонной дуговой печи на заводе Stelco привела к сокращению продолжительности плавки в 2 раза — с 3 до 1,5 ч. Ряд авторов отмечают, что замена скрапа на металлизированные окатыши приводит к увеличению производительности электродуговой печи или к снижению ее мощности при сохранении производительности [124];

- снижается расход электроэнергии, по некоторым данным, на 120...140 кВт·ч/т [124];

- снижается расход электродов на 0,5...0,6 кг/т жидкой стали;

- снижается расход огнеупоров;

- сталь, выплавленная с применением в шихте 100 % продуктов прямого восстановления железа вместо 100 % стального лома, имеет меньшее содержание азота (20 вместо 70 ppm) и водорода (2,5 ppm)

Продукты прямого восстановления железа находят применение также в индукционных печах.

Шихта для прямого восстановления железа может состоять из 100 % железорудных окатышей, 100 % крупнокусковой железной руды или смеси окатышей и руды в различных пропорциях. Доля окатышей обычно составляет 60...80 % и соответственно 40...20 % кусковой железной руды (размер кусков от 3 до 38 мм). Окатыши имеют такие преимущества, как узкий сытоый состав, однородность формы, меньшее количество мелочи, большая однородность химического и минералогического

состава, большая способность к восстановлению, высокая прочность. Кусковая железная руда способствует уменьшению слипания шихты, повышению температуры восстановления, повышает производительность печи. Ряд фирм разработали технологию изготовления окатышей, специально предназначенных для прямого восстановления. Чаще всего окатыши для прямого восстановления производятся с применением в качестве обжигового оборудования конвейерных машин, так как полученные на них окатыши более однородны по форме и крупности, образуют немного мелочи. Мелочь ухудшает работу печи, поэтому исходные материалы подвергают грохочению. Важными показателями шихты для прямого восстановления железа являются газопроницаемость, пористость, влажность и прочность окатышей. Шихта должна содержать максимум возможное количество железа — желательны 65...69%, не более 5% ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), не более 0,02% серы, минимум фосфора и щелочей, основность 0,5...0,9. Количество кусковой руды в шихте связано с диаметром шахтной печи: чем больше диаметр, тем больше может быть в шихте кусковой руды.

Прямое восстановление железа может производиться с помощью твердых восстановителей (уголь, кокс) или газообразных (реформированный природный газ, коксовый газ, газифицированный уголь, жидкое топливо). Исследования показали, что более целесообразно применение газа. Сегодня в мире 95% железа прямого восстановления производится с помощью газа, который, как правило, является реформированным природным газом, содержащим 95% ($\text{CO} + \text{H}_2$), часть отходящего газа используется повторно.

В состав комплекта оборудования для прямого восстановления железа входят восстановительная шахтная печь, печь реформинга (или реформер), система технологического газа, система рекуперации тепла, система горячего брикетирования железа прямого восстановления (рис. 103). Шахтная печь состоит из нескольких секций или зон, каждая из которых выполняет свою функцию. В верхней части печи расположена система загрузки окатышей и верхний уплотнительный отсек. Верхняя часть печи (от уровня засыпки шихты до нижнего отверстия реформированного газа) является восстановительной зоной. Восстановленное железо спадает через нижнюю зону к выгрузочному отверстию печи. С помощью системы труб и конструкции загрузочного устройства в печи обеспечивается равномерное распределение окатышей и равномерный поток реформированного газа. Процесс начинается с подачи в шахтную печь окатышей (или частично кусковой руды). Шихтовые материалы находятся в восстановительной зоне с огнеупорной футеровкой в течение 3...4 ч.

Восстановительный газ (H_2 и CO) поступает в печь через несколько отверстий, расположенных по периметру печи в нижней части восста-

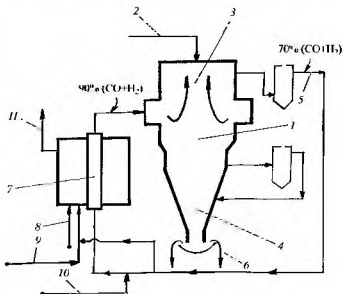


Рис. 103. Схема процесса прямого восстановления железа

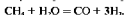
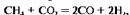
1 — шахтная печь; 2 — загрузка окислов железа; 3 — зона восстановления; 4 — зона охлаждения; 5 — очистка; 6 — восстановленное железо; 7 — реформер; 8 — подвод воздуха; 9 — подвод топлива горелки; 10 — подвод восстановительного газа; 11 — рециркулятивный

новительной зоны, затем происходит его смешение с шихтой и реакция с оксидом железа, в результате которой образуется металлургический продукт. Восстановительная зона печи футерована плавнелитыми огнеупорами. Зона выгрузки состоит из футерованного конуса и устройства, способствующего прохождению восстановленного железа через конус, железо выдвигается из печи при температуре более 700 °С и передается к брикетировочной машине. Восстановление железа происходит по следующим реакциям:



В процессе восстановления железа постоянно контролируется содержание в нем углерода. Отработанные восстановительные газы охлаждаются, промываются для удаления захваченной пыли и возвращаются в печь реформинга для повторного использования. Температура восстановительного газа в шахтной печи 850...900 °С, а при дополнительной инъекции кислорода 950 °С. Около половины общего объема CO и H₂ в восстановительном газе, который подается в шахтную печь, происходит от повторно использованного отработанного восстановительного газа.

Установка реформинга представляет собой печь с подовым нагревом и верхней тягой. Она выполнена в виде футерованной огнеупорными сварной металлоконструкции, содержащей вертикальные заполненные катализатором реакционные трубы, изготовленные способом центробежного литья. Активный компонент катализатора — никель. Смесь технологического газа с природным подается в реакционные трубы и проходит через слой катализатора, в результате чего получается горячий газ, содержащий H₂ и CO:



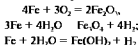
Соотношение H₂:CO составляет величину 1,5...1,66.

Достигнутое содержание железа в продуктах прямого восстановления составляет, как правило, 91,4...95 %, а при дополнительной подаче в печь смеси природного газа и кислорода (по данным Оскольского электрометаллургического комбината) 95...97 %. Удельный расход топлива составляет 2,65...2,67 Гкал на 1 т восстановленного железа.

После проведения процесса прямого восстановления железа чаще всего производится горячее брикетирование полученного продукта на брикет-прессах. Горячие продукты прямого восстановления подаются на брикет-прессы шнековыми питателями. Брикетирование вначале производится в брикетные полосы, а затем брикетные полосы разделяются в сепараторах на отдельные брикеты [127].

Важнейшим фактором, который нужно учитывать для безопасности процесса получения продукта прямого восстановления железа, его хранения и транспортирования, является склонность этого продукта к самосожжению. Восстановленное железо содержит большое количество ненасыщенных валентных связей в результате восстановления железа. Кроме того, восстановленное железо имеет большую пористую свободную поверхность. Поэтому при контакте с кислородом и даже при незначительном повышении температуры губчатое железо снова окисляется. Эти реакции происходят с выделением тепла, постепенно начинается тление, которое может перейти в пожар.

Повторное окисление железа происходит следующим образом:



Самовозгорание начинается при температуре 150°C, особенно активно при температуре 200°C. Нагреву губчатого железа и его самовозгоранию способствует также его низкая теплопроводность из-за его высокой пористости, в условиях быстрого окисления тепла может выделяться больше, чем отдается теплопроводностью. Самовозгоранию железа способствует также его увлажнение морской водой, так как морская вода содержит растворенные соли и реагирует с губчатым железом более бурно, чем пресная. Восстановленное железо может возгораться при появлении источников тепла, особенно при непосредственном воздействии открытого огня, каплей расплавленного металла и других источников загорания. При реакции с водой выделение водорода может привести к взрыву, при достаточной концентрации водород возгорается.

На возможность пожароопасности и фактического возгорания восстановленного железа указывается в ряде источников, например [125]. Роберт Хантер [126] приводит данные о том, что Международная организация торгового флота классифицирует продукт прямого восстановления железа как «Материал, опасный в насыпи». Хантер также указывает, что за трехлетний период 4% перевозок морем продуктов прямого восстановления были связаны с возгоранием железа из-за недостаточно сухого состояния трюмов.

Меры по предотвращению возгорания железа, полученного прямым восстановлением, можно разделить на следующие группы:

- меры до прямого восстановления;
- меры сразу после прямого восстановления;
- меры при хранении губчатого железа;
- меры при транспортировке губчатого железа.

Примером мер до прямого восстановления железа может быть пассивация окатышей на Оскольском электросталургическом комбинате: раствор мела подается в верхнюю часть шахтной печи, где этим раствором обрабатываются окатыши перед восстановлением. В результате в восстановленном железе перекрыта большая часть пор и их окисление кислородом воздуха не происходит.

Одной из эффективных мер борьбы с возгоранием губчатого железа непосредственно после восстановления является брикетирование, особенно горячее брикетирование [126]. После брикетирования у восстановленного железа значительно сокращается общая пористая поверхность и, соответственно, тенденция к повторному окислению. Питч

отмечает отсутствие окисления брикетированного восстановленного железа, даже если брикеты хранятся под открытым небом. По данным Хантера, брикетирование целесообразно проводить при температуре не менее 650°C , при этом достигается насыпная плотность 5 г/см^3 [126].

При брикетировании целесообразно использовать жидкое связующее вещество, которое участвует в повышении прочности брикета и предотвращает повторное окисление губчатого железа в присутствии пресной воды (например, во время дождя). Это проверено на нескольких сотнях тысяч тонн брикетов, поставленных сталеплавильной и литейной промышленности. Другой мерой защиты губчатого железа от возгорания непосредственно после восстановления является защитное покрытие. Фирма Midrex Technologies, Inc запатентовала процесс «Chemapite», когда восстановленное железо покрывается тонкой клейкой пленкой, делающей его стойким к повторному окислению. Хантер отмечает, что для этого применяют силикат натрия (растворимое стекло), замедляющий процесс окисления [126]. Но это эффективно только при контакте с пресной водой, а не с морской (в последнем случае эта мера не эффективна).

При выгрузке восстановленного железа из шахтной печи должны непрерывно контролироваться температура с помощью быстродействующего щупа измерения температуры, работающего по принципу инфракрасного излучения. При выходе из печи температура железа должна быть не более 70°C . При температуре более 60°C его нужно охлаждать инертным газом или азотом. Если усредненное значение трех измерений температуры окажется более 100°C , то нужно производить аварийный сброс железа, при одной из температур более 110°C — также аварийный сброс. Аварийно сброшенное железо должно складываться в аварийных боксах, толщина слоя не более $0,5\text{ м}$, а масса штабеля не более 50 т . Крупные спекы также должны уйти в аварийный сброс, так как внутри них температура может быть больше допустимой. Существует также принцип «старения» губчатого железа, когда контакт с воздухом создает очень тонкий слой оксидной пленки, которая замедляет темп дальнейшего окисления, при этом должен контролироваться объем кислорода [126].

Ряд мер борьбы с возгоранием продукта прямого восстановления железа применяется при его хранении и транспортировке.

6.3. ОКИСЛЕНИЕ УГЛЕРОДА

Металл с содержанием $0,10\text{--}0,20\%$ С выше нижнего предела заданной марки стали расплавляют и ведут окисление углерода, как правило, за счет оксидов железа печного шлага. При более высоком содержании С по расплавлению его окисляют за счет присадок кусковой

(25...60 мм) железной руды небольшими порциями (не более 0,2 % от массы металла каждая), которую вводят в нагретый металл (когда он самопроизвольно начинает закипать), так как добавка руды при недостаточно нагретом металле может привести впоследствии к выбросам металла и шлака через рабочее окно.

Кипение можно интенсифицировать и небольшими присадками известняка. Вводимый при этом CaO вытесняет из содержащихся в шлаке силикатов оксиды железа как более слабые основные оксиды, и тем самым повышает активность FeO, а следовательно, и окислительную способность шлака [131]. Длительность кипения составляет 10...40 мин; количество выгоревшего углерода 0,1...0,2 %; скорость окисления углерода без железной руды 0,2...0,3 % С/ч; с железной рудой 0,3...0,6 % С/ч. После присадки последней порции железной руды ванна продолжает кипеть не менее 10 мин («чистый кип»). Кипение способствует выравниванию температуры металла. Содержание Mn в металле обычно по расплавлению составляет 0,15...0,2 %, а к концу кипения – 0,1 %, содержание Si к концу кипения 0,03...0,05 %. В период рудного кипения шлак содержит 30...40 % FeO, 40...50 % SiO₂, 7...8 % CaO, 8...10 % MnO. По мере окисления С содержание оксидов железа в шлаке уменьшается (как правило, до уровня 20 %), а содержание кремнезема растет и к концу окислительного периода составляет 45...55 %.

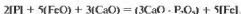
На некоторых отечественных и зарубежных заводах окисление углерода в кислой печи производят путем продувки ванны в течение 2...3 мин кислородом через железные трубки диаметром 12,7...25,4 мм, футерованные снаружи огнеупорной обмазкой или шамотными трубками. Давление кислорода составляет 300...1200 кПа, расход 3...8,5 м³/мин, скорость окисления углерода 0,04...0,05 % С/мин. Иногда в конце кипения присаживают 3...5 кг/т ферромарганца или марганцовистого чугуна, и ванна вновь закипает.

После проведения окисления углерода скачивают 30...50 % шлака, наводят новый, а затем раскисляют металл либо приступают к раскислению металла без скачивания окислительного шлака. В конце окислительного периода температура металла, как правило, выше температуры во время выпуска плавки из печи. Содержание углерода должно быть на уровне нижнего предела заданной марки стали.

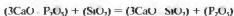
Химическое воздействие окислительных шлаков на футеровку в период окисления углерода отрицательно сказывается на ее стойкости. Кислая футеровка поглощает кислород из металла по реакции: $2[Fe]_x + [O] = (FeO)_x$. При этом (FeO) взаимодействует с SiO₂ футеровки и образует легкоплавкий силикат, т.е. $2(FeO)_x + SiO_{2фт} = (2FeO \cdot SiO_2)$. Отсюда ясно, что футеровка разрушается в период окисления металла и повышения содержания оксида железа в шлаке, особенно в моменты присадок железной руды.

6.4. ПОВЕДЕНИЕ ФОСФОРА И СЕРЫ В КИСЛОЙ ПЕЧИ

Одним из принципиальных отличий кислого процесса выплавки стали от основного является невозможность удаления под кислым шлаком P и S из металла. Как известно, дефосфорация в основной печи происходит по реакции:



Если в кислом шлаке и образуется $(3CaO \cdot P_2O_5)$, то высокое содержание (SiO_2) и относительно низкое (CaO) приводит к рефосфорации, т.е.



с последующим восстановлением фосфора.

Десульфурация стали в основной печи происходит главным образом по реакции:



Для успешного ее протекания требуется высокое содержание свободного CaO в шлаке, что невозможно осуществить в условиях кислой электроплавки.

Поэтому при шихтовке главок нужно уделять особое внимание содержанию P и S в стальном ломе. В последние годы содержание этих элементов в кислой стали заметно снизилось. Это объясняется тем, что в качестве шихтовых материалов для кислой плавки применяются главным образом отходы, образующиеся при сварке, штамповке и механической обработке проката с более низким содержанием P и S. Различные мероприятия по улучшению качества стали в черной металлургии (использование природного газа для мартеновских печей, малосернистого чугуна для кислородно-конвертерного процесса и т.д.) привели к значительному снижению содержания в стали P и S.

В связи с развитием внепечных способов десульфурации стали представляют интерес результаты ранее проведенных работ по удалению S из кислой электростали. Б.Н. Ладьяженский и А.Д. Башмаков проводили опыты по десульфурации стали в кислой дуговой печи путем продувки стали порошком CaC_2 в струе инертного газа, при этом содержание S снижалось на 0,009...0,04 %. В другом случае при десульфурации кислой электростали в ковше порошкообразными материалами содержание S снижалось более чем на 0,01 %.

На ряде отечественных заводов в кислых электропечах P удаляют путем кратковременной наводки железистоизвестковых шлаков, а S — известковых высокоосновных шлаков. Так, на одном из заводов М.И. Топаллер разработан и внедрен технологический процесс вы-

плавки стали в кислых дуговых печах, по которому после окончания периода окисления С скачивают до 60 % шлака, затем наводят новый путем присадки железной руды в количестве 2,5...3 кг/т металлошихты и некоторого количества извести. После выдержки ванны под этим шлаком в течение 15...20 мин весь шлак скачивают и наводят новый путем ввода свежесожженной извести в количестве 8...10 кг/т металлошихты и шамотного боя — 2...2,5 кг/т. Затем металл выдерживают под этим шлаком в течение 15...20 мин при использовании максимальной мощности трансформатора. После этого весь шлак полностью скачивают и наводят новый для периода раскисления стали. При этой технологии содержание Р и S в стали понижается от 0,035 до 0,01 %.

К.Х. Хайров проводил опыты, в которых содержание Р в кислой стали снижалось от 0,045...0,069 % до 0,016...0,024 %, т.е. на 0,029...0,045 %, путем кратковременной наводки железистоизвесткового шлака.

Учитывая кратковременность наводки железистоизвестковых и известковых шлаков, такая технология не оказывает существенного влияния на стойкость футеровки.

В.Н. Палисадов предложил футеровать стены кислой дуговой печи в зоне шлака поясом из специальной нейтральной массы, позволяющей наводить основной шлак, чем обеспечивается возможность проведения более глубокой дефосфорации и десульфурации стали (до 0,005 % Р и 0,005 % S). После проведения этих процессов основной шлак скачивается, металл доводится и выпускается под кислым шлаком.

Следует отметить, что в последние годы в связи с расширением производства отливок из хладостойкой стали с низким содержанием Р и S (не более 0,02 %) усилилась тенденция применения в сталелитейных цехах дуговых электропечей с основной футеровкой. Однако при этом следует учесть, что производительность этих печей, по сравнению с печами с кислой футеровкой, ниже на 20...30 %, что объясняется большим электрическим сопротивлением и меньшей лучеиступаскательной способностью кислых шлаков, более короткими дугами, низкой теплопроводностью кислых огнеупорных материалов.

В работе [9] приводятся сравнительные технико-экономические показатели работы дуговых печей типа ДС-6 с кислой и основной футеровкой: длительность плавки соответственно 140 и 185 мин, производительность 3,1 и 2,1 т/ч, удельный расход электроэнергии 2106 и 2340 МДж/т, расход графитированных электродов 6 и 7,2 кг/т стали, себестоимость 100 и 110 %. Поэтому необходимо проводить дальнейшие работы по изысканию эффективных способов удаления Р и S из кислой электростали как в печи, так и внепечными методами.

Авторы работы [132] указывают на возможность снижения содержания серы в кислой стали на 25 % за счет обработки ее в ковше РЗМ-содержащими модификаторами.

6.5. ОСОБЕННОСТИ АКТИВНОГО И КРЕМНИЙВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССОВ

В дуговых электропечах с кислой футеровкой сталь, как правило, выплавляют активным и кремнийвосстановительным способами. Применяется также полукремнийвосстановительный способ, сочетающий в себе элементы активного и кремнийвосстановительного. Наибольшее распространение получил активный способ выплавки стали. Анализ технологии выплавки углеродистой стали в дуговых 5-тонных печах на многих отечественных заводах показал, что активный способ применяют 70 % заводов, полукремнийвосстановительный — 25 % и как активный, так и кремнийвосстановительный способы — 5 %. На всех этих заводах, независимо от способа введения Si, планки ведут с окислением углерода. Активный и кремнийвосстановительный процессы различаются между собой плавным образом способом ввода Si в жидкий металл.

При активном процессе выплавки стали после окисления углерода шлак скачивают и наводят новый. При этом образование густого шлака, во избежание интенсивного восстановления Si не допускается, а нормальная консистенция шлака поддерживается присадками известняка. Затем вводят, как правило, 45%-ный ферросилиций в количестве 6...12 кг/т стали. Содержание кремнезема в шлаке в момент присадки ферросилиция, как правило, составляет 45...55 %, а после присадки — 50...60 %. Изменение химического состава металла и шлака одной из плавов углеродистой стали 25Л, выплавленной активным процессом, приведено на рис. 104. На некоторых заводах при проведении активного процесса в целях промежуточного контроля стали на содержание Si присадка ферросилиция производится в два приема. При этом учитывается угар Si.

Присадка ферросилиция приводит к загрязнению стали включениями кремнезема, поэтому при активном процессе более целесообразно использовать комплексные раскислители, например, силико-марганец.

В некоторых случаях при активном процессе плавку углеродистой стали в кислых электропечах ведут без периода окисления углерода. Так, на одном из заводов совмещают периоды расплавления и окисления, кипение металла не проводится. На некоторых других заводах металл расплавляют при содержании С выше нижнего предела только на величину окисляющегося углерода за время анализа первой пробы и нагрева металла; после этих операций сразу же начинают присадку ферросилиция.

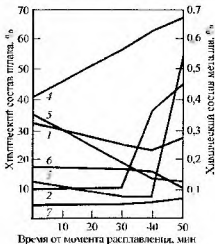


Рис. 104. Изменение химического состава металла и шлака по ходу плавки активным способом стали 25Л2:

1 — [C]; 2 — [Si], 3 — [Mn]; 4 — (SiO₂), 5 — (FeO), 6 — (CaO), 7 — (MnO)

При кремнийвосстановительном способе окисление проводят так же, как и при активном. После окончания кипения шлак стужают сухим песком, присаживают коксик или молотый электродный бой и нагревают металл, после чего начинается восстановление Si из шлака и футеровки по реакции: $(\text{SiO}_2) + 2\text{C}_x = [\text{Si}]_x + 2(\text{CO})$.

Иногда одновременно с песком присаживают ферромарганец. Восстановление кремния регулируют температурой ванны, содержанием кремнезема, оксида железа в шлаке и его жидкоподвижностью.

В период восстановления кремния содержание (SiO₂) составляет 60...63%, скорость восстановления 0,4...0,8%/ч. По достижении требуемого содержания кремния шлак разжижают известняком.

При полукремнийвосстановительном процессе плавки стали окисление С проводят как обычно, затем присаживают на шлак песок и коксик, нагревают металл, и начинается восстановление Si. Однако в период восстановления кремния содержание (SiO₂) составляет 51...55%. После восстановления до содержания в металле 0,1...0,2% Si присаживают ферросилиций и разжижают шлак известняком.

При кремнийвосстановительном процессе после присадки ферромарганца в печь и его полного растворения плавку быстро выпускают в ковш во избежание излишнего восстановления Si.

В связи с тем, что восстановление Si производится главным образом углеродом, наиболее целесообразно применять кремнийвосстановительный процесс при выплавке средне- и высокоуглеродистых сталей. Провести восстановление Si при выплавке низкоуглеродистых сталей затруднительно.

Механические свойства стали, выплавленной активным, или кремнийвосстановительным процессом, идентичны. При кремнийвосстановительном процессе металл меньше загрязняется включениями кремнезема. Недостатком этих процессов является отрицательное влияние их на стойкость футеровки.

При окислении ванны и повышении содержания закиси железа в шлаке происходит химическое взаимодействие шлака с футеровкой:



Разрушение футеровки при кремнийвосстановительном процессе происходит по следующим реакциям:



а затем $2\text{FeO}_{\text{футеровки}} = 2[\text{Fe}]_x + 2[\text{O}]$.

6.6. РАСКИСЛЕНИЕ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТАЛИ

После присадки ферросилиция или восстановления Si сталь раскисляют ферромарганцем, который, как правило, вводят в печь. На некоторых заводах вначале присаживают ферромарганец из расчета содержания в металле 0,15...0,4 % Mn, затем ферросилиций, а потом остальное количество ферромарганца. Практикуется раскисление металла шлаковой смесью, а затем ферромарганцем. На ряде заводов раскисление стали в печи производят силикомарганцем. Присадка ферросплавов производится в хорошо нагретый металл.

Конечное раскисление обычно проводят алюминием, присаживаемым в виде чушкового вторичного алюминия в количестве 0,02...0,2 % от массы стали в ковше. В целях предотвращения образования ситовидной пористости в литье и обеспечения требуемых механических свойств стали наиболее целесообразна присадка 0,15 % Al. Как уже отмечалось выше, содержание остаточного Al в стали должно быть в пределах 0,02...0,08 %. При содержании менее 0,02 % Al отливки, как правило, поражаются ситовидной пористостью, а при более 0,08 % Al

понижаются пластические свойства стали и ударная вязкость за счет Al_2O_3 , как продукта вторичного окисления. Усвоение Al металлом в определенной степени зависит от состава конечного шлака. Так, при выплавке в кислой электропечи стали 35Л и содержании в конечном шлаке 24 % CaO и 2 % FeO получен низкий угар Al (15 %).

Алюминий вводят на штанге в печь, на дно ковша, на струю после заполнения 1/3 ковша, на желоб. На одном из заводов для раскисления кислой электростали отплавляют специальные алюминиевые кольца и одевают их на стопор, на другом заводе вводят в печь 50...60 % Al, остальное количество — в ковш. На ряде отечественных заводов при выпуске плавок 0,5...0,6 кг/т алюминия (из общего количества алюминия 1...1,5 кг/т) присаживается в 7-тонный ковш, а остальное количество — в малые разливочные ковши вместимостью 0,3...0,6 т (на дно ковша перед его наполнением). Нашла применение и такая технология конечного раскисления, когда 0,5...0,6 кг/т присаживается в малые разливочные ковши, остальное количество — в формы. Во всех случаях критериями правильности выбранной технологии конечного раскисления являются наличие в стали 0,02...0,08 % Al остаточного, отсутствие ситовидной пористости в отливках и достижение требуемых механических свойств стали.

Температура металла в печи перед выпуском 1700...1730 °С, на желобе 1680...1720 °С. Перед выпуском металла из печи наклоняют печь таким образом, чтобы в первую очередь был слит в ковш металл, а затем шлак, в этом случае обеспечивается качественное конечное раскисление стали алюминием.

Силикокальций, РЗМ и другие модификаторы, как правило, вводят в ковш.

В последние годы все большее распространение находят модифицирование кислой стали. Так, например, низколегированные стали 20ГЛ, 20ФЛ, 20ГСЛ и т.д., выплавленные в дуговых электропечах с кислой набивной футеровкой, модифицировали силикобарием в количестве 0,18...0,25 % от массы металла. Силикобарий вносили в глубоко раскисленную сталь, содержащую 0,04...0,07 % от массы металла остаточного алюминия. В результате модифицирования значительно повысилась трещиностойкость стали за счет уменьшения межкристаллитного разрушения, снизилось количество цепочкообразных сульфидных включений по границам зерен. Снизилось в металле содержание серы, газов, кислорода, уменьшилась величина зерна; достигнуто более равномерное распределение неметаллических включений, в которых преобладают округлые сульфиды I типа; повысились механические свойства стали [133].

В другом случае [134] трещиностойкость стальных отливок из углеродистых сталей 20Л — 45Л повысили за счет присадок в разливоч-

ный ковш отходов алюминиевого производства, содержащих в своем составе щелочно- и редкоземельные металлы. Сталь выплавляли в кислых дуговых электропечах с набивной футеровкой. Оптимальная присадка отходов алюминиевого производства — 1,4...1,7 кг на 1 т массы жидкого металла. В результате значительно уменьшилось количество сульфидов II типа, уменьшилось содержание газов в стали, улучшилась кристаллическая структура отливок, среди неметаллических включений преобладали мелкие глобулярные включения I типа (расположенные внутри кристаллов, а не по границам зерен, как в обычной стали). Улучшились показатели механических свойств: прочности, пластичности и ударной вязкости.

Значительно улучшено качество стали 35Л, выплавляемой в 6-тонной кислой дуговой печи, за счет модифицирования ее лигатурой БКЛ — бескремневой комплексной лигатурой, содержащей алюминий, кальций и редкоземельные металлы [135]. Модифицирование проводили в 0,5-тонном ковше при переливе металла из раздаточного 8-тонного ковша. Лигатуру вводили под струю металла после заполнения разливочного ковша на $\frac{1}{4}$. Предварительно сталь раскисляли алюминием в количестве 2,4 кг/т БКЛ вводили в количестве 0,025...0,040 %. В результате повысилась жидкотекучесть стали, уменьшился объем усадочных раковин, увеличилась плотность металла, уменьшилось вторичное окисление металла, измельчилось зерно, повысилась трещиностойчивость, повысились механические свойства.

Сталь 35 ГТРЛ, выплавленную в кислой индукционной печи вместимостью 50 кг, модифицировали силикокальцием, ферросилицием с барием и магнийсодержащим модификатором [136]. Модификаторы вводили в разогретый ковш в дробленом виде перед выпуском металла из печи. Наилучшие результаты получили при вводе силикокальция совместно с ферросилицием, барием и алюминием. Образовывались мелкие глобулярные сульфиды. Улучшились механические свойства: относительное удлинение на 12...85 %, ударная вязкость на 37...108 % при +20 °С, на 39...87 % при 40 °С и на 67...133 % при -60 °С.

Из приведенных примеров видно, что качество кислой электростали можно значительно улучшить путем ее модифицирования.

6.7. ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ

В кислых электропечах выплавляется широкий сортамент легированных сталей. Порядок ввода легирующих элементов описан в рекомендациях по выплавке хладостойкой и износостойкой стали (справочное приложение к ГОСТ 21357-87), разработанных под ру-

ководством В.Н. Палисадова. Никель, в виде ферросплавов вольфрам и молибден в связи с их низкой окислительной способностью по сравнению с железом вводят в завалку из расчета получения нижнего предела заданного содержания с учетом содержания этих элементов в основной шихте (ферромolibден можно вводить и по расплавлению); корректировка их содержания в готовой стали проводится в окислительный период. Медь дается в начале окислительного периода для получения нижнего предела заданного количества, корректировка содержания меди производится в окислительный период, небольшие добавки меди могут производиться и в начале периода раскисления. Ферросилиций, ферромарганец, феррохром и феррованадий присаживаются, как правило, в подогретом виде в хорошо раскисленный металл (на некоторых заводах при выплавке хромистых и хромоникелевых сталей до 50 % феррохрома вводят в завалку, остальное количество — после присадки ферросилиция). Предварительно нагретый до 700...800 °С ферротитан дается в ковш.

Широко практикуется выплавка в кислых электропечах легированных сталей из отходов методом переплава. В этом случае окисление металла, как правило, не проводится. Количество отходов в шихте может доходить до 100 %.

На ряде отечественных заводов в кислых электропечах стали, легированные ванадием, выплавляют с применением ванадийсодержащего шлака, который дается в ванну после полного расплавления и подогрева металла в количестве 10...12 кг на 1 т жидкой стали в счет присадок железной руды или железорудных окатышей, расход которых определяется содержанием углерода в металле.

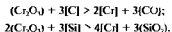
Имеется опыт легирования ванадием стали, выплавленной в 7-тонных дуговых печах с кислой набивной футеровкой, с помощью брикетов, изготовленных на основе лангдешевых шлаков, отходов производства алюминия и флюсообразующих компонентов на известковой связке [136]. Брикеты вводили в жидкую сталь при заполнении разливающих ковшей из расчета ввода в сталь 0,07; 0,12 и 0,20 % V. При таком микролегировании обеспечивается высокая степень усвоения ванадия (0,3...0,5 % брикетов от массы металла). В результате значительно уменьшилась величина зерна, обеспечены высокий уровень механических свойств и однородная литая структура.

Проведены также работы по легированию кислой стали (5-тонные печи) феррованадием, ванадийсодержащим конвертерным шлаком и ванадиевой лигатурой [137]. Эти работы показали, что использование лигатуры в 2...2,5 раза дешевле, чем феррованадия. Освоение производства литых деталей ходовой системы тракторов из стали 45ФЛ взамен стали 45Л позволило повысить их износостой-

кость в 1,3...1,4 раза и на 20 % снизить количество поломок деталей в эксплуатации. Повысились прочностные характеристики стали при достаточно высоком уровне пластичности и ударной вязкости (содержание ванадия 0,09 %). Улучшились прокаливаемость и обрабатываемость отливок.

Ванадий обладает свойствами измельчать зерно и повышать прочность стали без снижения пластичности и ударной вязкости [138]. С ванадием целесообразно вводить в сталь азот до 0,01...0,02 %, что позволяет дополнительно повысить механические свойства стали. Эффективность влияния азота объясняется более высокой дисперсностью карбонитридов ванадия по сравнению с карбидами [138].

В кислой электропечи можно восстанавливать из шлака хром, т.е.



В качестве примера выплавки легированной стали в кислой электропечи можно привести выплавку при участии автора легированной жаропрочной стали Х22Н4Ц1 в кислой печи вместимостью 0,5 т.

Во время закладки в печь присаживали бой стекла, затем стальной лом (литники, прибыли) и никель. Феррохром давали на откосы.

После полного расплавления шихты удаляли шлак (не менее 90 % общего количества) и на штанге присаживали алюминий, затем на зеркало металла вводили 45 %-ный ферросилиций и ферромарганец.

Часть 15 %-ного ферросилиция ($1/3$ от общего количества) вводили во время плавления во избежание вскипания металла. Оставшееся количество ферросилиция и весь ферромарганец вводили в ванну после расплавления металла. Затем при температуре металла 1550...1560 °С вводили ферробор и азотированный феррохром. При прекращении «азотного кипа» и выдержки металла в печи в течение 2...4 мин снимали шлак и металл выпускали из печи в ковш, в который во время выпуска металла вводили в пакете силикокальций, ферроцерий и отдельно алюминий.

Выплавленная в кислой электропечи легированная жаропрочная сталь Х22Н4Ц1 полностью соответствовала необходимым требованиям.

Глава 7

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ И ПОВЫШЕНИЕ ЕЕ КАЧЕСТВА

7.1. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ В ШИХТЕ

Основной физико-химической предпосылкой интенсификации технологического процесса выплавки стали в кислых электропечах является высокая раскислительная способность кремния при пониженных температурах. Путем раскисления стали кремнием при температурах периода плавления можно достичь достаточно низких концентраций кислорода, растворимость которого в равновесии с кремнием повышается с ростом температуры (от 0,01 до 0,03 % при 0,2 % Si с ростом температуры от 1500 до 1700 °С). Одна тонна шихты во время расплавления в электропечах с кислой футеровкой поглощает из атмосферы от 3 до 8 кг кислорода в час. Для предотвращения окисления им расплава и разрушающего действия оксидов железа на футеровку печи целесообразно увеличить количество Si в шихте, в том числе путем введения отходов, содержащих этот элемент.

Анализ физико-химических условий проведения плавки на шихте с повышенным содержанием Si показывает, что в период плавления происходит раскисление металла, благодаря чему содержание кислорода в стали по расплавлению уменьшается и сохраняется пониженным в течение всей плавки и в готовом металле (в сравнении с плавкой на углеродистом ломе).

При повышенном содержании Si в шихте всегда следует ожидать его более высокого содержания в металле по расплавлению, чем в случае плавки на углеродистом стальном ломе. Тогда в шлаках плавления связывается и большое количество оксидов железа, так как после окисления кремния идет процесс образования железистых силикатов.

Это возможно до тех пор, пока силикаты железа типа $2(\text{FeO})\text{SiO}_2$ достаточно стойки при контакте с металлом, содержащим Si. Если концентрация Si в металле превышает равновесную с силикатами железа, то начнется процесс разложения силикатов с образованием твердых, медленно укрупняющихся и трудноудаляемых из металла включений.

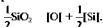
Максимальная концентрация Si, при которой железистые силикаты еще остаются жидкими, составляет 0,15%. Однако достижение равновесного состояния между расплавленным металлом и включениями (особенно твердыми и полутвердыми) требует длительного времени. Поэтому в условиях производственных плавок жидкие силикаты железа образуются и при более высоких концентрациях Si. Кроме того, в присутствии Mn образуются включения типа железистомарганцевых силикатов, когда содержание Si значительно больше 0,15%.

При получении необходимого содержания кремния в готовом металле за счет повышенного количества его в шихте сталь менее загрязняется включениями кремнезема. После присадки ферросилиция в конце плавки в стали образуются тугоплавкие трудноудаляемые включения кремнезема. В процессе плавления образуются главным образом жидкие железисто-марганцевые силикаты глобулярной формы, легко удаляющиеся из стали. После расплавления, к моменту нагрева металла, необходимому для ведения процесса, сталь очищена от неметаллических включений, чему способствует значительное содержание оксидов железа и марганца в ванне в период плавления.

Количество вводимого ферросилиция при использовании кремнийсодержащих отходов минимально и, следовательно, возможность загрязнения стали включениями кремнезема меньше. Кроме того, для всплывания продуктов окисления кремния, образовавшихся в период плавления, имеется значительно больше времени, чем от присадки ферросилиция до выпуска стали.

В целях подтверждения этих положений, учитывая методики [139–141], проведена термодинамическая оценка зависимости концентрации и активности кислорода в стали от содержания в ней кремния.

Реакция взаимодействия кислорода и кремния может быть представлена следующим образом:



Константа равновесия имеет вид:

$$K_{[\text{O}],\text{SiO}_2} = \frac{a_{[\text{O}]} a_{[\text{Si}]^{1/2}}}{a_{(\text{SiO}_2)}^{1/2}} = \frac{f_{\text{O}} [\text{O}] (f_{\text{Si}} [\text{Si}])^{1/2}}{a_{(\text{SiO}_2)}^{1/2}}$$

Отсюда выразим концентрацию [O]

$$[\text{O}] = K_{[\text{O}],\text{SiO}_2} a_{(\text{SiO}_2)}^{1/2} / (f_{\text{O}} (f_{\text{Si}} [\text{Si}])^{1/2})$$

или

$$\lg[\text{O}] = \lg K_{[\text{O}],\text{SiO}_2} + 1/2 \lg a_{(\text{SiO}_2)} - 1/2 \lg [f_{\text{Si}} [\text{Si}]] - 1/2 \lg f_{\text{O}}.$$

где $a_{(SiO_2)}$ — активность продукта раскисления; для шлака под кислым шлаком в первом приближении принимаем $a_{(SiO_2)} = 1$; f_O, f_{Si} — коэффициенты активности соответственно кислорода и кремния, причем:

$$\begin{aligned} \lg f_O &= e_O^O [O] + e_{Si}^O [Si]; \\ \lg f_{Si} &= e_{Si}^{Si} [Si] + e_{Si}^O [O], \end{aligned}$$

где e — термодинамические численные параметры взаимодействия кислорода и кремния.

Поскольку $[O] \ll [Si]$, то $e_{Si}^O [O] \ll e_{Si}^{Si} [Si]$; $e_O^O [O] \ll e_{Si}^O [Si]$, т.е. членами $e_{Si}^O [O]$ и $e_O^O [O]$ в приведенных выше уравнениях можно пренебречь и записать уравнение следующим образом:

$$\lg [O] = \lg K_{(O),SiO_2} - 1/2 \lg [Si] - (1/2 e_{Si}^{Si} + e_{Si}^O) [Si]$$

Это выражение представляет собой изотерму раскисления — функцию содержания кислорода в металле в зависимости от содержания кремния при постоянной температуре.

Для заданной температуры оптимальное содержание кремния $[Si]_{opt}$, при котором содержание кислорода минимально $[O]_{мин}$ минимум этой функции определяется следующим образом

$$\frac{\partial \ln [O]}{\partial [Si]} = \frac{1}{2[Si]} - 2,3(1/2 e_{Si}^{Si} + e_{Si}^O) = 0,$$

отсюда:

$$[Si]_{opt} = \frac{1}{4,6(1/2 e_{Si}^{Si} + e_{Si}^O)}$$

Для расчетов принимаем следующие температурные зависимости:

$$\lg K_{(O),SiO_2} = -15,238/t + 5,735;$$

$$\lg(-e_{Si}^O) = -3925/t - 0,925,$$

где e — молярный параметр взаимодействия кислорода с кремнием;

$$e_{Si}^{Si} = \frac{A_{Fe}}{230 A_{Si}} - e_{Si}^O = 0,0087 e_{Si}^O,$$

где A — атомные массы металлов

$$e_{Si}^{Si} = 25870/t; \quad e_{Si}^O = 0,0087 e_{Si}^O.$$

Расчеты активности кислорода в зависимости от содержания кремния в стали и оптимальных концентраций кремния, при которых окисленность металла минимальна в интервале температур 1600...1900 °С, приведены в табл. 134–137.

134. Расчеты активности и концентрации кислорода при 1600 °С

[Si %]	Расчетное уравнение	$\lg[O][O\%]$	$\lg f_O \cong e^{S_i}[Si]$	f_O	$a_O = f_O[O]$
0,01	$\lg[O] = -2,4 - 0,5\lg 0,01 + 0,069 \cdot 0,01 \cong$ $\cong -2,4 - 0,5(-2) \cong -1,4$	0,0398	$-0,129 \cdot 0,01 =$ $= -0,00129$	0,997	0,0397
0,1	$\lg[O] \cong -2,4 - 0,5(-1) \cong -1,901$	0,0126	$-0,129 \cdot 0,1 =$ $= -0,0129$	0,97	0,0122
1,0	$\lg[O] = -2,41 - 0,5 \cdot 0 + 0,069 \cdot 1 = -2,341$	0,0046	$-0,129 \cdot 1 =$ $= -0,129$	0,743	0,0034
3,15	$\lg[O] = -2,41 - 0,5\lg 3,15 + 0,069 \cdot 3,15 = -2,41$	$[O]_{\min} =$ $= 0,0036$	$-0,129 \cdot 3,15 =$ $= -0,406$	0,393	0,0014
10,0	$\lg[O] = -2,41 - 0,5 \cdot 1 + 0,069 \cdot 10 = -2,41 -$ $-0,5 + 0,69 = -2,22$	0,006	$-0,129 \cdot 10 =$ $= -1,29$	0,0513	0,0003

135. Расчеты активности и концентрации кислорода при 1700 °С

[Si %]	Расчетное уравнение	$\lg[O][O\%]$	$\lg f_O \cong e^{S_i}[Si]$	f_O	$a_O = f_O[O]$
0,01	$\lg[O] = -1,99 - 0,5(-2) + 0,043 \cdot 0,01 \cong -0,99$	0,1	$-0,1 \cdot 0,01 =$ $= -0,001$	0,998	0,099
0,1	$\lg[O] \cong -1,99 - 0,5(-1) \cong -1,49$	0,0324	$-0,1 \cdot 0,1 =$ $= -0,01$	0,977	0,0317

[Si %]	Расчетное уравнение	$\lg[O][O\%]$	$\lg f_O \cong e^{S_i}[Si]$	f_O	$\sigma_O = f_O[O]$
1,0	$\lg[O] = -1,99 + 0,43 \cdot 1 = -1,947$	0,0113	$-0,1 \cdot 1 = -0,1$	0,794	0,0090
5,06	$\lg[O] = -1,99 - 0,5 \lg 5,06 + 0,043 \cdot 5,06 = -1,99$	$[O]_{\min} =$ $= 0,00752$	$-0,1 \cdot 5,06 =$ $= -0,506$	0,312	0,00235
10,0	$\lg[O] = -1,99 - 0,5 \cdot 1 + 0,43 = -2,06$	0,0087	$-0,1 \cdot 10 = -1$	0,1	0,0009

136. Расчеты активности и концентрации кислорода при 1800 °С

[Si %]	Расчетное уравнение	$\lg[O][O\%]$	$\lg f_O \cong e^{S_i}[Si]$	f_O	$\sigma_O = f_O[O]$
0,01	$\lg[O] = -1,675 - 0,5(-2) + 0,0265 \cdot 0,01 \cong -0,675$	0,211	$-0,081 \cdot 0,01 =$ $= -0,00081$	0,998	0,210
0,1	$\lg[O] \cong -1,675 - 0,5(-1) \cong -1,175$	0,067	$-0,081 \cdot 0,1 =$ $= -0,0081$	0,982	0,0658
1,0	$\lg[O] = -1,675 - 0,5 \cdot 0 + 0,0265 \cdot 1 = -1,648$	0,0225	$-0,081 \cdot 1 =$ $= -0,081$	0,830	0,0187
8,20	$\lg[O] = -1,675 - 0,5 \lg 8,2 + 0,0265 \cdot 8,2 = -1,675$	$[O]_{\min} =$ $= 0,0123$	$-0,081 \cdot 8,2 =$ $= -0,6642$	0,217	0,00267
10,0	$\lg[O] = -1,675 - 0,5 \cdot 1 + 0,265 = -1,91$	0,0123	$-0,081 \cdot 10 =$ $= -0,81$	0,155	0,00191

137. Расчеты активности и концентрации кислорода при 1900 °С

[Si %]	Расчетное уравнение	$\lg[O][O\%]$	$\lg f_O \cong e^{S_i} [Si]$	f_O	$a_O = f_O [O]$
0,01	$\lg[O] = -1,277 - 0,5(-2) + 0,014 \cdot 0,01 \cong -0,277$	0,528	$-0,066 \cdot 0,01 =$ $= -0,00066$	0,998	0,527
0,1	$\lg[O] \cong -1,277 - 0,5(-1) \cong -0,777$	0,167	$-0,066 \cdot 0,1 =$ $= -0,0066$	0,985	0,164
1,0	$\lg[O] = -1,277 - 0,5 \cdot 0 + 0,014 \cdot 1 = -1,263$	0,0546	$-0,066 \cdot 1 =$ $= -0,066$	0,859	0,0469
15,53	$\lg[O] = -1,277 - 0,5 \lg 15,53 + 0,014 \cdot 15,53 = -1,277$	$[O]_{\text{min}} =$ $= 0,0223$	$-0,066 \cdot 15,53 =$ $= -1,025$	0,0944	0,0021
10,0	$\lg[O] = -1,277 - 0,5 \cdot 1 + 0,14 = -1,637$	0,0231	$-0,066 \cdot 10 =$ $= -0,66$	0,1549	0,0036

По результатам расчета построены зависимости, представленные на рис. 105 и 106.

Анализ физико-химических условий проведения плавки на шихте с повышенным содержанием Si показывает, что в период плавления в шлак переводится из металла дополнительное количество кислорода (по сравнению с плавкой стали на углеродистом стальном ломе), что приводит к уменьшению содержания $[O_2]$ в стали по расплавлению, в течение всей плавки и в готовом металле.

Традиционные процессы выплавки стали в кислых электропечах обладают существенными недостатками, основным из которых является отрицательное влияние их на стойкость футеровки

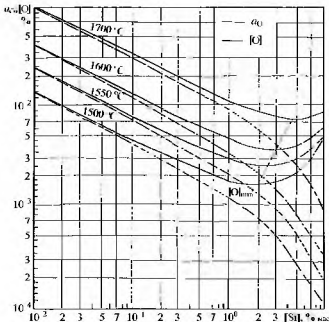
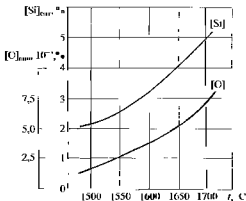
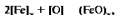


Рис. 105. Зависимость концентрации и активности кислорода в стали от содержания кремния

Рис. 106. Зависимость $[O]_{\text{стали}}$ и $[Si]_{\text{стали}}$ от t

Химическое воздействие окислительных шлаков на кислую футеровку в период окисления углерода выражается в поглощении ею кислорода из металла по реакции



образующийся $(FeO)_x$ в свою очередь взаимодействует с SiO_2 футеровки и образует легкоплавкий силикат — файялит — с температурой плавления 1370°C , т.е.



Отсюда ясно, что футеровка разрушается в период окисления металла и повышения содержания оксида железа в шлаке, особенно в моменты присадок железной руды.

В целях устранения недостатков традиционных способов выплавки стали в кислых электропечах разработан, исследован и внедрен новый технологический процесс [5, 20] суть которого сводится к следующему. В шихту для плавки углеродистых сталей в дуговых печах с кислой футеровкой вводят кремний (либо в виде отходов от штамповки электротехнических сталей, либо в виде ферросилиция) с таким расчетом, чтобы его содержание по расплавлению было на верхнем или среднем пределе заданной марки стали. Чем выше содержание кремния по расплавлению, тем выше оно и перед раскислением; так, например, при содержании кремния по расплавлению 0,18; 0,26; 0,32 и 0,36 % его со-

держание перед раскислением составляет соответственно 0,14; 0,20; 0,25 и 0,30 %.

По расплавлению, когда содержание углерода находится на нижнем пределе заданной марки стали, сканируют примерно половину шлака, содержащего 46...55 % SiO_2 и 25...37 % FeO (при плавке на углеродистом стальном ломе 40...45 % SiO_2 и 15...30 % FeO), оседают его при садками песка и известняка и сразу же приступают к нагреву металла. На это затрачивается ≈ 25 мин. Когда металл нагрет до температуры выпуска (1700...1730 °С), содержание кремния в нем находится на нижнем пределе заданной марки стали. Для получения содержания кремния в готовом металле, близкого к верхнему пределу, присаживают 2...3 кг/т стали 45 % ферросилиция. Затем металл выпускают в ковш, где в процессе слива раскисляют металл в ковше ферромарганцем и алюминием (0,15 %).

Таким образом, ведение плавки по этой технологии после расплавления шихты сводится к нагреву металла, доводке его по химическому составу и конечному раскислению. При таком способе плавки можно легко избежать как восстановления кремния, так и окисления углерода, что создает предпосылки для значительного повышения стойкости футеровки, экономии ферросплавов, электроэнергии, повышения производительности печей и ресурсосбережения за счет сокращения их простоев.

Кроме того, уменьшение продолжительности «жизни» периодов плавки (отсутствие окислительного периода) оказывает положительное влияние на стойкость футеровки и за счет сокращения времени воздействия на футеровку открыто излучающих электрических дуг. Более подробно это взаимодействие изучено при моделировании нагрева футеровки, проведенном в целях исследования общих закономерностей тепловой работы футеровки (см. п. 4.9). Изменение химического состава металла и шлака по ходу плавки стали 25Л с применением кремнийсодержащих отходов в шихте показано на рис. 107.

В табл. 138 и на рис. 108 и 109 приведены данные, характеризующие окисленность стали 25Л, выплавленной в 5-тонной печи на шихте с кремнийсодержащими отходами и без них (10 плавок каждого варианта). По ходу плавки отбирали пробы металла и шлака для химического анализа; температуру стали закрепили вольфрамомолибденовой термопарой погружения в моменты отбора проб. Также определяли химический состав готового металла и содержание в нем неметаллических включений.

В стали, выплавленной без применения в шихте кремнийсодержащих отходов, содержались в виде неметаллических включений 0,0022 % SiO_2 ; 0,0039 % Al_2O_3 ; 0,0003 % FeO ; следы MnO . В стали, выплавленной с кремнийсодержащими отходами, 0,0015 % SiO_2 ; 0,0025 % Al_2O_3 ; 0,0007 % FeO ; следы MnO . Содержание O_2 соответственно 0,003 и 0,002 %.

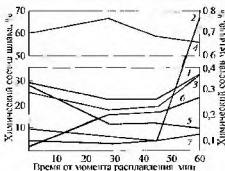


Рис. 107. Изменение химического состава металла и шлака по ходу плавки стали 25Л с применением в шихте кремнийсодержащих отходов:

1 — [C]; 2 — [Mn]; 3 — [Si]; 4 — (SiO₂); 5 — (FeO); 6 — (CaO); 7 — (MnO)

138. Химический состав, %, металла и шлака и температура металла в процессе плавки стали 25Л

Показатели	Без кремнийсодержащих отходов				С кремнийсодержащими отходами			
	По расплавлению	Перед раскислением	Перед выпуском	В ковше	По расплавлению	Перед раскислением	Перед выпуском	В ковше
t, °C	1636	1664	1701	—	1658	1703	1713	—
[C]	0,22	0,23	0,24	0,26	0,19	0,25	0,24	0,26
[Mn]	0,15	0,16	0,15	0,59	0,16	0,12	0,12	0,57
[Si]	0,10	0,11	0,42	0,49	0,43	0,28	0,43	0,48
[O]	0,026	0,023	0,020	0,003	0,013	0,013	0,012	0,002
[Al]*	—	—	—	0,044	—	—	—	0,067
(SiO ₂)	48,24	56,48	56,16	59,60	55,84	58,90	58,79	59,16

* Общее содержание алюминия при присадке 0,15 %.

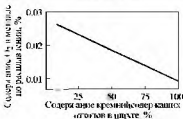


Рис. 108. Зависимость содержания кислорода в стали по раскислению от содержания кремнийсодержащих отходов в шихте

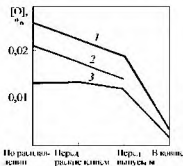


Рис. 109. Изменение содержания кислорода в металле по ходу плавки стали 25Л в зависимости от содержания кремнийорганических отходов в шихте:
1 — без применения; 2 — 20...50 %;
3 — 60...100 %

Результаты определения остаточного Al в 549 производственных плавках сталей 25Л и 35Л, полученных в 5-тонных дуговых печах с кислой футеровкой и использованием в шихте кремнийсодержащих отходов, представлены на рис. 110. Литую углеродистую сталь принято считать качественной, если в ней содержится $\geq 0,02$ % Al остаточного.

Как видно из рис. 110, 85 % металла, полученного с использованием в шихте кремнийсодержащих отходов и раскисленного 0,1 % Al вторичного, содержит $\geq 0,02$ % Al остаточного. Такое содержание остаточного Al при плавке на углеродистом стальном ломе обычно получают при раскислении стали не менее 0,15 % Al. При выплавке стали с использованием в шихте кремнийсодержащих отходов и раскислении 0,15 % алюминия 99 % металла содержит $\geq 0,02$ % Al остаточного, а 89 % металла — $\geq 0,04$ %, что характеризует хорошее раскисление стали. На рис. 111 показана зависимость общего остаточного алюминия в стали от количества кремнийсодержащих отходов в шихте.

Рис. 110. Содержание остаточного алюминия в стали при раскислении в ковше алюминием в количестве:

I — 0,1 %, *II* — 0,15 %

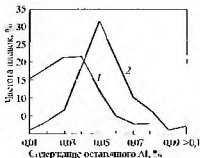
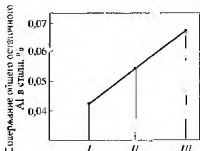


Рис. 111. Зависимость содержания общего остаточного алюминия в стали от применения в шихте отходов электротехнических сталей:

I — без применения; *II* — 20...50 %; *III* — 60...100 %



Таким образом, повышенное содержание Si в шихте для плавки углеродистой стали в дуговой печи с кислой футеровкой приводит к уменьшению содержания кислорода и повышению содержания остаточного алюминия в стали.

7.2. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КИСЛОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

Сталь, выплавленная с повышенным содержанием Si в шихте, имеет лучшие качественные показатели по сравнению со сталью, выплавленной активным процессом [20].

Отличие плавок, проведенных с применением отходов динамной стали, заключается в более высоком содержании общего остаточного Al при равной его присадке, что свидетельствует о более полном раскислении металла в процессе плавки в первом случае (см. рис. 111).

Вполне понятно, что чем выше уровень остаточного алюминия в стали (в рассматриваемых пределах), тем более устойчиво образуются в ней сульфидные включения III типа, обеспечивающие получение высоких механических свойств стали. Поэтому из приведенных выше данных можно заключить, что для надежного образования сульфидов III типа в стали, выплавленной активным процессом, при прочих равных условиях потребуется присадка алюминия в большем количестве, чем в стали, выплавленной с повышенным содержанием кремния в шихте. Абсолютную же величину присадки алюминия, по-видимому, следует выбирать в каждом конкретном случае, исходя из технологических условий производства.

В частности для оценки формы и характера расположения неметаллических включений в стали 25Л, выплавленной с применением в шихте кремнийсодержащих отходов, в условиях сталелитейного цеха проверили 100 плавок, раскисленных Al в количестве 0,15 %. Шлифы изготавливали из разрывных образцов для механических испытаний. В образцах всех исследуемых плавок наблюдались неправильной формы дезориентированные включения III типа, и лишь в образцах 2 плавок, наряду с включениями III типа, — отдельные небольшие участки строчечных включений. Характерные сульфидные включения в стали, выплавленной по новой технологии, показаны на рис. 112. Вполне возможно, что при выплавке стали по новой технологии сульфиды III типа будут устойчиво образовываться и при меньших присадках алюминия.

Для оценки микроструктуры термообработанной стали образцы от 10 плавок, выполненных с добавлением в шихту кремнийсодержащих отходов, нормализовали по следующему режиму, применяемому для термообработки стальных отливок: нагрев до $t = 890^\circ\text{C}$, выдержка при этой температуре 2,5 часа, охлаждение на воздухе. После термообработки из образцов изготавливали шлифы и оценивали микроструктуру с помощью микроскопа МИМ-8М при увеличении в 100 раз. Все образцы имели нормальную мелкозернистую феррито-перлитную структуру нормализованной среднеуглеродистой стали (рис. 113).

Помимо сравнения в опытных плавках содержания кислорода остаточного алюминия и оксидных включений, качество углеродистой стали, выплавленной в производственных условиях активным процессом и с применением в шихте кремнийсодержащих отходов сравнивали также по: а) химическому составу; б) содержанию водорода и азота; в) механическим свойствам; г) браку отливок по ситовидной пористости.



Рис. 112. Сульфидные включения в стали 25Л, выплавленной с применением в шихте кремнийсодержащих отходов

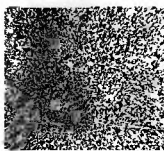


Рис. 113. Микроструктура обезкисленной стали 25Л, выплавленной с добавлением в шихту кремнийсодержащих отходов

Статистическая обработка 1000 производственных плавков (по 500 плавков каждого технологического варианта — пробы отобраны из ковша через стопор в середине разливки) по содержанию в стали P и S (рис. 114, 115) показала, что сталь, выплавленная с применением в шихте кремнийсодержащих отходов, имеет меньшее содержание S и P, чем сталь, выплавленная на углеродистом стальном ломе. 97 % плавков, выплавленных с добавлением в шихту кремнийсодержащих отходов, имеют $\leq 0,05$ % S, т.е. соответствуют требованиям, предъявляемым к кислородной стали для особо ответственных назначений по ГОСТ 977–88. 87 % плавков имеют $\leq 0,04$ % S, а 74 % плавков $\leq 0,03$ %. Такое низкое содержание вредных примесей в кислой электростали достигается за счет применения в шихте отходов электротехнической стали, имеющей небольшое количество S и P. Содержание вредных примесей в сталях 25Л и 35Л, выплавленных на углеродистом стальном ломе, значительно превышает их содержание в стали, выплавленной с добавлением в шихту отходов динамной стали.

На рис. 116 показано колебание значения ударной вязкости в плавках стали, выплавленной на углеродистом стальном ломе и с кремнийсодержащими отходами (раскисление алюминием в обоих случаях 0,1 %). Плавки с добавлением в шихту кремнийсодержащих отходов имеют значительно лучшие показатели по ударной вязкости, чем плавки, выплавленные на углеродистом ломе.

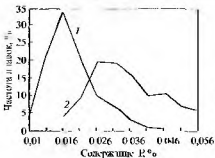


Рис. 114. Частота плавков с различным содержанием Р в сталях 25Л и 35Л (по данным 500 плавков) с применением (1) и без применения (2) в шихте кремнийсодержащих отходов

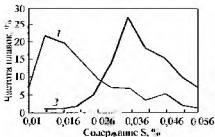


Рис. 115. Частота плавков с различным содержанием S в сталях 25Л и 35Л (по данным 500 плавков) с применением (1) и без применения (2) в шихте кремнийсодержащих отходов

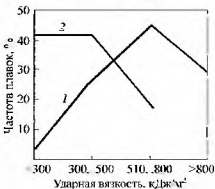


Рис. 116. Частота плавков с различной величиной ударной вязкости стали 35Л с применением (1) и без применения (2) в шихте кремнийсодержащих отходов

Из данных рис. 117 следует, что сталь, выплавленная с применением в шихте кремнийсодержащих отходов, имеет лучшие показатели по относительному удлинению, а на рис. 118 — по временному сопротивлению. Более высокие механические свойства стали, выплавленной с повышенным содержанием Si в шихте, объясняются более высоким содержанием остаточного Al в этой группе плавов, более устойчивым образованием сульфидов III типа, меньшим содержанием O, и вредных примесей.

При постоянном методе раскиснения стали и постоянном режиме термобработки механические свойства углеродистой стали в большей степени определяются содержанием углерода. В сталях 25Л и 35Л, выплавленных с повышенным содержанием Si в шихте и раскисненных 0,1 % Al, при 0,42 % C относительное удлинение превышает требование ГОСТ 977–88 не только для стали 35Л ($\delta = 15\%$), но и для стали 25Л ($\delta = 19\%$), что свидетельствует о высоком ее качестве. Сталь, выплавленная с применением в шихте кремнийсодержащих отходов, уже при 0,23...0,24 % C имеет предел текучести, превышающий требование ГОСТа ($\sigma_s = 280$ МПа).

Были построены также зависимости механических свойств от содержания марганца, кремния, фосфора и серы при постоянном содержании углерода. Для построения этих зависимостей взят узкий интервал содержания углерода 0,31...0,35 % (сталь 35Л). Оказалось,

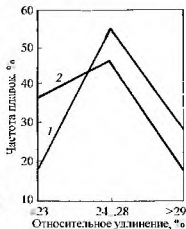


Рис. 117. Частота плавов с различной величиной относительного удлинения стали 25Л (по данным 57 плавов) с применением (1) и без применения (2) в шихте кремнийсодержащих отходов

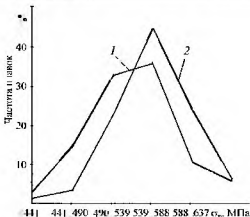


Рис. 118. Частота плавков с различной величиной временного сопротивления: плавки без применения кремнийсодержащих пакетов (1); плавки с применением 50 % кремнийсодержащих пакетов взамен стального лома (2)

что плавки, выполненные с повышенным содержанием кремния в шихте, имели механические свойства, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 977–88 для стали 35Л во всем интервале содержаний марганца и кремния. Влияния содержания фосфора и серы в интервале фактических концентраций (10...56) 10^{-3} % на механические свойства этих плавков не обнаружено. Последний результат весьма важен. Как известно, вредного влияния серы на механические свойства литой углеродистой стали удавалось избежать при раскислении стали алюминием в количестве 0,15...0,25 %. При использовании в шихте кремнийсодержащих отходов усвоение алюминия настолько повышается, что отрицательное влияние серы нейтрализуется уже при раскислении стали 0,1 % алюминия.

Были построены также частотные кривые предела текучести и относительного удлинения сталей 25Л и 35Л, выплавленных по новой технологии с раскислением алюминием в количестве 0,15 %. Эти кривые, построенные по данным 500 производственных плавков, показали, что подавляющее большинство плавков имело механические свойства, значительно превышающие требования ГОСТ 977–88, причем 100 % плавков удовлетворяли этим требованиям.

Для оценки газонасыщенности стали были проведены плавки в печах ДС-5М с применением в шихте кремнийсодержащих отходов и проверкой содержания водорода в 15 плавках, содержания азота в 22 плавках. Для сравнения проверено содержание водорода и азота в готовой стали 6 плавок, выплавленных в тех же печах без кремнийсодержащих отходов. Первая группа плавок содержала в среднем $4,6 \cdot 10^{-4} \% [H]$ (4,6 ppm) (пределы $(3,2...5,6) \cdot 10^{-4} \%$) и $6,9 \cdot 10^{-3} \% [N]$ (69 ppm) (пределы $(4...9) \cdot 10^{-3} \%$), а вторая группа плавок соответственно $4,6 \cdot 10^{-4} \%$ (4,6 ppm) (пределы $(3,3...5,5) \cdot 10^{-4} \%$) и $6,1 \cdot 10^{-3} \%$ (61 ppm) (пределы $(5...9) \cdot 10^{-3} \%$). Из этих данных следует, что содержание водорода и азота в стали, выплавленной с применением в шихте кремнийсодержащих отходов, практически не превышает обычного содержания этих газов в кислой среднеуглеродистой стали, выплавленной на углеродистом стальном ломе.

Одним из важных факторов при оценке качества стали является дефект стальных отливок — ситовидная пористость. Оценка брака по этому дефекту проводилась по результатам осмотра отливок после механической обработки. При выплавке стали без применения в шихте кремнийсодержащих отходов и раскисленной 0,1 % Al средний брак отливок по ситовидной пористости (по результатам осмотра 6122 т литья) составил 0,82 %, а при выплавке стали с применением в шихте кремнийсодержащих отходов и раскисленной 0,1 и 0,15 % Al, средний брак отливок по ситовидной пористости составил соответственно 0,34 % (по результатам осмотра 8545 т литья) и 0,076 % (по результатам осмотра 12 262 т литья).

Из приведенных данных следует, что сталь, выплавленная с применением в шихте кремнийсодержащих отходов и раскисленная 0,1 % Al, имеет значительно меньшую склонность к поражению отливок ситовидной пористостью, что объясняется более высоким остаточным алюминием в этой группе плавок. В стали, выплавленной с применением в шихте кремнийсодержащих отходов и раскисленной алюминием в количестве 0,15 %, этот дефект практически не образуется.

Опыт работы по применению в шихте кремнийсодержащих отходов показал, что плавки по этой технологии практически не имеют отклонений по химическому составу. Подавляющее большинство металла, выплавленного двумя технологическими способами, имело химический состав, требуемый по ГОСТ 977–88 и ТУ.

Химический состав стали, выплавленной с применением в шихте кремнийсодержащих отходов, достаточно стабилен. Так, анализ данных 500 производственных плавок показал, что 60 % стали 25Л имело $0,27...0,30 \% C$, а 62 % стали 35Л — $0,32...0,35 \%$, т.е. в большей части

плавков обеих марок содержание С близко к 0,3 %, что говорит о стабильном технологическом процессе. Это положение подтверждается еще тем, что 72 % плавков имеют 0,56...0,70 % Mn, т.е. близкое к среднему пределу, а 71 % плавков содержит 0,41...0,50 % Si.

Таким образом, сталь, выплавленная с повышенным содержанием Si в шихте, имеет меньшее содержание кислорода, неметаллических включений и вредных примесей, более высокое содержание остаточного Al при равной его присадке, более высокие пластические свойства и ударную вязкость, меньшую склонность к образованию ситовидной пористости в отливках и более стабильный химический состав.

Значительная часть стальных отливок, изготавливаемых для электротехнических изделий, должна обладать определенными магнитными свойствами, так как чаще всего требуется определенный уровень магнитной индукции насыщения. Магнитная индукция углеродистой стали не зависит от способа ввода в нее Si. На рис. 119 показано, что сталь, выплавленная с повышенным содержанием Si в шихте и по обычной технологии, имела одинаковый уровень магнитной индукции во всем исследованном интервале напряженности магнитного поля.

Магнитную индукцию определяли на баллистической установке на образцах длиной 320...420 мм с поперечным сечением 10×10 мм. Стандартизированным проб для определения магнитной индукции литой стали не имеется, тем более, что магнитные свойства литой углеродистой стали и влияние на них технологии выплавки стали вообще мало изучены.

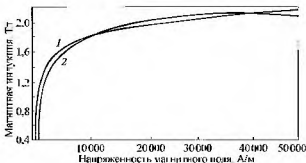


Рис. 119. Магнитные свойства стали 25Л, выплавленной с применением (1) и без применения (2) в шихте кремнийсодержащих отходов

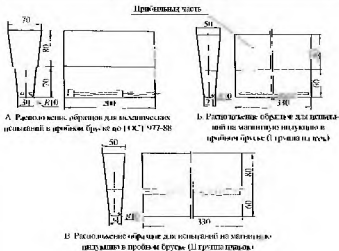


Рис. 120. Расположение образцов в пробных брусках

Для исследования отливали пробные брусочки, близкие по конфигурации к клиновидным пробным брускам для определения механических свойств литья по ГОСТ 977-88 (рис. 120). Формы для отливки пробных брусков изготовляли из быстротвердеющей смеси на жидком стекле. Заливку пробных брусков производили из сталеразливочного столярного ковша одновременно с заливкой отливок данной плавки. После заливки пробные брусочки охлаждали в формах в течение 2...8 ч, выбивали, отрезали огнем прибыльную часть и затем нормализовывали. После этого на строгальном станке вырезали образцы и испытывали на магнитную индукцию.

Для уточнения методики вырезки образцов из пробных брусков были исследованы 2 группы плавок. В пробных брусках 1-й группы плавок образцы вырезали из нижней части бруска (рис. 120 Б). Образцы, взятые из верхней части бруска, показали более низкие значения, чем образцы, взятые из нижней части бруска. Это объясняется тем, что верхняя часть пробного бруска, как и любой стальной отливки, является менее плотной, чем нижняя часть, и более загрязненной неметаллическими включениями. Поэтому при сравнении магнитных свойств

стали, выплавленной по различным технологическим процессам, образцы вырезали из нижней части пробных брусков, чтобы свести к минимуму влияние неплотностей и загрязнения металла на результаты сравнительных испытаний магнитных свойств.

Основными факторами, влияющими на магнитные свойства литых углеродистых сталей, являются напряженность магнитного поля, при которой рассматриваются магнитные свойства, и содержание C в стали. Так, при напряженности магнитного поля 2500, 4500 и 100 000 А/м сталь 15Л имела магнитную индукцию насыщения соответственно 1,40; 1,47 и 2,10 Тл, а сталь 45Л — 1,19; 1,31 и 1,58 Тл.

Влияние содержания углерода на магнитные свойства объясняется тем, что с его увеличением в стали уменьшается количество феррита, который имеет большую магнитную индукцию по сравнению с перлитом. Количество перлита в низкоуглеродистой стали составляет 20 %, а в среднеуглеродистой — 70 %. Высокая магнитная индукция феррита объясняется особенностями взаимодействия электронов с ядрами атомов в кристаллической решетке, в результате которого происходит самопроизвольная параллельная ориентация спиновых магнитных моментов электронов. Содержание C , особенно в слабых полях, оказывает влияние на магнитную индукцию даже в рамках одной марки стали (рис. 121). Кроме того, некоторое влияние на магнитные свойства углеродистых сталей оказывает содержание в готовой стали Mn , Ni (остаточного), плотности металла и его термической обработки (рис. 122–124)

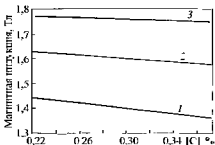


Рис. 121. Влияние содержания C в стали на величину магнитной индукции при напряженности магнитного поля, А/м:
1 — 2500; 2 — 50 000; 3 — 100 000

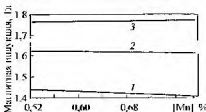


Рис. 122. Влияние содержания Mn в стали на величину магнитной индукции при напряженности магнитного поля, А/м:

1 — 2500; 2 — 50 000; 3 — 100 000

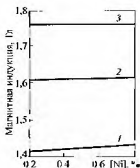


Рис. 123. Влияние содержания Ni в стали на величину магнитной индукции при напряженности магнитного поля, А/м:

1 — 2500; 2 — 50 000; 3 — 100 000

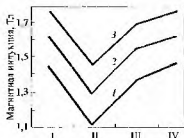


Рис. 124. Влияние плотности литого металла на величину магнитной индукции при напряженности магнитного поля, А/м:

1 — 2500; 2 — 50 000; 3 — 100 000, I — до сверления отверстия; II — отверстия высверлены; III — отверстия заварены; IV — повторная нормализация

С целью изучения влияния термообработки из 10 пробных брусков в сыром состоянии были вырезаны образцы и испытаны на магнитную индукцию.

После этого образцы нагревали в электропечи до температуры 900 °С, выдерживали при этой температуре в течение 2,5 ч, охлаждали на воздухе до температуры окружающей среды и испытывали на магнитную индукцию. Во время термообработки образцы были защи-

щены от окисления. Затем образцы нагревали до температуры 650 °С, охлаждали на воздухе и снова испытывали на магнитную индукцию. Как видно из табл. 139, в исследованных нами образцах магнитная индукция значительно повышается после нормализации при напряженности магнитного поля 2500 А/м, при 50 000 А/м влияние нормализации ослабляется, а при 100 000 А/м — отсутствует. Высокий отпуск незначительно повысил магнитную индукцию нормализованных образцов при 2500 и 50 000 А/м и не оказал влияния при 100 000 А/м.

139. Влияние термообработки на магнитные свойства литой углеродистой стали

Магнитная индукция, Тл								
Сырых образцов			После нормализации			После высокого отпуска		
При напряженности магнитного поля, А/м								
2500	50 000	100 000	2500	50 000	100 000	2500	50 000	100 000
1,53	1,62	1,82	1,48	1,68	1,81	1,56	1,70	1,83
1,18	1,49	1,72	1,41	1,58	1,71	1,45	1,60	1,73
1,30	1,56	1,73	1,47	1,63	1,76	1,48	1,62	1,75
1,23	1,57	1,76	1,45	1,63	1,77	1,45	1,60	1,75
1,45	1,64	1,82	1,51	1,60	1,78	—	—	—
1,37	1,60	1,78	1,49	1,63	1,78	1,51	1,65	1,78
1,37	1,60	1,77	1,46	1,61	1,76	1,48	1,63	1,77
1,33	1,51	1,75	1,45	1,61	1,75	—	—	—
1,50	1,72	1,89	1,49	1,65	1,79	1,52	1,66	1,80
1,40	1,62	1,79	1,50	1,65	1,79	1,52	1,65	1,80
Средние значения								
1,37	1,59	1,78	1,47	1,63	1,77	1,50	1,64	1,77

Влияние раковин и пористости литья на величину магнитной индукции представляет большой интерес, так как эти дефекты являются наиболее характерными для стальных отливок.

В процессе испытаний было обнаружено, что отдельные образцы, пораженные единичными раковинами шириной и глубиной 3...4 мм, показали высокие значения магнитной индукции, т.е. остывание сечения до 10...12% на величину магнитной индукции заметно не повлияло.

Испытывался образец, одна из поверхностей которого была поражена на 30 % раковинами глубиной 2...5 мм. Этот образец показал заниженные значения магнитной индукции (табл. 140).

140. Влияние легких дефектов на магнитные свойства стали

Характеристика образца	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
	2500	50 000	100 000
Одна раковина глубиной и шириной 3...4 мм*	1,43	1,64	1,77
	1,45	1,63	1,79
Одна поверхность поражена на 30 % раковинами глубиной 2...5 мм	1,24	1,44	1,59

* Измерения проводили на двух образцах.

Для уточнения влияния дефектов на величину магнитной индукции в двух нормализованных образцах были высверлены отверстия. Затем отверстия заварили и образцы подвергли повторной нормализации.

Кроме того, 4 образца были разрезаны на ножовочном станке, сварены и повторно нормализованы. Схема сверления отверстий и сварки образцов показана на рис. 125. После каждой операции производили замеры магнитной индукции, результаты которых показаны на рис. 126.

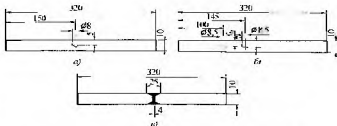


Рис. 125. Схема сверления отверстий (а) и сварки образцов (б)



Рис. 126. Влияние сварки образцов на величину магнитной индукции при напряженности магнитного поля, А/м

1 — 2500; 2 — 50 000; 3 — 100 000; штриховые линии — требования ВТУ 618-46

Как видно из приведенных данных, магнитная индукция в образцах после сверления отверстий понижается и после заварки их возрастает, не достигая несколько прежней величины (аналогично после сварки разрезанных образцов). Последующая нормализация приводит к повышению значения магнитной индукции до первоначального уровня.

Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в литых углеродистых сталях показана на рис. 127

До проведения этого исследования в сталелитейном цехе электро-технического завода в двух 5-тонных дуговых сталеплавильных печах выплавляли 3 марки углеродистой стали для отливок электрических машин: 15Л, 25Л и 35Л, причем из стали 15Л изготавливались только отливки магнитопроводов (остова и полюса тепловозных электродвигателей, станины машин постоянного тока и т.д.). Развес изготавливаемого в цехе литья — от 100 г до 2 т. Развес основной массы отливок — от 5 до 200 кг. Средняя масса плавки 7 т. Для выполнения заданного плана в смену необходимо разлить 4 плавки. В этих условиях набор форм одной марки стали для разлива 7-тонной плавки представлял серьезные затруднения. Производство отливок трех марок стали приводило к частым сливам металла (до 5 т в сутки) из-за несоответствия подготовленных к заливке форм марке выплавленной стали, горячим простоям пе-

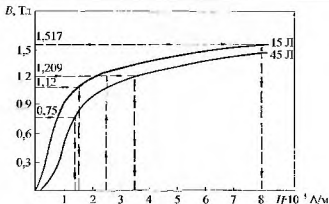


Рис. 127. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в литых углеродистых сталях (после механической обработки)

чей (2...3 ч в сутки) в ожидании подготовки форм и, как следствие, повышенному расходу электроэнергии.

Кроме того, производство отливок из малоуглеродистых сталей по сравнению со средне- и высокоуглеродистыми связано со значительными трудностями: большая линейная и объемная усадка, высокая температура, низкая стойкость огнеупоров и т.д.

В то же время в технической литературе недостаточно данных о магнитных свойствах литой углеродистой стали и о влиянии химического состава стали на эти свойства. Поэтому изготовление отливок магнитопроводов из стали 15Л представлялось спорным.

Приведенные результаты исследований позволили перейти на производство отливок магнитопроводов из стали 25Л (содержание углерода 0,22...0,30%), т.е. сократить количество выплачиваемых в цехе марок стали с трех до двух.

Выбор конструкционных материалов для стальных деталей магнитопроводов электрических машин затруднен, так как промышленность не поставляет заготовки с заданными магнитными свойствами и на эти свойства отсутствуют стандарты. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо проводить специальные исследования в целях выбора материалов для отливок магнитопроводов электрических машин и технологии их изготовления.

7.3. РАСКИСЛЕНИЕ СТАЛИ ФЕРРОМАРТАНЦЕМ В КОВШЕ

Технология выплавки кислой стали с повышенным содержанием кремния в шихте позволила усовершенствовать раскисление стали ферромарганцем. Как известно, угар Mn при присадке ферромарганца в ковш значительно ниже, чем при присадке его в печь, поэтому при раскислении стали в ковше можно получить значительную экономию этого ферросплавов по сравнению с процессом раскисления в печи. Несмотря на это, на большинстве заводов, выплавляющих углеродистую сталь в кислых электропечах, раскисление ферромарганцем проводят в печи.

Так, ознакомление с технологией выплавки стали в кислых дуговых 5-тонных печах на многих заводах показало, что только на 15 % заводов вводят ферромарганец в ковш. На ряде заводов сначала в печь вводят ферромарганец, а затем ферросилиций, так как при его присадке в металле образуется большое количество тугоплавких трудноудаляемых включений кремнезема. При таком порядке ввода ферросплавов сталь меньше загрязнена включениями кремнезема, поскольку угар кремния ниже. С другой стороны, образование большого количества оксидов марганца способствует лучшему очищению стали от включений SiO_2 за счет образования легкоплавких железистомарганцевых силикатов. С этой точки зрения более благоприятные условия создаются при раскислении кислой стали ферромарганцем в печи, чем при раскислении в ковше.

При выплавке стали с повышенным содержанием Si в шихте присадка ферросилиция сведена к минимуму, поэтому значительно уменьшается возможность загрязнения стали включениями кремнезема, что создает лучшие условия для раскисления стали ферромарганцем в ковше.

При раскислении в ковше присадку ферромарганца (размер кусков до 70 мм) производят после заполнения металлом на $1/3$ ковша и заканчивают при заполнении ковша на $2/3$, при этом струя металла не уменьшается и не прерывается. При этом интенсивным перемешиванием стали струей металла, падающей с желоба в ковш, обеспечивается равномерное распределение Mn в стали. Скорость растворения Mn в металле, как показали исследования, составляет несколько минут.

Средний угар Mn в печи составляет 42 %, а в ковше — 15 %, т.е. почти в три раза меньше. Это позволяет сократить присадку ферромарганца при выплавке стали в 5-тонной кислой печи с 12...16 до 8...9 кг/т (табл. 141).

Сравнение содержания остаточного Al в стали при раскислении ее ферромарганцем в печи и в ковше (по 100 плавкам каждого варианта) показало, что содержание остаточного Al при равной его присадке в первой группе плавков оказалось 0,037, а во второй группе — 0,048 % (рис. 128). Это объясняется пониженной окислительной способно-

141. Расход и угар марганца при раскислении углеродистой стали в 5-тонной дуговой печи с кислой футеровкой и в сталеразливочном ковше

Способ раскисления стали ферромарганцем	Число плавов	Расход ферромарганца на 1 т стали, кг	Содержание марганца, %		Угар марганца, %
			в стали до присадки ферромарганца	в готовом металле	
В печи	•	13,45...14,42	0,07...0,14	0,63...0,71	38,2...43,4
		<u>14,16</u>	<u>0,10</u>	<u>0,67</u>	<u>42,4</u>
В ковше	•	8,3...8,6	0,08...0,12	0,58...0,66	10,0...17,0
		<u>8,44</u>	<u>0,098</u>	<u>0,62</u>	<u>14,97</u>

Примечание. В числителе приведены предельные значения, в знаменателе — средние.

стью конечного шлака при присадке ферромарганца в ковш, так как содержание MnO в шлаке по сравнению с его содержанием в шлаке при присадке ферромарганца в печь понижается с 5...10 % до 1,5...5,0 %. В то же время такое уменьшение содержания MnO в конечном шлаке значительно увеличивает трудоемкость очистки ковшей после разливки стали. Поэтому при раскислении стали ферромарганцем в ковше в технологическом процессе предусматривается повышенная, по сравнению с обычной технологией, присадка известняка в печь перед выпуском плавки с таким расчетом, чтобы получить в шлаке содержание CaO \geq 20 %. Это обеспечивает хорошее скачивание шлака и отделение его от стенок ковша. Химический состав конечного шлака при присадке ферромарганца в печь и в ковш показан в табл. 142.

Повышенное содержание CaO в шлаке способствует более стабильному содержанию Si в готовой стали, так как при этом уменьшается возможность восстановления его из шлака. Анализ данных большого количества плавов сталей 25Л и 35Л, выплавленных с присадкой ферромарганца в ковш в 5-тонных дуговых электропечах показал, что при содержании в конечном шлаке (CaO + MnO) 6...15% имелись отклонения по содержанию кремния в 9 % плавов, а при (CaO + MnO) 22 % — только в 2 % плавов.

Раскисление кислой электростали ферромарганцем в ковше по сравнению с раскислением в печи позволяет существенно повысить

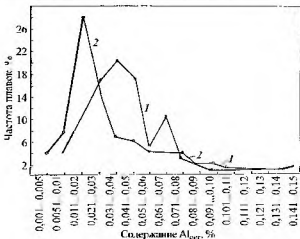


Рис. 128. Частота плавков с различным содержанием остаточного Al (по данным 100 плавков)

1 — с присадкой FeMn в ковш; 2 — с присадкой FeMn в печь

стабильность содержания Mn в стали. Анализ данных большого количества производственных плавков показывает, что при раскислении стали ферромарганцем в печи количество плавков, имеющих отклонения по содержанию Mn от требуемых значений, составляет 8–11 %, а при раскислении в ковше — 1 % (рис. 129). На этом рисунке хорошо видна стабильность содержания Mn в металле при присадке FeMn в ковш: около 50 % плавков выплавляется с содержанием Mn 0,6...0,7 ‰.

Более высокое содержание остаточного Al в плавках с присадкой ферромарганца в ковш приводит к некоторому улучшению пластических свойств стали, что видно из рис. 130, где показана частота плавков с различным относительным удлинением при присадке ферромарганца в печь и в ковш. Частотная кривая построена по данным текущего контроля 500 плавков одного и того же периода. Уровень предела текучести обеих групп плавков одинаковый; среднее содержание водорода и азота в стали, выплавленной с присадкой ферромарганца в печь и в ковш, практически не отличается (соответственно $4,8 \cdot 10^{-4}$ ‰ (4,8 ppm) и $4,75 \cdot 10^{-4}$ ‰ (4,75 ppm) [H], $6 \cdot 10^{-3}$ ‰ (60 ppm) и $6,9 \cdot 10^{-3}$ ‰ (69 ppm) [N]).

142. Химический состав конечного шлака при присадке ферромарганца в печь и в ковш

Способ присадки ферромарганца	Номер плавки	Химический состав конечного шлака, %					
		SiO ₂	CaO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	Σ(CaO + MnO + FeO)
В печь	1	56,8	20,45	6,10	5,86	5,53	32,41
	2	55,8	19,0	5,79	6,40	7,26	31,19
	3	55,13	23,50	10,24	6,17	5,47	39,91
	Среднее значение	55,9	20,98	7,38	6,14	6,90	34,50
В ковш	1	60,43	20,33	1,72	5,47	9,23	27,52
	2	57,10	20,25	2,38	6,25	3,95	28,88
	3	59,55	20,40	2,24	9,11	6,00	31,75
	4	59,05	17,40	4,72	7,09	6,26	29,21
	Среднее значение	59,03	19,59	2,76	6,98	6,26	29,34

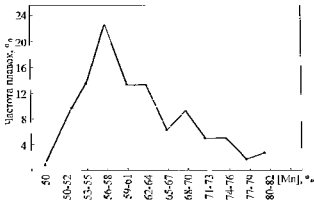


Рис. 129. Частота плавков с различным содержанием Mn в металле (по данным 200 плавков)

При присадке ферромарганца в ковш сокращается общая продолжительность плавки, так как выпуск металла в ковш может производиться уже через 5...10 мин после присадки ферросилиция. Температура металла в ковше, измеренная сразу же после окончания выпуска плавки вольфрамо-молибденовой термопарой погружения, должна быть 1650...1700 °С. После выпуска металла в ковш отбирают контрольную пробу на содержание углерода и после получения контрольного анализа начинают разливку.

Обычно при разливке стали стопорными ковшами наблюдается значительный перепад температуры металла (20...50 °С), разливаемого в начале и середине разливки. Повышенная температура в середине разливки (1460...1500 °С по оптическому пирометру) ухудшает качество поверхности отливок и увеличивает пригар. Присадка ферромарганца сопровождается снижением температуры стали благодаря затратам теплоты на нагрев и расплавление ферромарганца (1 кг ферромарганца, присаженного на 1 т стали, снижает ее температуру на 1,4 °С). Первые порции металла, попадающего в ковш, охлаждаются быстрее, чем остальной металл, поскольку происходит расход тепла на нагрев дна и стенок ковша.

Поэтому присадка ферромарганца в ковш после заполнения металлом на $1/3$ способствует снижению температуры металла, распроект-

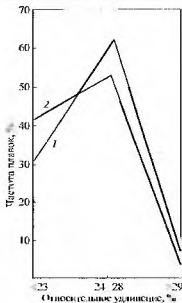


Рис. 130. Частота плавков с различной величиной относительного удлинения стали 25, раскисленной ферромарганцем в ковше (1) и печи (2)

ного в середине ковша, и выравниванию его температуры в начале, середине и конце разливки. Перепад температуры металла в начале и середине разливки при вводе ферромарганца в ковш составляет 10...30 °С. Это позволяет разливать плавки с максимальной температурой ≤ 1450 °С по оптическому пирометру (температура металла, как правило, в начале разливки 1410...1420 °С, в конце разливки 1420...1430 °С), что способствует улучшению качества отливок и уменьшению пригара.

Повышение стабильности температуры разливки стали за счет охлаждения металла в средней части ковша присадками ферромарганца и возможность длительной разливки стали с низкой температурой обеспечиваются еще и тем, что в этих условиях можно весь шлак из печи выпустить в ковш, не скачивая его, и за счет этого увеличить толщину теп-

лоизолирующего слоя шлага. Так, например, на одном из заводов после внедрения раскисления ферромарганцем в ковше стали, выплавленной в 5-тонных кислых электропечах, заменили 7-тонные сталерзливочные стопорные ковши на 9-тонные, а толщина шлага в ковше увеличилась с 40...120 до 130...200 мм. Это позволило более длительно разливать сталь с температурой не более 1450 °С по оптическому пирометру, не опасаясь образования настелей в ковше.

В 7-тонном ковше температура стали в период ее выдержки от выпуска до начала разливки снижалась со скоростью 10,1 °С/мин, а в 9-тонном — 6,55 °С/мин. Это позволило увеличить выдержку металла в ковше и снизить температуру разливки. Если 7-тонным ковшом все плавки начинали разливать при 1435 °С (по оптическому пирометру), то 9-тонным ковшом даже зимой 90 % плавков начинают разливать с температурой ниже 1435 °С, а 74 % плавков — 1420 °С. Снижение температуры разливки заметно улучшило качество поверхности отливок.

Использование ковшей оптимальной вместимости позволяет получить экономию за счет избежания потерь металла при скачивании шлага. Так, например, при выпуске плавки из 5-тонной электропечи в 7-тонный ковш в среднем теряется 300 кг металла, который в смеси со шлаком вывозится в виде скрапа на переработку.

Раскисление стали ферромарганцем в ковше и повышение стабильности температуры разливки позволили снизить себестоимость одной тонны дитья на 1,4 %, расход ферромарганца сократился на 5,72 кг/т.

7.4. ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

Проведенный сравнительный анализ работы различных электросталеплавильных агрегатов показывает ряд серьезных преимуществ индукционных печей перед дуговыми: отсутствие шума; отсутствие выбросов твердых частиц в атмосферу; возможность автоматизации процесса; меньшее поглощение водорода и азота из-за отсутствия высокотемпературных дуг; электродинамическое перемешивание, способствующее получению однородного по составу и температуре металла; отсутствие науглероживания металла электродами; возможность точно регулировать температуру процесса плавки; незначительный угар металла; высокая производительность; быстрый нагрев стали (выделение тепла внутри металла); быстрое растворение присадок; отсутствие затрат на электроды; меньшая трудоемкость обслуживания; малые габариты печей; малый расход огнеупорных материалов; меньшие капитальные затраты.

По этим причинам в последние годы в ряде стран нашли широкое распространение индукционные сталеплавильные печи емкостью до 65 т.

В то же время в СНГ применяются индукционные сталеплавильные печи, в основном, емкостью до 1 т. Причинами такого положения являются широко распространенное представление о необходимости периода окисления углерода в процессе плавки стали, а также тяжелые условия службы футеровки, толщина которой возрастает непропорционально увеличению емкости печи.

Проведенные нами исследования создают предпосылки для более широкого использования в сталелитейных цехах индукционных печей средней частоты, что поможет решить важные социальные задачи привлечения кадров в литейное производство и защиты окружающей среды.

Описанный выше технологический процесс выплавки стали в дуговых печах с повышенным содержанием кремния в шихте полностью применим для индукционной печи. При этом из-за значительно меньшего утара металла в индукционной печи по сравнению с дуговой для достижения тех же показателей требуется гораздо меньшее содержание кремния в шихте. Так, добавка 20 % кремнийсодержащих отходов в индукционной печи обеспечивает такое же содержание кремния по расплавлению, как 80 % отходов в дуговой (рис. 131). Даже при добавлении в шихту индукционной плавки только углеродистого стального лома (без кремнийсодержащих отходов) содержание кремния по расплавлению соответствует уровню, достигаемому при даче в шихту дуговой плавки 40 % отходов электротехнических сталей. Это говорит о том, что в высокочастотной сталеплавильной печи на обычном углеродистом ломе можно достичь высокого качества стали, не проводя окисления углерода.

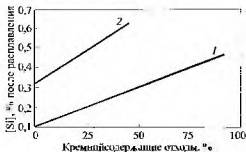


Рис. 131. Зависимость содержания Si в металле после расплавления от содержания в шихте кремнийсодержащих отходов в дуговой (1) и индукционной (2) печах

Применение мелких отходов электротехнической стали позволило лучше уплотнить шихту при укладке в печи (рис. 132), в результате чего сократились время расплавления и удельный расход электроэнергии. Отходы стали вводятся в первую загрузку печи: загружается углеродистый стальной лом и промежутки засыпаются мелкими отходами стали с максимально возможным уплотнением.

Применение в шихте 10 % отходов, содержащих до 1,5 % кремния, обеспечивает содержание кремния в готовом металле на верхнем пределе и полностью исключает необходимость присадки 45 %-ного ферросилиция для доводки плавки по химическому составу.

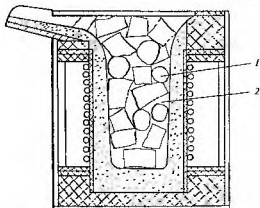
Средний химический состав плавов, длительность плавки и расход 45 %-ного ферросилиция приведены в табл. 143.

Проведенная работа показала, что, благодаря применению в шихте отходов от штамповки электротехнической стали, можно выплавлять углеродистую сталь в кислых индукционных печах без присадки ферросилиция.

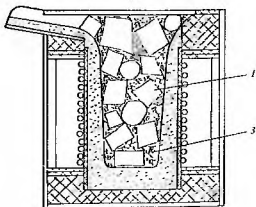
Это положение подтверждается сравнительным исследованием механических свойств стали, выплавленной в дуговой и индукционной печах. Сталь индукционной плавки при добавлении в шихту 12...16 % кремнийсодержащих отходов имела лучшие показатели по относительному удлинению и относительному сужению, чем сталь дуговой плавки при добавлении 30...50 % кремнийсодержащих отходов (соответственно 12 и 6 % плавов с относительным удлинением более 29, 35 и 10 % плавов с относительным сужением >41 %) (рис. 133, 134). В обоих случаях высокое качество стали обеспечивается высокой раскислительной способностью кремния при температурах периода плавления и решающим влиянием конечного раскисления стали алюминием на формирование сульфидных включений.

Практическими данными определено, что при выплавке стали для литья в формы из быстротвердеющих жидкостекольных смесей в дуговых электропечах с применением в шихте 30...50 % кремнийсодержащих отходов, оптимальная присадка алюминия для конечного раскисления составит 0,15 %. При такой присадке обеспечивается требуемое содержание остаточного алюминия. Сталь, выплавленная в индукционной печи, уже при присадке 0,1 % алюминия в большинстве плавов содержит требуемое количество остаточного алюминия, а при присадке 0,15 % алюминия свыше 57 % плавов содержало > 0,09 % (рис. 135). При таком содержании в результате вторичного окисления понижается уровень механических свойств, особенно ударной вязкости.

При одинаковой присадке алюминия, равной 0,15 %, сталь индукционной плавки имеет показатели по ударной вязкости хуже, чем дуговой (соответственно 15 и 35 % плавов с ударной вязкостью



а)



б)

Рис. 132. Укладка шихты в печи без использования мелких отходов электротехнической стали (а) и с использованием мелких отходов электротехнической стали (б):

1 — стальной лом; 2 — незаполненное пространство; 3 — мелкие отходы электротехнической стали

143. Характеристика плавок стали в индукционной печи с применением и без применения в шихте мелких отходов электротехнической стали

Состав шихты	Число исследованных плавок	Среднее содержание элементов в готовом металле, %						Процент плавок с содержанием углерода $\geq 0,25$ %	Длительность плавки, мин	Удельный расход 45 %-ного ферросилиция, кг/т
		C	Mn	Si	S	P	Fe			
Возврат литейного производства сталей 25Л и 35Л	20	0,29	0,70	0,29	0,037	0,040	Остальное	100	140	3,70
Возврат литейного производства сталей 25Л и 35Л + отходы электротехнической стали в количестве 10 % от металлосварки	25	0,24	0,69	0,36	0,034	0,038	Остальное	12	125	—

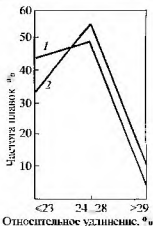


Рис. 133. Частота плавков с различной величиной относительного удлинения стали 25Л:

1 — в дуговой печи с добавлением 30...50 % кремнийсодержащих отходов в шихту (по данным 380 плавков), 2 — в индукционной печи с добавлением 12...16 % кремнийсодержащих отходов в шихту (по данным 342 плавков)

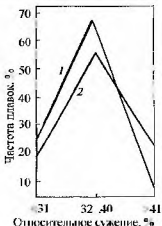


Рис. 134. Частота плавков с различной величиной относительного сужения стали 25Л:

1 — в дуговой печи с добавлением 30...50 % кремнийсодержащих отходов в шихту (по данным 380 плавков), 2 — в индукционной печи с добавлением 12...16 % кремнийсодержащих отходов в шихту (по данным 342 плавков)

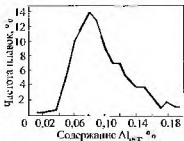


Рис. 135. Частота плавков с различным содержанием остаточного алюминия в стали 25Л, выплавленной в индукционных печах и раскисленной 0,15 % алюминия (по данным 600 плавков)

785 кДж/м³) (рис. 136). При выплавке стали в индукционных печах для отливок в оболочковые формы присаживают 0,13 % алюминия в связи со значительной газотворной способностью оболочковых форм. При выплавке стали в индукционных печах для отливок в земляные формы отсутствие брака отливок по ситовидной пористости обеспечивается присадкой 0,1 % алюминия, так как газотворная способность форм значительно меньше. Все эти факторы необходимо учитывать при разработке технологии выплавки стали в индукционных печах для фасонного литья.

При этом необходимо в литейных цехах машиностроительных заводов прежде всего использовать отходы собственного производства известного химического состава.

7.5. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

При работе индукционных печей возникают проблемы биоэлектромагнитной совместимости обслуживающего персонала [142]. Электромагнитные поля снижают работоспособность, повышают утомляе-

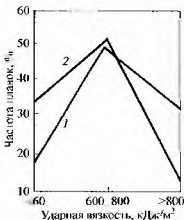


Рис. 136. Частота шлаков с различной величиной ударной вязкости в стали 25Л, раскисленной 0,15% алюминия в дуговой (1) и индукционной (2) печах

мость, вызывают головные боли, бессонницу, изменение кровяного давления и пульса [143]. Известны работы ученого Мюнхенского уни-верситета Отто Петровича о взаимосвязи электромагнитных полей с онкологическими заболеваниями [144]. На эту тему доктор Петрович выступил в 2001 г. с докладом на семинаре на факультете электротерми-ни Технологического Университета г. Ильменау, в начале которого он отмечает, что едва ли существовала тема, которая вызвала бы столько дискуссий, как тема о воздействии электромагнитного поля на окружающую среду и здоровье человека [145].

Доктор Петрович показал, что электромагнитные поля представля-ют значительную угрозу в отношении раковых заболеваний, особенно опухолей нервов сетей, головного мозга и лейкемии. Он обращает внимание на большой вред, наносимый полями высокой частоты. При этом если электрические поля воздействуют только на поверхность тела, то магнитные поля — на сердце, ток крови, и они беспрепятст-венно проникают внутрь тела.

Остановимся на магнитной составляющей электромагнитных полей. В России существуют нормы для электромагнитных полей, в частности напряженности магнитного поля. Это санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные и магнитные поля в прои-зводственных условиях». Они устанавливают предел напряженности магнитного поля за 8 ч пребывания — 80 А/м для частоты 50 Гц, 50 А/м для частоты 0,03...3,0 МГц, 3 А/м для частоты 30,0...50,0 МГц.

Для сравнения можно привести японские нормы Q7422D5001–06, в которых этот интервал частот разделен: при частотах от 30 кГц до 30 МГц норма напряженности магнитного поля составляет 4,9 А/м, а в диапазоне 30...300 МГц норма очень низкая — 0,163 А/м. Еще ниже норма от 21.08.2001 г. на напряженность магнитных полей высокой частоты немецкого федерального ведомства по защите от излучений (BfS). В диапазоне частот от 10 до 400 МГц норма составляет 0,073 А/м.

В России, к сожалению, отсутствуют нормы на напряженность магнитного поля для средних частот (от свыше 60 до 10 000 Гц), не-смотря на то, что в промышленности работает достаточно большое количество индукционных печей средней частоты, в основном в пределах 250...2500 Гц. Наши исследования показывают, что факти-ческие магнитные поля печей промышленной и средней частоты имеют показатели напряженности примерно одного порядка. Если допустимый уровень напряженности магнитного поля для печей промышленной частоты составляет 80 А/м, то для печей средней частоты средние фактические значения по нашим замерам — 54 А/м. Поэтому напряженность магнитного поля печей средней частоты вполне можно оценивать по нормам для печей промышлен-ной частоты.

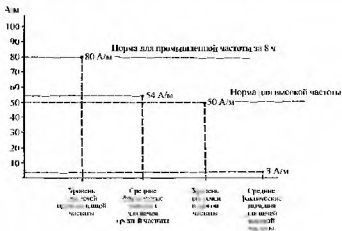


Рис. 137. Зависимость напряженности магнитного поля от частоты тока

Частота тока является наиболее сильным фактором, влияющим на уровень напряженности магнитного поля. Наши исследования показывают, что если среднее фактическое значение напряженности магнитного поля для печей средней частоты, как уже отмечено, 54 А/м, то для печей высокой частоты — 1...3 А/м (рис. 137).

Наилучшие результаты в этом смысле дают каналные печи, у которых напряженность магнитного поля на рабочей площадке равна нулю, так как у каналных печей магнитные поля поглощаются сердечником. Такие замеры были проведены на двух предприятиях и в обоих случаях получили результат 0 А/м [146]. Существенным фактором, влияющим на напряженность магнитных полей индукционных плавильных печей, являются экранирующие магнитопроводы. Например: на турецкой фирме Eges печь емкостью 300 кг, рабочей частотой 500 Гц и мощностью 600 кВт создавала на рабочей площадке печи на расстоянии 1 м от печи магнитное поле 1028 А/м. Затем в конструкцию печей были введены шихтованные магнитопроводы из трансформаторной стали. Замеры, проведенные практически на аналогичной печи с магнитопроводами емкостью 1000 кг, рабочей частотой 1000 Гц и мощностью 600 кВт, показали, что напряженность магнитного поля

составила 17 А/м, т.е. в 60 раз меньше. Уменьшению напряженности магнитного поля способствовала также замена алюминиевого корпуса печи на стальной.

Существенно снизилась после введения магнитопроводов напряженность магнитного поля и у среднечастотных печей российской компании «РЭЛТЕК» [147]. Исследования, проведенные учеными Ганноверского и Падуанского университетов, показывают, что магнитопроводы позволяют уменьшить влияние магнитного поля на обслуживающий персонал, работающий вблизи индукционных установок для нагрева заготовок, на 20...70 % [142].

Исследование, проведенное на индукционной печи емкостью 500 кг, мощностью 300 кВт, частотой 2000 Гц производства японской фирмы ULVAC, показало, что без экранирующих магнитопроводов напряженность магнитного поля на расстоянии примерно 1 м от печи превысила 80 А/м, а после установки экранирующих магнитопроводов оказалась значительно ниже 80 А/м. Экранирование магнитных полей хорошо обеспечено в индукционных печах производства фирмы OTTO JUNKER [148].

При прочих равных условиях среднечастотные установки для нагрева имеют меньшую напряженность магнитного поля, чем плавильные печи. Так, например, в компании «РЭЛТЕК» (г. Екатеринбург) плавильная печь емкостью 400 кг, частотой 2400 Гц и мощностью 320 кВт имела напряженность магнитного поля 40 А/м, а индукционная нагревательная установка для термообработки сварных швов при той же частоте 2400 Гц, но мощностью 50 кВт, имела напряженность магнитного поля 1,9 А/м. С другой стороны, в примере, который приведен по фирме Eges (Турция), когда ввод шихтованных магнитопроводов из трансформаторной стали снизил напряженность магнитного поля в 60 раз, печи в обоих случаях имели одинаковую мощность — 600 кВт.

Большое значение для сопоставимости результатов замеров имеет расстояние точки замера от печи. Как правило, сравнивают результаты замеров, выполненных на расстоянии до 1 м от печи. На фирме АВР были выполнены замеры напряженности магнитного поля у печи емкостью 2000 кг, частотой 370 Гц и мощностью 2000 кВт с изменением расстояния от центра печи вверх по вертикали и от печи по горизонтали. Эти замеры показали следующее. Над центром печи на расстоянии 6 см напряженность магнитного поля составила 2020 А/м, на высоте 50 см — 565 А/м и на высоте 100 см — 87,5 А/м. На расстоянии 100 см по горизонтали от печи эти величины составили соответственно 209, 114 и 57 А/м (рис. 138). Эти факторы необходимо учитывать при разработке инструкций по технике безопасности для производственного персонала.

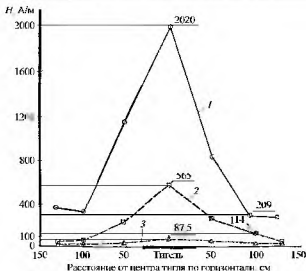


Рис. 138. Изменение напряженности магнитного поля индукционной печи в зависимости от расстояния от ее центра:

1 — высота 6 см; 2 — высота 50 см; 3 — высота 100 см

В этих инструкциях должно быть точно указано, на каком расстоянии от печи должен находиться сталевар (плавильщик) в те периоды, когда он не выполняет технологические операции непосредственно с металлом и шлаком. В инструкциях также должно быть сказано, что при выполнении операций с металлом и шлаком печь должна быть отключена.

Необходимо на каждом предприятии, где работают индукционные плавильные печи или индукционные установки для нагрева металла, проверять напряженность магнитного поля на рабочих местах.

При применении индукционных плавильных печей необходимо принимать меры по защите работающих от воздействия магнитных полей. Одной из таких мер является правильный выбор типа печей.

Во многих случаях есть выбор между индукционными плавильными печами средней и промышленной частоты. Исследования показы-

пают, что при прочих равных условиях печи промышленной частоты имеют более высокий уровень напряженности магнитного поля, чем печи средней частоты. Это, например, нашло отражение в различных немецких нормах напряженности магнитного поля для промышленной и средней частоты (табл. 144 и рис. 139).

144. Нормы по напряженности магнитного поля в промышленности Германии, А/м

Нормы	Напряженность магнитного поля, А/м, при рабочей частоте, Гц		
	50	1000	10 000
UW	6400	800	160
VDE 0848	4000	1000	400
Новые правила немецкого профессионального общества точной механики и электротехники	1000	65	65

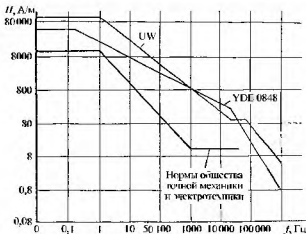


Рис. 139. Нормы Германии на напряженность магнитного поля при различной частоте тока (время воздействия — 8 часов)

Проведенное сравнение напряженности магнитного поля, замеренной на расстоянии 1 м и высоте 1,5 м от работающих индукционных печей промышленной и средней частоты фирмы OTTO JUNKER (Германия), при прочих примерно равных условиях, показало, что эта величина для печей промышленной частоты (50 Гц) составила в среднем 32,25 А/м, а для печей средней частоты (250 Гц) — 16,6 А/м.

Печи средней частоты имеют по сравнению с печами промышленной частоты и другие преимущества: больший термический коэффициент полезного действия, работают в загрузочном режиме (без «болота»), более маневренны в смысле сменности работы и смены сплава.

Опыт фирмы Eges показывает, что перевод индукционных плавильных печей емкостью от 1,6 до 3,0 т с промышленной частоты 50 Гц на среднюю частоту 250 Гц привел к повышению мощности в 1,4...2 раза и производительности печи в 1,7...3 раза.

В табл. 145 приведены результаты замеров напряженности магнитного поля у печей средней частоты.

На рис. 140 показаны экранирующие магнитопроводы на индукционной печи фирмы OTTO JUNKER.



Рис. 140. Экранирующие магнитопроводы на индукционной печи фирмы «OTTO JUNKER»

145. Результаты замеров напряженности магнитного поля индукционных печей средней частоты

Фирма — изготовитель печей	Емкость печи, кг	Рабочая частота тока, Гц	Мощ- ность, кВт	Напря- женность магнитно- го поля на расстоя- нии 1 м от печи, А/м
Eges, Турция	1000	1000	600	17,1
«РЭЛТЕК», Россия	400	2400	320	40
АВР, Германия	4500	500	—	56
АВР, Германия	500	1000	300	80
АВР, Германия	12 000	240	9300	80
АВР, Германия	2000	370	2000	50
ОТТО JUNKER, Германия	6000	250	6000	16,6

Глава 8

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЛИВКИ КИСЛОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

8.1. СПОСОБЫ РАЗЛИВКИ

Выпуск стали из кислых электропечей производится в стопорные или чайниковые ковши, футерованные шамотным кирпичом. Схема стопорного ковша показана на рис. 141, а, а чайникового — на рис. 141, б. В первом случае сталь разливается через стакан, установленный в дне ковша. В процессе разливки он перекрывается стопором с помощью специального механизма. Во втором случае сталь разливается через носок ковша, имеющаяся в ковше перегородка задерживает

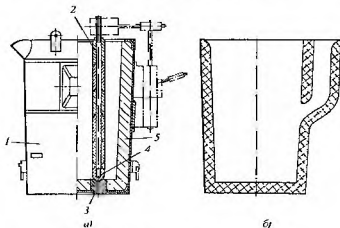


Рис. 141. Сталиразливочные ковши:

а — стопорный, 1 — корпус ковша, 2 — стопор, 3 — стакан; 4 — пробка;
5 — футеровка стен, б — чайниковый

шлак, а металл для разливки поступает из нижних слоев. При обоих способах разливается чистый металл, без шлака. Кожух ковша выполняется сварным. Для транспортировки ковш снабжен цапфами и подвеской. Сварные швы, выполненные сплошными и плотными, при изготовлении ковша контролируют ультразвуковым дефектоскопом. Сплошность металла серги и цапф проверяют методом цветной дефектоскопии. В ковше может быть выполнена донная продувочная фурма (рис. 142) для продувки стали аргоном.

В состав комплекта стопорного ковша входят: ковш (в том числе может быть с донной продувочной фурмой) (рис. 143), траверса для подъема и транспортировки ковша, стопорный механизм, поворотный механизм, футеровка. Устройство стопора показано на рис. 144, а стопорного гнезда — на рис. 145. Ковш после изготовления обязательно проверяется на грузоподъемность повышенной нагрузкой (например, 7,5 т ковш под нагрузкой 9 т) в течение 10 мин.

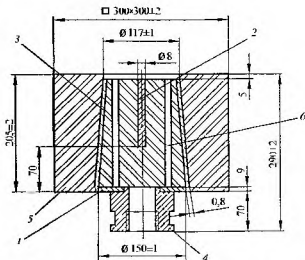


Рис. 142. Продувочный фурменный узел сталеразливочного ковша:

- 1 — плита; 2 — индикатор износа; 3 — обечайка; 4 — вальтер;
5 — шланговый гнездовой бивок; 6 — щели продувочные

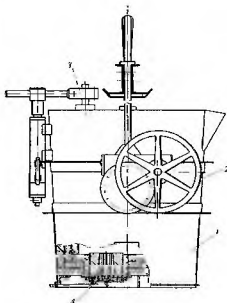


Рис. 143. Сталеразливочный стопорный ковш вместимостью 7,5 т с продувочным фурменным узлом

1 — ковш, 2 — штурвал поворота;
3 — узел стопора; 4 — узел продувки притоком



Рис. 144. Устройство стопора:

1 — стержень металлический, 2 — пробка стопорная, 3 — трубка стопорная, 4 — пружина, 5 — гайка компенсирующая

В сталелитейном производстве применяются следующие схемы разлива металла в формы: из стопорного ковша, большого чайникового ковша, через промежуточные чайниковые ковши небольшой вместимости, через разливные устройства с индукционным подогревом при разливе на автоматических линиях.

При эксплуатации сталеразливочных ковшей особое внимание необходимо уделять соблюдению правил их кантовки и транспортировки, в том числе контролю за срабатыванием тормоза мостового крана

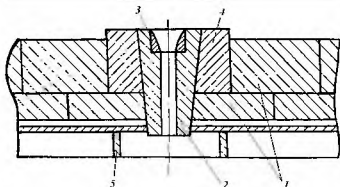


Рис. 145. Устройство створного гнезда:

1 — кирпич шпательный прочный, 2 — стопорный стержень, 3 — вкладыш магниевый; 4 — гнездовой кирпич; 5 — днище ковша

(в периоды нахождения жидкого металла в ковше); заполнению ковша не более, чем на $\frac{2}{3}$ его высоты; наличию и исправности скоб, фиксирующих подвеску ковша.

8.2. ПОДГОТОВКА КОВШЕЙ К ПЛАВКЕ

Важнейшими операциями подготовки ковшей к плавке являются наборка, сушка и установка стопора в ковш. Перед наборкой стопор необходимо просушить пробки при температуре 100...110 °С в течение 72 ч. Это позволяет удалить из пробок кристаллизационную влагу и предотвратить их растрескивание при заполнении ковша жидким металлом. Далее отверстие пробки заливается массой следующего, например, состава: глина огнеупорная молотая крупностью до 1,6 мм — 75 %, кварцевый песок зернистости 016 — 25 %, вода — 10 % (сверх 100 %). Затем пробка навинчивается на стержень до отказа, а масса, выжатая из отверстия пробки, удаляется петушкой. После этого на стержень стопора надевают и подгоняют стопорные трубки. Пространство между стержнем и стопорными трубками засыпают сухим песком. Торцы трубок обмазывают огнеупорной массой.

Фиксация втулок на стержне может производиться путем их сжатия пружиной и компенсирующей гайкой, устанавливаемых поверх втул-

ки, или путем установки в зазор между внутренней стенкой верхней пушки и стержня металлического клина. Собранный стопор перед установкой его в ковш необходимо просушить при температуре 130...150 °С в течение 48 ч. На некоторых предприятиях стопор сушат в течение 16 ч, однако анализ причин аварийных выходов из строя стопоров показывает, что этого недостаточно.

Огнеупорные изделия для разливки стали по ГОСТ 5500–2001 показаны на рис. 146–151 и в табл. 145–155.

Стопор устанавливается в ковш сразу после его сушки, так как охлаждение стопора перед установкой может привести к адсорбции влаги пробкой и ее растрескиванию при заполнении ковша жидким металлом. Перед установкой стопора пробка смазывается смесью графита с лигносульфонатом техническим, а в дно ковша строго горизонтально, не выше уровня дна ковша, чтобы обеспечить полный слив металла и избежать образования настывлей, устанавливается стакан. Стопор тщательно притирается к стакану (к магнетитовому вкладышу).

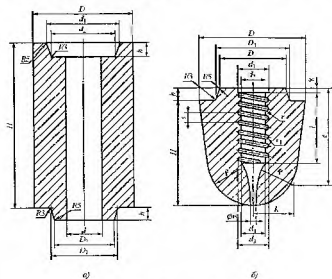


Рис. 146. Стопорная трубка (а) и пробка (б)

145. Размеры, мм, стопорной пробки

Но- мер исде- ния	H	h	h_1	D	D_1	D_2	d	d_1	d_2	Номер приме- няемой пробки
1	300	10	13	100	67	63	40	72	67	9
2	300	14	17	125	81	75	48	86	79	10
3	300	18	21	140	94	88	54	100	93	11
4	300	18	21	160	106	100	60	111	104	12
5	300	23	26	180	125	115	64	129	119	13
6	300	23	34	180	125	115	64	129	115	13
7	270	23	26	200	125	115	64	129	119	14, 14-2
8	270	23	34	200	125	115	64	129	115	14, 14-2
8-1	270	35	38	200	136	110	64	140	114	14-1

Примечания: 1. Высоту h_1 стопорной пробки номеров 6 и 8 принимают большей по сравнению с пробкой номеров 5 и 7 с учетом применения разгрузочной металлической шайбы толщиной 8 мм.

2. По соотношению сторон допускается изготавливать стопорные пробки: номеров 1–8, 8-1 высотой 150, 200, 250 мм; номеров 5, 6 высотой 275 мм; номеров 7, 8, 8-1 высотой 300 мм, а также номеров 1–8, 8-1 с другим внутренним диаметром d .

Герметичность прилегания пробки стопора к вкладышу проверяется так: вокруг пробки обсыпается мелкий песок и простукиванием по вилке стопора проверяется отсутствие течи песка под пробку в выпускное отверстие.

При подготовке к плавке чайникового ковша в нем устанавливается перегородка. Одним из вариантов перегородки могут служить стопорные пробки.

Подготовленный к работе ковш мостовым краном устанавливается в приямок электродуговой сталеплавильной печи со стороны выпускного отверстия, и производится выпуск металла из печи в ковш. После заполнения ковша он с помощью крана приподнимается над приямком, подключается баллон с аргоном, производится продувка жидкого металла аргоном, затем ковш транспортируется на заливку форм.

146. Размеры, мм, пробки

Но- мер изде- лия	H	h	D	D_1	D_2	d_1	d_2	d_3	d_4	f	α	r	γ	R	R_1	r	k
9	125	10	100	67	63	34	24	32	22	72	12	2,8	2,6	47,5	27	97	31
10	140	14	125	81	75	40	30	38	28	91	12	2,8	2,6	57,5	45	126	51
11	160	18	140	94	88	48	36	46	34	100	16	3,7	3,6	67,5	54	140	60
12	180	18	160	106	100	55	43	52	40	115	16	3,7	3,6	77,5	62	160	69
13	200	23	180	125	115	55	43	52	40	120	16	3,7	3,6	77,5	62	166	69
14	200	23	200	125	115	55	43	52	40	120	16	3,7	3,6	77,5	62	166	69
14-1	200	35	200	136	110	55	43	52	40	132	16	3,7	3,6	77,5	62	166	69
14-2	225	23	200	125	115	55	43	52	40	120	16	3,7	3,6	77,5	62	166	69

Примечания: 1. Верхний и нижний витки винтовой нарезки пробки обрезают так, чтобы исключить возможность образования острого угла.

2. Допускается изготавливать пробку:

без выемки в верхней части винтовой нарезки;

с цилиндрическим пояском высотой 15...20 мм в верхней части конической поверхности диаметром D , равным 100...160 мм, и высотой 20...50 мм диаметром D , равным 180...200 мм;

с цилиндрическим пояском высотой до 5 мм на переходе от конической к сферической части;

с выступающим или утопленным сферическим следом от выталкивателя пресс-формы высотой до 1 мм в нижней части.

3. Металлургическим предприятиям, изготавливающим пробки для собственного потребления, разрешается изготавливать их не только с винтовыми, но и с анкерными или болтовыми креплениями.

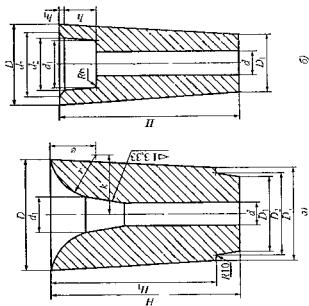


Рис. 148. Стакан номер 24 (а), стакан номеров 25–30 (б)

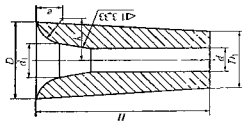


Рис. 147. Стакан номеров 15–23

147. Размеры, мм, стакана номеров 15–23

Номер изделия	H	D	D_1	d	d_1	φ	φ	k	Номер применяемой пробы
15	140	140	112	24	50	35	34	60	9
				26					
				28					
				30					
				32					
				35					
				40					
				45					
				50					
				52					
16	240	160	120	20	65	35	34	67	11
				22					
				24					
				26					
				28					
				30					
				35					
				40					
				45					
				50					
55									
60									
70									
72									
17	300	160	127	25	60	35	34	65	10, 11
				30					
				35					
				40					
				45					
				50					
				55					
				60					
62									
70									
72									

Продолжение табл. 147

Номер изделия	H	D	D_1	d	d_1	e	e	k	Номер применяемой пробы
18	360	160	120	30	65	40	37	72	11
				35					
				40					
				45					
				50					
				55					
				60					
19	140	140	112	30	58	35	34	64	10
				35					
				40					
				45					
				50					
				60					
				62					
20	300	160	127	30	68	35	34	69	10, 11
				35					
				40					
				45					
				50					
				55					
				60					
65									
21	360	160	120	30	68	55	51	88	12, 13, 14, 14-1, 14-2
				35					
				40					
				45					
				50					
				55					
				60					
65									
				70	72				

Описание табл. 147

Номер изделия	H	D	D_1	d	d_1	φ	φ	k	Номер применяемой пробки
22	240	180	140	30	71	50	46	85	11
				35					
				40					
				45					
				50					
				55					
				60					
				65					
				70					
				72					
23	370	210	146	30	67	90	86	120	12, 13, 14, 14-1, 14-2
				35					
				40					
				45					
				50					
				55					
				60					
				70					
				80					
				90					
100									
				70	82	65	64	105	
				80					
				90	102	54	54	105	
				100					

Примечание. Стакан номер 23 диаметром внутреннего канала d , равным 70, 80, 90, 100 мм, изготавливают только безобжиговые.

148. Размеры, мм, стакана номер 24

Номер изделия	H	H_1	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	r	e	k	Номер применяемой пробы
24	370	320	210	146	152	180	30	67	90	86	120	12, 13, 14, 14-1, 14-2
							35					
							40					
							45					
							50					
							55					
							60					
70	82	65	64	105								
80												
90	102	54	54	105								
100												

Примечание. Стакан номер 24 диаметром внутреннего канала d , равным 70, 80, 90 и 100 мм, изготавливают только безобжиговым.

149. Размеры, мм, стакана номеров 25–30

Номер изделия	H	h	h_1	D	D_1	d	d_1	d_2	d_3	Номер применяемых вкладыва пробы	
										вкладыша	пробы
25	200	60	8	125	95	30	75	80	106	35	9
						35					
						40					
26	140	60	8	140	112	30	75	80	106	35	8
						35					
						40					
27	240	65	12	160	120	25	98	102	140	36	10, 11
						30					
						35					
						40					
						45					
						50					
						55					
60											

Описание табл. 149

Номер изделия	H	h	h_1	D	D_1	d	d_1	d_2	d_3	Номер применяемых	
										вкладыша	пробки
28	300	65	12	160	127	25	98	102	140	36	10, 11
						30					
						35					
						40					
						45					
						50					
						55					
60											
29	360	65	12	160	120	30	98	102	140	36	10, 11
						35					
						40					
						45					
						50					
						55					
						60					
30	240	65	12	180	140	30	98	102	140	36	10, 11
						35					
						40					
						45					
						50					
						55					
						60					

150. Размеры, мм, стакана номеров 31 и 32

Номер изделия	H	H_1	D	D_1	D_2	D_2	d	d_1	e	e	k	Номер применяемой пробки
31	280	170	140	110	120	164	30	65	40	37	72	11
							35					
							40					
							45					
							50					
							55					
60												

Описание табл. 150

Номер изделия	H	H_1	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	r	g	k	Номер применяемой пробки
32	360	250	140	110	120	175	30	65	40	37	72	11
							35					
							40					
							45					
							50					
							55					
60												

151. Размеры, мм, стакана номеров 33 и 34

Номер изделия	H	H_1	h	h_1	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2	d_3	Номер применяемых	
													вкладыш	пробки
33	280	170	65	8	140	110	120	164	30	98	102	126	36	10,
									35					
									40					
									45					
									50					
									55					
60														
34	360	250	65	8	140	110	120	175	30	98	102	126	35	10,
									35					
									40					
									45					
									50					
									55					
60														

Примечание. В верхней и нижней частях наружной конической поверхности стаканов всех номеров допускается цилиндрический поясок высотой 10...15 мм, а при переходе от верхней конической поверхности к шейке стакана по размеру D_3 — закругление радиусом до 5 мм.

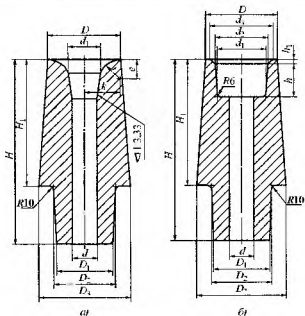


Рис. 149. Стакан номер 31 и 32 (а), стакан номер 33 и 34 (б)

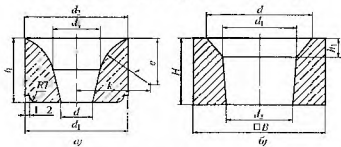


Рис. 150. Вкладыш номер 35 и 36 (а), гнездовой кирич номер 37–44 (б)

152. Размеры, мм, вкладыша номеров 35 и 36

Номер изделия	h	d	d_1	d_2	d_3	r	e	k	Номер применяемых	
									стакана	гробля
35	57	30	71	76	43	35	29	56	25, 26	9
		35								
		40								
36	62	25	94	98	42	50	44	70	27, 28, 29, 30, 33, 34	10, 11
		30								
	62	35	94	98	52	45	39	70		
		40								
		45								
	62	50	94	98	62	40	32	70		
55										
60										

Примечание. На верхней части наружной поверхности и конусной части внутренней поверхности вкладыша допускается цилиндрический поясок высотой до 5 мм.

153. Размеры, мм, гнездового кирпича номеров 37—44

Номер изделия	B	H	h_1	d	d_1	d_2	Номер применяемого стакана
37	250	100	30	190	129	119	25
38	250	120	30	190	144	126	15, 19, 26
39	250	120	30	225	184	169	22, 30
40	300	150	40	240	184	166	22, 30
41	300	150	40	240	164	146	16, 27
42	300	150	40	240	164	152	17, 18, 20, 21, 28, 29
43	360	150	60	300	215	200	23
44	360	150	60	300	215	206	24

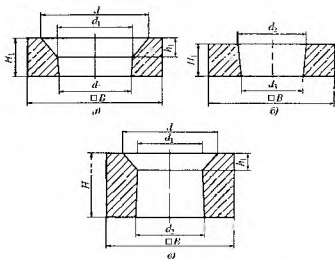


Рис. 151. Верхняя часть составного гнездового кирпича номеров 45 и 46 (а), нижняя часть составного гнездового кирпича номеров 45 и 46 (б), гнездовой кирпич номер 49 (в)

154. Размеры, мм, гнездового кирпича номеров 45–46

Номер изделия	B	H_1	h_1	d	d_1	d_2	d_3	Номер применяемого стакана
45	300	75	40	240	164	160	—	17, 18, 20
46	300	75	—	—	—	160	152	21, 28, 29

155. Размеры, мм, гнездового кирпича номер 49

Номер изделия	B	H	h_1	d	d_1	d_2	Номер применяемого стакана
49	300	150	40	220	144	159	31, 32, 33, 34

После разливки плавки ковш тщательно очищается от шлака и остатков металла, охлаждается и затем подготавливается к следующей плавке или передается для ремонта футеровки.

8.3. ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЛИВКИ

После выпуска металла и шлака в ковш через шлак отбирается контрольная проба на содержание углерода. Разливку начинают только после получения положительного результата анализа контрольной пробы. Перед началом разливки металл выдерживается в ковше, чтобы обеспечить минимально возможную температуру разливки для предотвращения пригара на поверхности отливок. После выдержки, во избежание подтекания струи при разливке, над шлаковой или над крупной прибылью (при заливке через открытую прибыль) проводится проработка стопора путем двух-, трехкратного перекрывания стакана стопором.

Разливка металла в формы выполняется ровной непрерывной струей. После заполнения формы проводится «подкачка» литниковой системы металлом в целях лучшего заполнения прибылей. В середине разливки плавки отбираются пробы на химический анализ и механические испытания стали. Отдельно отбирается проба для контроля стали на содержание остаточного алюминия.

Скорость разливки стали из стопорного ковша зависит от диаметра стакана и высоты жидкой стали в ковше. Так, например, для ковшей вместимостью 6...10 т и с диаметром стакана 40 мм при высоте жидкой стали в ковше 100 мм скорость разливки составляет 12,2 кг/с, а при высоте 1600 мм — 48,7 кг/с. Контроль температуры стали во время разливки проводится термомпарой погружения или оптическим пирометром.

Технология разливки стали непосредственно связана с рациональной емкостью сталеразливочных ковшей. Равенство емкости сталеразливочных ковшей массе плавки имеет тот недостаток, что в ковш помещается только меньшая часть шлака из печи, а большую при выпуске приходится сливать, теряя при этом некоторое количество металла. При низкой температуре металла и небольшой толщине слоя шлака верхние слои металла в ковше к концу длительной разливки охлаждаются настолько, что оседают на дно ковша в виде настывшей, особенно зимой. В то же время сравнительно высокая температура начала разливки стали (1435...1445 °С по оптическому пирометру) влечет за собой повышенный пригар на отливках. Эти недостатки могут быть устранены повышенной емкостью ковшей.

Например, в одном из сталелитейных цехов, где работали 5-тонные дуговые печи, заменили 7-тонные сталеразливочные стопорные ковши на 9-тонные без изменения массы плавки. Это позволило полно-

стью выпускать в ковш металл и шлак, оставляя свободной часть верхнего пространства ковша в соответствии с правилами техники безопасности. С прекращением слива шлака исчезли и потери металла с ним. Это позволило повысить выход годного литья по отношению к металлозавалке (с 53,8 до 56 %), получить экономию шихтовых, вспомогательных материалов и электроэнергии. Толщина слоя шлака увеличилась с 40...120 мм в 7-тонном ковше до 130...200 мм в 9-тонном. Температура стали в период выдержки от выпуска до начала разлива в 7-тонном ковше снижалась со скоростью 10,1 град/мин, а в 9-тон-

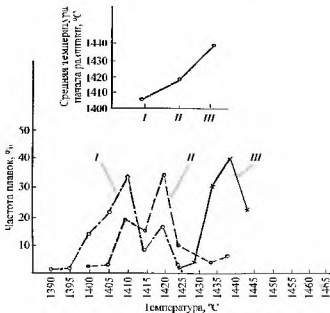


Рис. 152. Частота плавков с различной температурой начала разлива стали 7- и 9-тонными створными ковшами:

- I* — плавки, разлитые 9-тонным ковшом с набивной футеровкой в летнее время,
II — плавки, разлитые 9-тонным ковшом с набивной футеровкой в зимнее время,
III — плавки, разлитые 7-тонным ковшом с кирпичной футеровкой

ном — 6,55 град/мин. Температура металла в конце разливки стала близкой к начальной. Это позволяет, при прочих равных условиях, начинать разливать металл 9-тонным ковшом при более низкой температуре, чем 7-тонным, не опасаясь образования настывшей на дне ковша, и увеличить выдержку металла в ковше. Резко снизилась температура разливки стали, что видно на рис. 152. Снижение температуры разливки значительно улучшило поверхность отливок.

8.4. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФУТЕРОВКИ КОВШЕЙ

В большинстве сталелитейных цехов СНГ для футеровки сталеразливочных ковшей применяется огнеупорный шамотный кирпич. Стойкость кирпичной футеровки на разных заводах от 4 до 20 плавов. Основными очагами разрушения футеровки сталеразливочных ковшей являются швы между кирпичами, вымываемые жидким металлом.

Следовательно, повышения стойкости футеровки и снижения ее стоимости можно достигнуть применением монолитных огнеупоров. Наиме обобщен опыт использования такой футеровки.

Монолитная футеровка в чайниковых и стопорных сталеразливочных ковшах емкостью 1...15 т применяется в литейных цехах ряда отечественных и зарубежных заводов; особенно широко она распространена в США. Монолитная футеровка сталеразливочных ковшей нашла также значительное применение и в сталеплавильных цехах металлургических заводов в ковшах емкостью до 200 т.

Как правило, монолитным выполняется только рабочий слой футеровки стен, а арматурный слой — кирпичным. Толщина набивного слоя в зависимости от емкости ковша 70...140 мм. На некоторых заводах набивную футеровку стен выполняют непосредственно по кожуху, без арматурного кирпичного слоя, или же между кожухом и набивкой прокладывают асбест толщиной 3,5 мм.

Футеровка дна сталеразливочных ковшей с монолитными стенами выполняется кирпичной, преимущественно из двух рядов шамотного кирпича. Хорошие результаты показала футеровка дна, когда один слой лещадки выкладывается на плашку и над ним один слой ковшевого шамотного кирпича — на ребро. Такая футеровка дна не разрушается при срыве скрапин. На некоторых заводах применяют и монолитную футеровку дна.

Для футеровки стопорных ковшей применяются кремнеземистые массы. На многих заводах Бельгии, Франции, Японии и некоторых металлургических заводах СНГ для футеровки ковшей используется природный кварцевый песок. Наилучшие результаты показывает песок с

содержанием SiO_2 не менее 92 % и огнеупорностью не менее 1730 °С. Размер зерен песка на различных заводах колеблется в пределах 0,1...2,0 мм. Содержание глины в песке выбирают из условий прочности его в сыром состоянии, но не менее 0,025...0,035 МПа и газопроницаемости не менее 100. Остеклованный сrostок набивной массы из часоп-ярского песка имел в среднем кажущуюся пористость 12 %, огнеупорность 1600 °С и механическую прочность 11,2 МПа. На некоторых заводах в состав кремнеземистой массы вводят жидкое стекло.

Хорошие результаты показывает упрочнение кремнеземистой футеровки на жидком стекле путем продувки ее углекислым газом. Прочность массы на сжатие в результате продувки CO_2 возрастает от 0,02...0,035 до 1,2...1,6 МПа, прочность на разрыв после продувки 0,2...0,35 МПа. Такая прочность футеровки обеспечивает отсутствие обвалов при транспортировании и кантовании ковша. CO_2 способствует химическому связыванию влаги жидкостекляной смеси. Это предотвращает растрескивание футеровки при ее тепловой сушке и уменьшает вероятность поглощения металлом водорода из футеровки при разливе первой после ремонта ковша плавки, так как термическая диссоциация химически связанной влаги затруднена.

Для футеровки чайниковых ковшей применяют цирконовые, магнезитовые, высокоглиноземистые и реже кремнеземистые массы. Смеси на основе циркона содержат цирконовый порошок определенной крупности зерен, огнеупорную глину и жидкое стекло. На английских заводах в качестве связующего цирконовых смесей применяют фосфорную кислоту. На сталелитейном заводе в США применяют набивную футеровку чайниковых 4-тонных ковшей, стойкую при температуре до 1760 °С, из 80 % цирконового порошка крупностью зерна 0,15 мм; 15,6 % цирконового порошка с крупностью зерна 0,12 мм; 3,1 % огнеупорной глины; 1,3 % жидкого стекла при влажности 3,3–3,5 %.

На другом заводе США для футеровки ковшей емкостью 5,5...7,5 т применяют смесь из 1,5 % огнеупорной глины; 2,5 % силиката натрия и цирконового порошка. Магнезитовая смесь состоит из спеченного магнезита, хромитовой руды и лома магнезито-хромитовых изделий. Связующими служат жидкое стекло или серноокислый магний. На одном из зарубежных заводов для набивной футеровки ковшей применяют доломито-слодяную массу из стабилизированного доломита. Глиноземистые монолитные огнеупоры применяются следующих составов: смесь шамотного боя с глиной, смесь на основе глинозема с фосфорной кислотой, смесь графита с огнеупорной глиной, смеси на основе муллита, высокоглиноземистая набивная футеровка, содержащая 80 % Al_2O_3 и 18 % SiO_2 с незначительной усадкой, высокими прочностью, плотностью и термостойкостью.

На одном из заводов США футеровку трех- и шеститонных ковшей чайникового типа выполняют из литого высокоглиноземистого огнеупорного бетона, уплотняемого с помощью вибратора. Бетон готовят из корунда фракции до 4,7 мм, содержащего 96,5 % Al_2O_3 ; 2,7 % CaO ; 0,25 % SiO_2 и 0,12 % щелочи; п.п.п. 0,15 %. После сухого смешивания в корунд добавляют 10 % воды. При добавлении воды менее 9 % литейные и вибрационные свойства массы ухудшаются, а при содержании ее более 10 % материал становится слишком жидким и время схлывания увеличивается.

На другом американском заводе для футеровки сталеразливочных ковшей применяют самоспекающиеся массы на основе карборунда, магнетита, кварцевого песка и цирконового песка, в состав которых вводят самоспекающуюся огнеупорная смесь из кристаллического кремния чистой 95 % с крупностью частиц не более 0,07 мм и Na_2SiO_4 . Самоспекание достигается местным разогревом набивки газовой горелкой. После спекания масса на основе кварцевого песка имеет плотность 1,73 г/м³ и прочность 11,5 МПа, на основе карборунда — 1,7...1,9 г/м³ и 8,4 МПа соответственно, а на основе магнетита — 2,2 г/м³ и 19,7 МПа. Состав смесей, применяемых на некоторых заводах, приведен в табл. 156

156. Примеры составов огнеупорных масс для монолитной футеровки сталеразливочных ковшей

Тип ковша	Состав смеси	Стоимость кирпичной футеровки, плавков	Стоимость монолитной футеровки, плавков
Стопорный ковш емкостью 2...3 т	Джондигинский или киндигинский кварцевый песок K_6 , K_2 — 89 %; нижне-увельская или конесская глина — 5 %, жидкое стекло модуля 2,2...3, с удельным весом 1,3...1,4 — 6 % (% об.)	12	40...60
Стопорный ковш емкостью 9 т	Жидкое стекло содовое модуля 2,6...3,0, с удельным весом 1,48...1,52 — 5...7 %, сухая молотая часан-ярская огнеупорная глина марка ЧПГК — 4 %; едкий натр с удельным весом 1,11...1,13 — 2 %, остальное — сухой староверовский кварцевый песок марки K_2 (% об.)	10	40

Описание табл. 156

Тип ковша	Состав смеси	Стоимость кирпичной футеровки, плавков	Стоимость монопластной футеровки, плавков
Чайниковый ковш емко- стью 4 т	Цирконий порошок круп- ностью зерна 0,15 мм — 80 %; цирконий порошок крупностью зерна 0,12 мм — 15,6 %; огнеупорная глина — 3,1 %; жидкое стекло (41° Боме) — 1,3 %	—	50
Чайниковый ковш емко- стью 5,5...7,5 т	Отнеупорная глина — 1,5%; сидикат натрия (152° Боме) — 2,5 %; остальное — тонкоизмельченный цирко- новый порошок, полученный в результате электроста- тического обжигания	—	600
Чайниковый ковш емко- стью 4...4,5 т	Бетонная смесь, выпускае- мая заводом «Магнезит», состоящая из тонкомолото- го, спеченного магнезита, хромитовой руды и лома магнезитохромитовых изде- ний. Связующие 6...7 % жидкого стекла модуля 2,6...2,9, с удельным весом 1,28...1,3 или 4...5 % раство- ра сернокислого магния с удельным весом 1,2...1,22	3...4 (шамот- ный) 25 (хромово- магнезитовый)	37

Массы для набивной футеровки ковшей, как правило, готовят в смешивающих бегунах (кремнеземистые массы 15...25 мин), а для литого высокоглиноземистого бетона — в мельнице. Форму стен ковша получают при помощи шаблона. Набивка стен производится пневматической трамбовкой слоями, причем для лучшего сцепления перед засыпкой следующего слоя предыдущий разрыхляют. Толщину слоя принимают 100...200 мм. Плотность набивки кремнеземистых масс определяют твердомером и она должна составлять не менее 70. После набивки футеровку подвергают тепловой сушке. Выгоревшие и поврежденные участки монокристаллической

футеровки ковшей исправляют в процессе их эксплуатации преимущественно смесью на жидком стекле.

Стойкость кремнеземистой набивной футеровки в стопорных ковшах литейных цехов составляет 30...60 плавков; в чайниковых ковшах — магнетитовой 37 плавков, высокоглиноземистой 120...176, цирконовой 50...600 плавков. Во всех случаях замена кирпичной кладки сталеразливочных ковшей монолитными огнеупорами привела к повышению стойкости футеровки.

Ковшами с монолитными огнеупорами разливают самые разнообразные марки углеродистых и легированных сталей и сплавов. При переходе с кирпичной на монолитную футеровку содержание неметаллических включений в стали на некоторых заводах не изменилось, на других заводах резко снизилось, механические свойства стали и температурные режимы разливки стали не изменились.

При переходе с кирпичной футеровки на монолитную достигается значительная экономия огнеупорного кирпича и снижается трудоемкость ремонта ковшей. Сушка ковшей с монолитной футеровкой обходится дороже сушки ковшей с кирпичной футеровкой, так как продолжительность ее увеличивается.

Общая стоимость кремнеземистой и магнетитовой монолитной футеровки ковшей во всех случаях оказалась ниже стоимости кирпичной. Применение цирконовых и высокоглиноземистых материалов оказывается экономичным только при значительном повышении стойкости футеровки. Некоторые данные по стойкости кирпичной и монолитной футеровки сталеразливочных ковшей приведены в табл. 157.

157. Стойкость кирпичной и монолитной футеровки сталеразливочных ковшей*

Тип ковша	Емкость ковша, т	Средняя стойкость кирпичной футеровки, плавков	Средняя стойкость монолитной футеровки, плавков	Материал монолитной футеровки
Стопорный	25	13	31	Кварцевый песок
То же	55	10	16	Кварцевый песок
« »	30...80	10...19	12,5...29	Кремнеземистая масса

Описание табл. 157

Тип ковша	Емкость ковша, т	Средняя стойкость кирпичной футеровки, плавков	Средняя стойкость монолитной футеровки, плавков	Материал монолитной футеровки
Стопорный	80	9,4	17	Молотая огнеупорная глина
То же	2...3	12	40...60	Кремнеземистая масса
» »	80	13	21...25	Кремнеземистая масса
» »	100	—	36	Кремнеземистая масса
» »	9	10	40	Кремнеземистая масса
Чайниковый	3,5	—	46	Высококремнеземистая масса
То же	3,5	—	120	Высококремнеземистая масса
» »	3,6	—	160...176	Листая высококремнеземистая масса
» »	4	3...4 шмотной, 25 хромоникелевой	37	Малезитовая масса
» »	4	—	50	Цирконовая масса
» »	5,5...7,5	—	600	Тонкозернистый циркон

* Данные получены на 14 заводах.

Исследована возможность применения для футеровки сталеразливочных ковшей массы, разработанной для футеровки сталеплавильных печей, и, при положительных результатах, возможность ее внедрения. Целесообразность такого решения диктуется упрощением организации производства в сталелитейных цехах. Комплекс свойств, которыми должна обладать огнеупорная масса для футеровки стен сталеплавильных печей (огнеупорность, газопроницаемость, прочность на сжатие в сыром состоянии, пластичность, долговечность, прочность при высоких температурах), также необходим и для массы, применяемой для футеровки сталеразливочных ковшей.

По аналогии с ковшевым шамотным кирпичом можно было бы выбрать для набивки стен ковшей смесь на основе шамотного порошка, однако кислая смесь представляется более целесообразной из тех соображений, что она более огнеупорна. Из опыта работы ряда заводов известно, что стойкость набивной футеровки ковшей тем больше, чем выше ее огнеупорность. Целесообразность изготовления футеровки ковшей из кислой смеси подтверждается и тем, что в ряде случаев замена шамотного мертеля кислым привела к повышению стойкости кирпичной футеровки ковшей. Так, например, по данным В.Ф. Исупова замена раствора из 65 % шамотного порошка и 35 % огнеупорной глины раствором из 85 % кварцевого песка и 15 % огнеупорной глины повысила стойкость футеровки ковшей на 30 %.

Г.Г. Аристов сообщает, что мертель с содержанием 85,6 % SiO_2 , 9,0 % Al_2O_3 , 1,8 % Fe_2O_3 и 2,3 % CaO , изготовленный совместным помолотом динасового лома и нижне-увельской глины, при разливке стали из стопорных ковшей изнашивался значительно медленнее, чем шамотный. Следует также учесть, что проведенные на заводах опытные работы по применению набивной футеровки 25-тонных ковшей на основе шамотного порошка не дали положительных результатов. Кислая смесь, содержащая глину, не только более огнеупорна, чем шамотная, но и более термостойка, так как зерна песка при температуре разливки стали растут, а глина дает усадку — это уменьшает склонность смеси к образованию трещин. Совершенно ясно, что огнеупорность разработанной нами массы, превышающая 1730 °С, вполне достаточна для набивной футеровки ковшей.

Положительным фактором для набивной футеровки сталеразливочных ковшей является высокая газопроницаемость смеси, что особенно важно при сушке футеровки, сопровождаемой выделением значительного количества газов и водяных паров.

Рассмотрение вопросов прочности в различных интервалах температур кремнеземистых масс, содержащих жидкое стекло, позволяет заключить, что в сталеразливочных ковшах набивная футеровка будет

обладать высокой прочностью как после набивки, так и в процессе сушки и разлива стали.

Высокие технологические свойства смеси (прочность в сыром состоянии, пластичность и долговечность) также важны для футеровки ковшей, как и для футеровки печей.

Наличие в составе смеси для футеровки ковшей клеящей добавки (в данном случае, жидкого стекла) обеспечивает возможность систематически направлять выгоревшие и поврежденные места футеровки в процессе эксплуатации.

Представляется целесообразным футеровку ковшей из смеси указанного выше состава после набивки продувать углекислым газом.

Во-первых, из практики литейного производства известно, что чем больше влажность формовочной смеси тем больше растрескивание форм при тепловой сушке. Поэтому одной из эффективных мер борьбы против растрескивания форм, часто применяемой в литейном производстве, является максимально возможное снижение влажности смеси.

Влияние влажности смеси на растрескивание форм при сушке, по-видимому, вызвано тем, что при нагреве формы выше 100 °С давление паров воды, находящейся в смеси в химически несвязанном виде, быстро достигает величины, превышающей прочность формы. При продувке жидкостекольной смеси углекислотой вся содержащаяся в ней влага химически связывается, а поскольку термическая диссоциация химически связанной влаги затруднена, процесс удаления водяных паров идет медленно, и форма не разрушается.

Таким образом, химическое твердение футеровки способствует уменьшению ее растрескивания при последующей тепловой сушке.

Во-вторых, в связи с тем, что влажность и газопроницаемость жидкостекольных смесей в различных замесах могут колебаться, а также и по другим причинам, в производственных условиях могут быть случаи, когда при тепловой обработке футеровки влага будет удалена из нее не полностью. При нагреве такой футеровки жидким металлом оставшаяся в ней влага, если она химически не связана, быстро переходит в паробразное состояние. Выделяющийся при разложении водяных паров водород поступает в жидкий металл и в условиях литейного цеха может привести к образованию ситовидной пористости в отливках, а в условиях сталеплавильного цеха — к рослости слитков и флокенам. Одна из мер борьбы с этим явлением — химическое твердение футеровки углекислым газом, так как термическая диссоциация химически связанной влаги, как уже сказано выше, затруднена.

В-третьих, прочность футеровки должна быть достаточно высокой, чтобы не произошло ее разрушение при транспортировке ковша от места ремонта к месту тепловой сушки. Особенно важна прочность фу-

теровки при сушке ковша в горизонтальном положении, так как в этом случае целостность футеровки должна сохраниться и при кантовке ковша. При продувке CO_2 образцов из смеси указанного выше состава их прочность на сжатие возрастает в 10...40 раз.

Продолжительность продувки углекислым газом жидкостекольной смеси, подвергающейся затем тепловой обработке, должна быть минимальной. Это объясняется тем, что высокая прочность жидкостекольной смеси после тепловой обработки достигается, как уже сказано выше, за счет стекловидной пленки силиката натрия. При продувке смеси углекислым газом уже в первый момент вся влага оказывается иммобилизованной и связанной (образовался гель кремниевой кислоты), при этом лишь часть силиката натрия разложена. При длительной продувке разлагается большая часть силиката натрия, и при дальнейшей тепловой обработке стекловидной пленки силиката натрия образуется недостаточно для значительного упрочнения смеси.

Опробование и внедрение разработанной нами кремнеземистой массы для набивной футеровки сталеразливочных ковшей производилось в сталелитейном цехе в 7...9-тонных стопорных ковшах.

Футеровку стен ковшей выполняют следующим образом: у кожуха слой асбеста, затем ряд лещадки и набивка толщиной 70...100 мм в верхней части ковша и 100...140 мм в нижней. Дно футеруют кирпичом. Эскиз футеровки 9-тонного ковша показан на рис. 153.

Набивку стен ковшей производят специальной пневматической трамбовкой с удлиненным штоком по шаблону.

Для предупреждения прилипания футеровки к шаблону и ее разрушения при извлечении шаблона его поверхность перед набивкой натирают графитом. Вначале выкладывают лещадкой слой футеровки стен у кожуха (впоследствии этот облицовочный слой ремонтируют или заменяют лишь в случае местных повреждений). Затем футеруют в два слоя кирпича дно ковша, на которое устанавливают нижнюю часть шаблона и центрируют его деревянными плашками. Набивку стен производят слоями толщиной 150...200 мм, причем для лучшего сцепления слоев верх каждого слоя перед засыпкой следующего разрыхляют. После набивки стен по нижнему шаблону устанавливают верхнюю часть шаблона и заканчивают набивку. Переход от стен к дну округляют дополнительной набивкой вручную.

После набивки футеровку ковша продувают углекислым газом в течение 3 мин. Твердость футеровки, замеренная непосредственно в ковше, сразу после продувки составляла 65, через 10 ч около 90 и затем при хранении ковша в течение 48 ч она не изменилась (рис. 154).

В практике случаев обвалов футеровки, продутой CO_2 при транспортировке и кантовке ковшей не было.

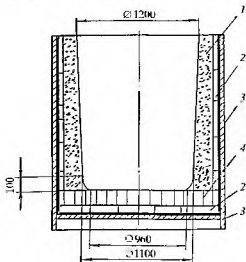


Рис. 153. Футеровка ковша:

1 — набивка; 2 — лещадка; 3 — всест; 4 — шамотный кирпич на ребро

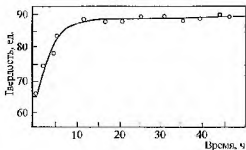


Рис. 154. Зависимость твердости набивной футеровки 9-тонного сталеразливочного ковша после продувки ее углекислым газом от времени хранения

После продувки углекислым газом футеровку нагревают газовой горелкой в течение 6 ч (первые 30 мин небольшим пламенем) и затем готовят к приему металла.

Сравнение стойкости кирпичной и набивной футеровки ковшей из смеси указанного выше состава производили, измеряя толщину стен в нижней и средней зонах 7-тонного ковша после разливки 15, 20, 25, 30 и 35 плавов и учета количества плавок, разлитых за межремонтный период (между сменами рабочего слоя футеровки).

Результаты замеров толщины футеровки показали, что наибольшему разгару подвержены стены как кирпичных, так и набивных ковшей в нижней зоне, что, по-видимому, вызвано более длительным контактом нижней зоны стен с циркулирующим в ковше жидким металлом. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований Г.Г. Аристова и М.П. Назарова.

После разливки 15 плавок толщина набивки внизу в среднем уменьшалась на 27 мм, кирпича (в ковше с кирпичной футеровкой) — на 20 мм, а после разливки 20 плавок в набивном ковше — на 45 мм, в кирпичном — на 38,5 мм.

Помимо замеров толщины футеровки, в кирпичных ковшах после разливки 15 и 20 плавок измеряли глубину разъедания швов между кирпичами. Результаты замеров показали, что швы между кирпичами разъедались после разливки 15 плавок в среднем на 40 мм, после разливки 20 плавок — в среднем на 55 мм, а в отдельных местах до 70 мм (что и служило основной причиной постановки на ремонт ковшей с кирпичной футеровкой).

Таким образом, износ рабочего слоя футеровки нижней зоны стен ковшей в среднем за 1 плавку составил: ковшевого шамотного кирпича — 1,35...1,8 мм, набивки — 1,8...2,2 мм, швов между кирпичами 2,75...4,25 мм.

Для сравнения количества плавок, разлитых за период между сменами рабочего слоя футеровки, были взяты под наблюдение 7-тонные ковши с кирпичной и набивной футеровкой. Средняя стойкость ковшей в обоих случаях вначале оказалась равной 23 плавкам. Однако при этом выявилось, что главной причиной постановки на ремонт ковшей с набивной футеровкой было разрушение кирпичного дна при удалении настывшей, образующихся на дне ковша в процессе разливки стали. Поэтому с целью повышения стойкости футеровки ковшей была изменена футеровка дна: два ряда на плашку нормального шамотного кирпича внизу и ковшевого кирпича сверху были заменены одним рядом на плашку лещадки внизу и одним рядом на ребро шамотного кирпича. Это позволило значительно уменьшить поверхность прилегания кирпича к настывам на дне ковша, затруднить срыв кирпича при

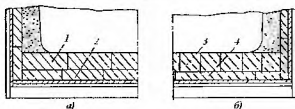


Рис. 155. Стены старой (а) и новой (б) футеровки дна ковшей с набивными стенками

1 — шамотный кирпич на плавку; 2 — шамотный кирпич на плавку;
3 — шамотный кирпич на ребро, 4 — лещадка

извлечении настелей, а следовательно, повысить стойкость футеровки дна ковшей (рис. 155).

Кроме того, была введена подбивка выгоревших мест футеровки стен жидкостекольной смесью после разливки 18...20 плавок.

Эти мероприятия позволили довести стойкость набивной футеровки 7-тонных ковшей в среднем до 34 плавок.

Установлено, что чем больше толщина набивного слоя стен (при равной общей толщине стен), тем выше стойкость футеровки ковшей. Так, например, при опробовании набивной футеровки 9-тонных ковшей стены вначале выполняли шамотным кирпичом и набивным слоем 65 мм вверху и 115 мм внизу. Стойкость набивной футеровки при этом составила 15...20 плавок (кирпичной — 10 плавок). Затем кирпич был заменен лещадкой, и за счет этого набивной слой расширен до 90 мм вверху и 140 мм внизу. Это позволило увеличить стойкость футеровки 9-тонных ковшей до 40 плавок.

После разливки первой же плавки на поверхности набивной футеровки ковша, прилегающей к жидкому металлу, образовывался твердый ошлакованный (остеклованный) слой толщиной 5...10 мм, который по мере эксплуатации ковша не утолщался.

При охлаждении ковша после разливки в ошлакованном слое образовывались небольшие трещины. Как показали замеры, глубина трещин не выходила за пределы ошлакованного слоя.

Все эти трещины во время разливки следующей плавки полностью заваривались и поэтому никакой опасности для целостности футеровки не представляли.

Таким образом, термостойкость набивной футеровки полностью обеспечивала надежную ее работу.

Уход за набивной футеровкой ковшей осуществляли следующим образом. После разливки плавки остатки шлака сливали в шлаковню и сразу же после этого тщательно очищали ковш от настывшей плавки. В случае зарастания верха стен и сливного носка ковша шлаком очистку его производили после некоторого охлаждения ковша, перед подготовкой его к разливке следующей плавки. Поврежденные при этом места футеровки исправляли жидкостекольной смесью. Эта операция не представляла никаких затруднений. Исправленные участки футеровки после разливки очередной плавки прочно сваривались с остальной футеровкой.

При осмотре ковшей обращают особое внимание на толщину набивного слоя футеровки внизу в районе столора. При уменьшении ее в нижней зоне ковша на 50 % (после разливки, примерно, 18...20 плавков) стены подбивают до прежних размеров по всей высоте ковша. При повторном уменьшении толщины набивного слоя на 50 % (после разливки 35...45 плавков) полностью заменяют набивной слой и при необходимости верхний ряд дна (обычно стойкость дна 70...80 плавков). Разрешается замена гнездового кирпича в процессе эксплуатации ковша.

При ремонте ковша с кирпичной футеровкой наиболее трудоемкой операцией является ломка футеровки, т.е. отделение внутреннего слоя шамотного кирпича от наружного. Ломка футеровки ковша с кирпичной футеровкой производится с большим трудом.

В ковше с набивной футеровкой стен внутренний и наружный слои (набивной слой и лещадка) выполнены из различных материалов, не сваривающихся между собой, поэтому набивная футеровка значительно легче поддавалась ломке.

Ручная кирпичная кладка стен ковша по сравнению с набивкой пневматической трамболкой (с просушкой CO_2) требует значительно больших трудозатрат.

Таким образом, трудоемкость ремонтов ковшей с набивной футеровкой стен кремнеземистой массой ниже трудоемкости ремонтов ковшей с кирпичной шамотной футеровкой.

Набивная футеровка стен ковшей после службы имела, как правило, следующие зоны:

- а) тонкая ошлакованная зона (0,5...1,0 мм) черного цвета, находящаяся в непосредственном контакте с металлом и шлаком;
- б) остеклованная зона зеленоватого цвета (3...10 мм);
- в) темная переходная зона (~5 мм);
- г) значительно развитая белая зона (25...30 мм), образующаяся уже после разливки 3...4 плавков;
- д) неизменная зона.

Сравнение качества стали, разлитой ковшами с кирпичной и набивной футеровкой, проводили по механическим свойствам стали и влиянию футеровки на брак отливок по ситовидной пористости.

Сравнение механических свойств стали, разлитой ковшами с кирпичной и набивной футеровкой, производили следующим образом. Известно, что в условиях постоянного метода раскисления стали и постоянного режима термообработки литья наиболее сильным фактором, влияющим на механические свойства углеродистой стали, является содержание углерода.

Поэтому были собраны данные химического состава и механических свойств 31 плавки стали, разлитой ковшом с набивной футеровкой. В этих плавках среднее содержание углерода составило 0,32 %, среднее значение предела текучести — 302 МПа, а относительного удлинения — 22,3 %. В стали, разлитой ковшами с кирпичной футеровкой, при содержании углерода 0,32 %, по данным 400 плавков среднее значение предела текучести составило 298 МПа, а относительного удлинения — 21,8 %. Таким образом, замена кирпичной футеровки ковша на набивную не повлияла на механические свойства стали.

Поскольку газотворная способность жидкостекольной смеси во много раз больше, чем шамотного кирпича, набивная футеровка ковша при определенных условиях может служить источником дополнительного насыщения металла газами и, как следствие, в отливках может образоваться ситовидная пористость. Как уже сказано выше, в производственных условиях могут быть случаи, когда при тепловой обработке футеровки влага будет удалена из нее не полностью. Выделяющийся при разложении водяных паров водород поступает в металл. Кроме того, как известно, при высоких температурах из кремнеземистых масс, содержащих жидкое стекло, выделяется CO_2 . Образовавшийся при его разложении кислород, по-видимому, окисляет углерод металла и также способствует увеличению суммарного давления газов в жидком металле. Эти факторы, очевидно, могут сказаться только на отливках первой плавки после ремонта ковша.

Действительно, в первый период опробования ковшей с набивной футеровкой на заводе был случай, когда отливки первой плавки после ремонта ковша оказались пораженными ситовидной пористостью.

Для исключения возможности поражения отливок ситовидной пористостью по вине футеровки ковша, помимо продувки футеровки углекислым газом, было проведено раскисление стали первой плавки после ремонта ковша увеличенным количеством алюминия — 2 кг/т стали.

Для практической проверки эффективности принятых мер была взята под наблюдение механическая обработка отливок 21 плавки, разлитой в разное время первой после набивки стен 9-тонного ковша. Фу-

теровку ковша во всех случаях сразу же после набивки сушили углекислым газом в течение 3 мин, затем нагревали газовой горелкой в течение 6 ч и металл первой плавки раскисляли вторичным алюминием в количестве 2 кг/т. Ни в одной из деталей опытных плавок ситовидной пористости не было обнаружено.

Поскольку существует мнение о том, что повышенная присадка алюминия понижает механические свойства литой углеродистой стали, в частности, ударную вязкость, были проверены механические свойства 5 плавов сталей 25Л-35Л, раскисленных алюминием в количестве 2 кг/т. Все плавки имели механические свойства, превышающие требования ГОСТ 977-88.

Для сравнения скорости охлаждения металла при разливке ковшем с кирпичной и набивной футеровкой были произведены сравнительные замеры оптическим пирометром температуры металла в момент выпуска и в период разливки через каждые 2 мин. Замеряли температуру 10 плавов, разлитых ковшем с кирпичной футеровкой, и 10 плавов, разлитых ковшем с набивной футеровкой.

Эти замеры показали, что при одинаковой средней температуре выпуска и одинаковой средней толщине шлака в ковше с кирпичной футеровкой в среднем за 18,3 мин температура понизилась на 162 °С, а в ковше с набивной футеровкой за 16,6 мин — на 167,5 °С. Таким образом, средняя скорость охлаждения металла в период его выдержки в ковше с кирпичной футеровкой составила 8,85 °С/мин, а в ковше с набивной футеровкой — 10,1 °С/мин.

Как известно, к моменту начала разливки наиболее охлажденными в ковше оказываются нижние слои металла. Поэтому в первой половине разливки температура разливаемого металла несколько повышается, а затем снижается. Как видно из табл. 158, скорость подъема температуры разливаемого металла в первой половине разливки в набивном ковше несколько больше, чем в кирпичном (1,08 °С/мин против 0,96 °С/мин), а скорость охлаждения его во 2-й половине разливки — значительно ниже (0,95 °С/мин против 1,34 °С/мин). Общая скорость падения температуры металла от выпуска до окончания разливки в кирпичном и набивном ковшах оказалась одинаковой — 2,54 град/мин. Таким образом, разливку стали ковшем с набивной футеровкой следует начинать несколько раньше и разливать можно несколько дольше, чем ковшем с кирпичной футеровкой.

Однако различия в температурном режиме разливки стали ковшем с кирпичной и набивной футеровкой следует считать незначительными. Опыт говорит о том, что влияние толщины шлака в ковше на скорость охлаждения металла и температурный режим разливки значительно больше, чем влияние способа футеровки ковша (шамотный

158. Показатели работы сталеразливочных ковшей с кирпичной и набивной футеровкой

Показатели	Футеровка ковши	
	Кирпичная	Набивная
Износ футеровки за 1 плавку, мм	1,35...1,8; швы между кирпичами 2,75...4,25	1,8...2,2
Скорость охлаждения металла в период выдержки в ковше, °С/мин	8,85	10,1
Скорость подъема температуры металла в первой половине разливки, °С/мин	1,08	0,96
Скорость падения температуры металла во второй половине разливки, °С/мин	0,95	1,34
Общая скорость падения температуры металла от выпуска до окончания разливки, °С/мин	2,54	2,54
Стойкость футеровки, плавки	12	40

кирпич или набивка кремнеземистой массой). Так, одновременно с опробованием набивной футеровки на заводе заменили 7-тонные сталеразливочные ковши 9-тонными, масса плавки при этом не изменилась, но толщина шлака в ковше увеличилась с 40...120 мм до 130...200 мм, так как раньше при выпуске плавки шлак из ковша частично сливали. Такое увеличение толщины шлака в ковше, несмотря на замену кирпичной футеровки стен набивной, привело к значительному снижению скорости охлаждения металла в ковше (табл. 159) и позволило понизить температуру начала разливки (что диктовалось технологическими условиями) с 1435...1445 °С до 1400...1420 °С по оптическому пирометру без поправки.

Из кривой, приведенной на рис. 152, видно, что если 7-тонным ковшом с кирпичной футеровкой и толщиной шлака 40...120 мм 100 % плавки разливали с температурой 1435 °С и выше по оптическому пирометру, то 9-тонным ковшом с набивной футеровкой и толщиной шлака 130...200 мм даже в зимнее время 90 % плавки разливают с температурой ниже 1435 °С, причем 74 % плавки — с температурой ≤ 1420 °С.

159. Изменение температуры металла в ковшах с кирпичной и набивкой футеровкой при различной толщине шлака

Характеристика ковшей	Число исследованных плавок	Средняя температура выпуска (по оптическому пирометру), °С	Среднее время выдержки, мин	Средняя температура начала разливки (по оптическому пирометру), °С	Среднее падение температуры от выпуска до начала разливки, °С	Средняя скорость падения температуры металла за время выдержки, °С/мин	Средняя толщина шлака, мм	Максимальная температура разливки, °С	Температура окончательной разливки, °С
Кирпичный емкостью 7 т	10	1595,5	18,3	1433,5	162	8,85	84	1445	1429
Набивкой емкостью 7 т	10	1597	16,6	1429,5	167,6	10,1	87	1442,5	1429,5
Набивкой емкостью 9 т	10	1589,4	25,5	1422,5	166,9	6,55	138	1446	1428

Проведенные исследования позволили внедрить в производство в сталелитейном цехе набивную футеровку 9-тонных сталеразливочных ковшей. В год экономится более 300 т шамотного кирпича.

Набивная футеровка смесью указанного выше состава применена для сталеразливочных стопорных ковшей на ряде заводов.

Применение огнеупорных масс и бетонов в футеровке сталеразливочных ковшей обеспечивает сокращение трудовых и энергетических затрат, создает возможность механизации изготовления футеровок, а также высвобождения производственных мощностей для изготовления штучных огнеупоров и площадей для их хранения.

Анализ 90 сообщений о монолитных футеровках сталеразливочных ковшей показал, что при широком их внедрении на металлургических заводах сформировалось 2 направления: футеровка массами, приготовляемыми на месте, преимущественно на основе природных кремнеземистых материалов, и футеровка массами, поставляемыми огнеупорными заводами.

Средняя стойкость футеровки из масс, приготовляемых на месте, составляет в среднем 13,1 налива, а из масс, поставляемых огнеупорными заводами, 13,4 налива, т.е. стойкость практически не различается. Поэтому нерационально готовить огнеупорные массы на огнеупорных заводах и транспортировать их на металлургические заводы. Исходя из этого опыта, развитие процесса футеровки сталеразливочных ковшей в сталелитейных цехах машиностроительных заводов следует вести в направлении приготовления огнеупорных масс непосредственно на местах.

Глава 9

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Наблюдаемый с конца прошлого века рост концентрации в атмосфере парниковых газов, в первую очередь диоксида углерода, сопровождается повышением приземной температуры воздуха. С 1860 по 1992 гг. отмечено наличие среднегодового потепления в пределах 0,3...0,6 °С [150].

Изменения в климате, объясняемые «парниковым эффектом», связывают с увеличением выбросов CO_2 и некоторых других газов в атмосферу, вызванным производственной деятельностью человека и незапланированной природой. В настоящее время происходит необычное повышение концентрации CO_2 и метана в атмосфере. Доля парниковых эффектов для разных газов оценивается следующим образом: диоксида углерода — 61 %, метан — 23 %, оксиды азота — 4 % [150].

Важнейшим этапом реакции мирового сообщества на угрозу глобального потепления явилось подписание 160 странами в 1992 г. Конвенции ООН по изменению климата.

В декабре 1997 г. в Киото (Япония) состоялась 10-дневная международная конференция стран-участниц Конвенции. Представители 159 стран договорились о параметрах сокращения эмиссии парниковых газов и приняли соответствующие обязательства (Киотский протокол). В период с 2008 по 2012 гг. объем выбросов парниковых газов должен уменьшиться по сравнению с 1990 г. на 5,2 % (мировые выбросы CO_2 в 1990 г. составили 22,3 млрд т, в том числе в черной металлургии — 1,6 млрд т). Доля России в общем выбросе парниковых газов — 7 %. Россия по эмиссии CO_2 в расчете на душу населения занимает второе место в мире после США [151]. Если высокий уровень эмиссии CO_2 в США объясняется высоким уровнем промышленного производства, то в России это связано с использованием на предприятиях устаревших и «грязных» технологий. После ратификации Киотского протокола многими странами он вступил в действие 16 февраля 2005 г.

В 1995 г. в Вене была принята общемировая программа действий по защите озонового слоя («озоновой дыры»).

Помимо указанных выше, основными загрязнителями атмосферы являются взвеси (пыль и аэрозоли), монооксид углерода (СО), диоксид серы (SO₂), оксиды азота. Существенный вред окружающей среде наносят выбросы в водоемы, а также шум.

В России еще в 1922 г. впервые в мире были установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) в воздухе рабочей зоны для вредных химических веществ.

Следует учесть, что российские нормативы на ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны предъявляют в ряде случаев более жесткие требования, чем зарубежные нормы.

В России действует ГОСТ 17.2.3.02—78 «Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями», обязывающий строго соблюдать допустимые уровни выбросов, загрязняющих атмосферу, водный бассейн, другие компоненты окружающей среды. Действуют также ГОСТ 12.1.005—88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» и ГОСТ 12.1.007—76 «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

Наиболее распространенные загрязнители — зола и пыль различного состава, оксиды цветных и черных металлов, различные соединения серы, азота, фтора, хлора, радиоактивные газы, аэрозоли и т.п. Наибольшее загрязнение атмосферного воздуха приходится на долю оксидов углерода — около 200 млн т в год, пыли — около 250 млн т в год, золы — около 120 млн т в год, углеводородов — около 50 млн т в год. Прогрессирует насыщение биосферы тяжелыми металлами — ртутью, гелием, германием, цинком, свинцом и т.д. При этом следует отметить, что при сжигании топлива, особенно угля, с золой и отходящими газами в окружающую среду поступает больше, чем добывается их из недр: магния — в 1,5 раза, молибдена — в 3, мышьяка — в 7, урана и титана — в 10, алюминия, йода, кобальта — в 15, ртути — в 50, лития, ванадия, стронция, бериллия, циркония — в сотни раз, гелия и германия — в тысячи раз, иттрия — в десятки тысяч раз [149]. Процентное соотношение вредных выбросов странами приведено на рис. 156.

К загрязнению окружающей среды приводят также шум, вибрация и воздействия электромагнитных полей. Шум оказывает вредное влияние на организм человека, вызывает ухудшение слуха, гипертонию и головные боли. В России действует ГОСТ 12.1.003—83 «Шум. Общие требования безопасности», который устанавливает нормы на эквивалентный уровень звука для различных условий, в том числе для производственных помещений — 80 дБА. Шум от дуговых сталеплавильных печей достигает 120 дБА, а в отдельных случаях — до 140 дБА. Высокая

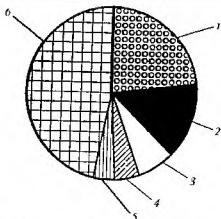


Рис. 156. Процентное соотношение вредных выбросов, произведенных странами в 1995 г. [149]:

1 — США 23 %; 2 — Китай 13,9 %; 3 — Россия 7,2 %; 4 — Япония 5 %; 5 — Германия 3,8 %; 6 — все остальные 47,1 %

напряженность магнитных полей, как уже отмечено выше, вызывает раковые заболевания, расстройства нервной системы и др.

В России выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух достигли 40...43 млн т в год, в том числе предприятиями энергетики — 27,7 % общих выбросов промышленностью России, цветной металлургии — 20,4 %, черной металлургии — 15,1 % (рис. 157). Основными источниками загрязнения окружающей среды на машиностроительных предприятиях являются литейное производство, гальванические цехи, цехи механической обработки, сварочные и покрасочные [149]. На машиностроительных предприятиях образуются твердые отходы (черные и цветные металлы, шлак, окалина, зола, отработанная формовочная смесь, абразивы, отходы древесины и пластмасс).

Среди сталеплавильных агрегатов наименьшее количество выбросов в атмосферу дают дуговые сталеплавильные печи (табл. 160)

В дуговых печах угар металла — до 8 %, в кислородных конвертерах — до 15 %. Выбрасываемая пыль состоит на 80...90 % из Fe_2O_3 , придающего дыму бурый цвет. Более высокое содержание CO в отходящих газах дуговой печи обусловлено окислением графитированных элек-

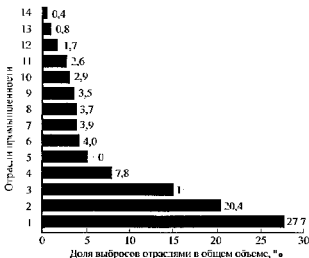


Рис. 157. Распределение отраслей промышленности по производимым ими выбросам загрязняющих веществ в атмосферный воздух [149]:

1 — электроэнергетика, 2 — цветная металлургия, 3 — черная металлургия, 4 — нефтедобыча, 5 — нефтепереработка, 6 — машиностроение; 7 — газовая промышленность; 8 — промстройматериалы, 9 — угольная промышленность, 10 — деревообработка; 11 — химическая промышленность, 12 — пищевая промышленность; 13 — оборонная промышленность; 14 — легкая промышленность.

тродов, однако значительная часть CO устраняется при дожигании в процессе газоочистки. На уровне дымовой трубы содержание пыли в отходящих газах от дуговых печей после газоочистки, как правило, не превышает 100 мг/м^3 . Дуговые сталеплавильные печи загрязняют водный бассейн сточными водами, почву шлаками и шламами, а также оказывают шумовое воздействие и тепловое излучение; индукционные печи — электромагнитное излучение.

Тепловыделения от дуговых печей с увеличением их вместимости возрастают, а удельные тепловыделения уменьшаются (табл. 161).

В воздушной среде литейных цехов, кроме пыли и оксидов углерода, выделяются сернистый газ, оксиды азота, водород, аэрозоли (насыщенные оксидами железа и марганца), пары углеводородов и др. Источни-

160. Загрязнение атмосферы сталеплавильными печами [154]

Агрегат	Объем выделяемых газов, м ³ /ч	Запылен- ность газов, г/м ³	Удельное выделение пыли, кг/т	Удельное выделение СО, кг/т
Кислородный конвертер	400 · 10 ³	25	32	0,8
Дуговая сталеплавильная печь	200 · 10 ³	23	20	1,3
Мартеновская печь	300 · 10 ³	175	30	0,5

161. Тепловыделения от дуговых сталеплавильных печей [154]

Вместимость печи, т	Тепловыделение на одну печь, Мкал/т	Удельное тепловыделе- ние, Мкал/ч · т
10	720	72
20	850	42,5
30	950	32
45	1050	23,5
65	1150	17,7

ками загрязнения являются плавильные агрегаты, печи термобработки, сушила для ковшей и другое оборудование. При производстве 1 т отливок из стали выделяется 50 кг пыли, 250 кг оксида углерода, 1,5...2 кг оксида серы и 1кг углеводородов. В пылевых выбросах литейных цехов содержится до 50 % диоксида кремния мелкой дисперсности (более 90 % частиц пыли имеют размеры менее 2 мкм) [155].

Работа дуговых сталеплавильных печей связана с выбросами дыма и пыли, выделяющихся в плавильном пространстве печи в процессе плавления шихты, окислительного и восстановительного периодов плавки. Кроме того, тепловыми потоками уносятся из печи, открытой сверху для заправки и завалки шихты, частицы заправочных материалов, шихты, продуктов горения масел и красок шихты. Пылегазовыде-

ление происходит также во время выпуска металла из печи. Концентрация пыли, ее дисперсный и химический составы зависят от вместимости и мощности печи, удельного расхода кислорода, периода плавки и марки стали.

Обычно при выплавке стали в дуговых печах вместимостью 5...10 т (масса садки 7...11,5 т) количество отходящих газов составляет 700...1100 м³/ч, запыленность газов 22...23 г/м³.

По данным одного из отечественных заводов, выбросы из дуговой 6-тонной кислой печи при выплавке углеродистых сталей 25Л и 35Л с использованием в шихте кремнийсодержащих отходов имели состав, приведенный ниже (табл. 162).

162. Состав выбросов из кислой дуговой сталеплавильной печи

Составляющие выбросов	Пыль	СО	SO ₂	Оксиды азота	Mn	Оксид железа
Содержание в период, мг/м ³						
плавления	260	—	—	9,6	—	21,4
нагрева металла	130	64	2,8	17,5	0,12	18,5
раскиснения	95	78,5	—	14,5	—	—

В табл. 163 приведены результаты анализа пыли, выбрасываемой из кислых и основной дуговых печей [150].

163. Анализ пыли из дуговых сталеплавильных печей

Оксиды и элементы	Содержание элементов, % мас., в образцах из электродуговых печей		
	кислой, 3 т	кислой, 6 т	основной, 6 т
SiO ₂	25,34	27,10	0,10
ZnO	12,70	13,00	7,40
Fe ₂ O ₃	54,70	56,50	44,00
CaO	0,71	0,50	14,90
Pb	0,563	0,334	1,432

Описание табл. 163

Оксиды и элементы	Содержание элементов, % мас., в образцах из электродуговых печей		
	кислой, 3 т	кислой, 6 т	основной, 6 т
Cd	0,004	0,004	0,014
Cr	0,085	0,091	0,144
Mn	9,120	4,63	4,34

Особо следует остановиться на проблеме выбросов из дуговых сталеплавильных печей диоксинов и фуранов [156]. Диоксины – это полихлориниловые вещества, относящиеся к ароматическим соединениям, бесцветные, плохо растворимые в органических растворителях и очень плохо – в воде. Фураны отличаются от диоксинов отсутствием одного атома кислорода в химической структуре соединения.

Диоксины отрицательно воздействуют на иммунную систему человека, нарушают функционирование печени, вызывают атрофию селезенки, снижают на рост числа выкидышей и рожденных уродств у потомства, вызывают онкологические заболевания, приводят к потере веса. У людей, подвергнутых действию диоксинов (в результате аварий), проявлялись различные психические отклонения и кожные заболевания. Эффект воздействия диоксинов резко усиливается в присутствии других биологически активных веществ. Особенно опасно суммарное воздействие диоксинов и фуранов, которое оценивается «токсичным эквивалентом» в $\text{нг}/\text{м}^3$. Дуговые печи выбрасывают $0,01...1,3 \text{ нг}/\text{м}^3$ «токсичного эквивалента». Причем максимальные цифры относятся к дуговым печам, выплавляющим углеродистую сталь и работающим с подогревом лома, особенно к шахтным дуговым печам.

Печи, работающие без подогрева лома, выбрасывают меньше «токсичного эквивалента». Практически не выбрасывают диоксинов/фуранов печи, выплавляющие легированную сталь. Выбросы диоксинов/фуранов определяются типом печи, наличием горелок, систем дожигания технологических газов и подогрева лома, качеством лома и грамотностью обслуживания всего оборудования дуговых печей [156].

При высокой температуре ($> 1200 \text{ }^\circ\text{C}$) диоксины полностью разлагаются. Однако при охлаждении технологических газов диоксины вновь образуются в результате реакции «новосинтеза» органических компонентов и хлорида в газах при $200...600 \text{ }^\circ\text{C}$. В интервале температуры $250...400 \text{ }^\circ\text{C}$ «новосинтез» диоксинов достигает максимума.

В целях охраны окружающей среды нужен комплекс мер, одной из которых является применение малоотходных технологий, т.е. таких технологий, воздействие которых на окружающую среду не превышает ПДК. Яркий пример малоотходной технологии — это применение в дуговых сталеплавильных печах в качестве шихты продуктов прямого восстановления железа — металлизированных окатышей.

При этом исключаются коксохимическое производство, сопровождаемое безвозвратными потерями коксовой пыли, доменная плавка чугуна с высоким выходом газов и шлаков (0,4...0,65 т на 1 т чугуна), а также конвертерное получение стали при значительном выделении пыли (до 32 кг на 1 т стали) и газов (до $400 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$). В производстве металлизированных окатышей используются более дешевые восстановители, чем кокс, применяемый в доменной технологии. Перспективным является создание мини-заводов с участками прямого восстановления железа, брикетированием продуктов прямого восстановления железа в непосредственной близости к дуговым или индукционным сталеплавильным печам, тем более, что Россия имеет большие запасы природного газа и железных руд. Расчеты показывают, что суммарная величина выбросов CO_2 на 1 т жидкой стали при технологической схеме доменной печи — конвертер составляет 1712 кг, тогда как при технологической схеме установка прямого восстановления железа — дуговая сталеплавильная печь — 1090 кг.

Большое значение с точки зрения сокращения выбросов CO_2 , уменьшения угара легирующих элементов имеет замена мартеновских печей электропечами.

Важнейшим направлением уменьшения выбросов из дуговых сталеплавильных печей является замена дуговых печей переменного тока на печи постоянного тока. Наличие только одного электрода, более стабильная дуга способствуют значительному уменьшению выделения газов и пыли из печи. В связи с уменьшением расхода электродов значительно сокращается содержание CO в отходящих газах. Небольшие кратковременные выделения пыли и газа в печах постоянного тока имеются только в начале плавки, не требуют специальной системы газоотвода и удаляются цеховой вентиляцией [154]. Печи постоянного тока имеют значительно меньший уровень шума (до 90 дБА), чем печи переменного тока (до 120...140 дБА). Как отмечено выше, основными мерами борьбы с высоким излучением (высокой напряженностью) магнитного поля индукционных печей являются преимущественное применение канальных печей и печей средней частоты, применение в конструкции печей экранирующих магнитопроводов, периодическое проведение замеров напряженности магнитного поля на рабочей площадке, четкие инструкции сталеварам по технике безопасности.

Необходимо принимать комплекс мер по защите работающих от повышенного шума. Обслуживающему персоналу дуговых сталеплавильных печей нужно выдавать индивидуальные средства защиты — наушники или вкладыши. Следует оборудовать, создающее повышенный шум (например, насосы водяного охлаждения индукционных печей), выделять при планировке цехов в отдельное помещение. Также необходимо предусматривать облицовку потолка и стен звукопоглощающими материалами и другие мероприятия. Целесообразно, по возможности, устанавливать технологическое оборудование, издающее шум, в отдельных камерах (известно, например, конструктивное решение дуговых сталеплавильных печей в так называемых «домиках»).

Особое внимание необходимо уделять совершенствованию установок обеспыливания отходящих газов от дуговых сталеплавильных печей. Так, например, фирма Daniełi модернизировала систему обеспыливания отходящих газов в целях снижения выбросов в атмосферу пыли, CO , SO_x , NO_x . Для этого установили новую систему первичного пылеудаления, расширили систему вытяжных зонтов, установили новый фильтр в параллель существующему. Установка комплектуется более крупной камерой дожигания, способной полностью выдерживать пылевую нагрузку, создаваемую отходящими газами. В модернизированной системе обеспечено полное сжигание оксида углерода. Установлен более крупный вытяжной зонт [157].

Фирмой Dantherm Filtration GmbH (Германия) создано оборудование (кассетный фильтр) для сухой очистки промышленных газов на литейных и металлургических предприятиях, в том числе для дуговых и индукционных сталеплавильных печей [158]. Загрязненный воздух через камеру неочищенного воздуха попадает в карманы тканевого фильтра, проходит через них и попадает в камеру очищенного воздуха. Пыль оседает на фильтровальной ткани. Через фиксированные промежутки времени происходит процесс очистки фильтров, пыль отделяется от карманов фильтра, попадает в пылесборник и удаляется механизмами выгрузки. Установка работает автономно. Содержание пыли и отходящих газов на входе в газоочистное оборудование составляет от дуговых печей $1000\text{--}2000 \text{ мг/м}^3$, от индукционных печей $500\text{--}1000 \text{ мг/м}^3$. Остаточное содержание пыли в очищенном газе $4\text{--}10 \text{ мг/м}^3$. Скорость фильтрации газов от дуговых печей — $1,0 \text{ м/мин}$, от индукционных печей — $1,0\text{--}1,4 \text{ м/мин}$.

Очень важно, особенно при переплаве в дуговых сталеплавильных печах однокованных листовых отходов, удалить из пыли отходящих газов оксиды металлов — железа, цинка, свинца, а также никеля, молибдена, хрома, образующихся в зоне электрических дуг. С этой целью

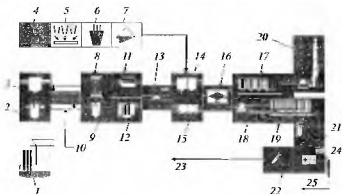


Рис. 158. Газоочистка производства фирмы Siemens VAI (Германия):

1—шахтная дуговая сталеплавильная печь; 2—камера доосаждения пыли; 3—камера осаждения пыли; 4—молотка газоотсоса; 5—система рециркуляции; 6—печь-ковш; 7—удаление шлака; 8—принудительный воздушный охладитель; 9—водяной оросительный охладитель; 10—воздухоохлаждающая часть газоотвода; 11, 12—искроуловители; 13—промежуточный негаскатор; 14—смешительная камера; 15—смешительная камера; 16—адсорбенты; 17—импульсно-воздушный фильтр; 18—вентилятор; 19—воздушный фильтр; 20—отсасывающий вентилятор и дымовая труба; 21—бункер пыли; 22—омывыватель; 23—повторное использование пыли; 24—сепаратор шлака; 25—возврат шлака

создана плазменно-дуговая технология переработки пыли от выплавки стали в дуговых печах [159].

Серьезной проблемой, как отмечено выше, является удаление из отходящих газов токсичных диоксинов и фуранов, образующихся, прежде всего, при подогреве стального лома. Обычные системы газоочистки удаляют до 60 % диоксинов. Во Франции принят закон, обязывающий устанавливать за дуговыми печами газоочистные сооружения, снижающие выбросы диоксинов из каждой печи до < 1 г/год. Содержание диоксинов в отходящих газах достигает максимума при температуре 250...400 °С, поэтому необходимо быстрое охлаждение технологических газов до температуры ниже 200 °С [156].

Фирма Siemens VAI разработала несколько технологий удаления диоксинов и фуранов из технологических газов в нескольких зонах дуговой печи.

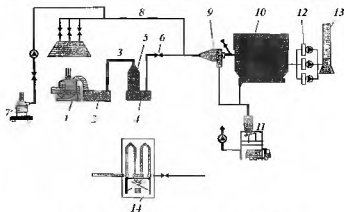


Рис. 159. Газоочистка производства фирмы Danieli

1 — дуговая сталеплавильная печь; 2 — камера доожигания; 3 — первичный контур; 4 — охлаждающая башня; 5 — распыление воды; 6 — регулирующий клапан; 7 — ковш-печь; 8 — вторичный контур; 9 — осевой циклон; 10 — фильтр; 11 — система транспортировки пыли; 12 — основные вентиляторы; 13 — система отвода дымогазов

В частности, концентрация диоксинов может быть уменьшена до $0,04...0,06 \text{ нгТЭ/м}^3$ путем инъекции адсорбентов.

Индикатором эффективности сжигания органических соединений может служить содержание монооксида углерода в отходящих газах, которое по законодательству об охране окружающей среды должно быть минимальным. Если концентрация монооксида углерода в отходящих газах меньше 50 мг/м^3 , то можно с уверенностью утверждать, что летучие органические соединения, диоксины и другие органические реагенты сгорели [156].

При поставке дуговых сталеплавильных печей необходимо предусматривать одновременную поставку системы газоочистки. Системы отвода и очистки отходящих газов должны быть неотъемлемой частью состава оборудования сталелитейных и сталеплавильных цехов. Их нужно предусматривать при строительстве новых цехов, реконструкции и техническом перевооружении действующих. На рис. 158 и 159 показаны схемы газоочисток производства фирм Siemens VAI (Германия) и Danieli, поставляемых вместе с дуговыми сталеплавильными печами.

Глава 10

ДУГОВЫЕ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В последние годы все большее распространение получают дуговые сталеплавильные печи постоянного тока.

Источники питания для печей постоянного тока имеют следующее оборудование [115]:

- силовой трансформатор;
- тиристорные выпрямители;
- сглаживающие реакторы;
- устройства защиты от перенапряжений;
- теплообменники системы водяного охлаждения.

Особенностью электрического режима плавки стали в печи постоянного тока является то, что в начале плавки работа происходит на длинную дугу, для чего требуется «высокое» напряжение выпрямителя. Основная же плавка ведется на короткой дуге при «малом» напряжении и большом токе.

Основной конструктивной особенностью печей постоянного тока является наличие одного вертикально расположенного сводового электрода, который закреплен в головке электрододержателя и через отверстие в центре свода введен в плавильное пространство печи, а также наличие одного или двух подовых электродов.

Другие особенности печей постоянного тока — это стабильность горения электрической дуги и эффективное электромагнитное перемешивание ванны металла полем проходящего через нее постоянного тока.

В схему питания печей постоянного тока, разработанную НТФ «ЭКТА», включен трансформатор с несколькими трехфазными вторичными обмотками, каждая из которых подключена к секции тиристорного преобразователя. Через реакторы секции тиристорного преобразователя подключены к подовым электродам. Печь оснащена не только переключателем ступеней напряжения, но и системой переключения секций тиристорного преобразователя.

При использовании этого источника питания начало плавления ведется с четырьмя последовательно включенными секциями тиристор-

ного преобразователя на пониженной силе тока и высоком напряжении, при включенном одном подовом электроде печи

В этот период плавка ведется на длинной дуге, и анодное пятно дуги располагается на кусках металлической шихты. Основные цели:

- не допускается перегрев расплава, так как капли расплавленного металла стекают на подину печи;
- плавка ведется на стабилизированной мощности практически без колебаний электрического режима.

Во второй период плавки, когда происходит расплавление основной массы шихты, выполняется параллельно-последовательная коммутация секций тиристорного преобразователя: по две секции соединяются параллельно и между собой — последовательно. При этом ток дуги удваивается, а напряжение в два раза снижается, т.е. сохраняется мощность первого периода плавки. Для осуществления перемешивания накопленного в первый период расплава подключается второй подовый электрод. Анодное пятно дуги располагается на расплаве, накопленном при проведении первого периода, внутри воронки, проплавленной в шихте.

Во избежание локального перегрева металла под анодным пятном дуги включают систему перемешивания расплава, которое организовано следующим образом. При установленных в печи двух подовых электродах, смещенных относительно центра печи, вектор тока внутри расплава имеет горизонтальную (радиальную) и вертикальную составляющие. Взаимодействие вертикальной и радиальной составляющих тока с его магнитным полем формирует поток расплава, при котором металл с большой скоростью «набегает» под анодное пятно дуги и «уходит» в глубь расплава. По подобному типу формируется и горизонтальное перемешивание расплава. Такое перемешивание улучшает передачу энергии дуги в расплав и уменьшает эрозию футеровки печи, так как вблизи нее скорость перемешивания металла минимальна.

Однако с течением времени характер перемешивания металла изменяется: в расплаве появляются вихревые потоки и движение основной массы металла прекращается. Для предотвращения этого явления и управления скоростью и направлением потоков металла регулятором тока тиристорного преобразователя периодически проводится кратковременное снижение силы тока дуги, при котором вихревые потоки разрушаются и восстанавливается регулярное перемешивание расплава.

По расплавлению основной массы шихты начинается третий период плавки; при этом все секции тиристорного преобразователя включают параллельно.

В третьем периоде по сравнению со вторым силу тока увеличивают в два раза и в четыре раза по сравнению с первым периодом плавки, а напряжение источника питания пропорционально увеличению силы

тока снижается, т.е. вся плавка ведется при постоянной мощности. Увеличение силы тока приводит к росту интенсивности перемешивания расплава. В отличие от первого и второго периодов, в которых основная доля энергии дуг излучалась на шихту, в третьем периоде энергия дуги (до 80...90 %) передается непосредственно в хорошо перемешиваемый расплав [160].

Печи постоянного тока в процессе плавки, нагрева и выдержки расплава используют только дуговой нагрев, и их ближайшим прототипом являются дуговые сталеплавильные печи переменного тока, широко применяемые с начала прошлого столетия. В печах постоянного тока используются те же огнеупорные материалы, механические части печей переменного тока, системы загрузки и слива металла. Печи постоянного тока обладают всеми технологическими возможностями печей переменного тока — ведения расплавления и нагрева расплава до температуры 1720 °С, проведения активных технологических процессов.

В то же время недостатки дуговых печей переменного тока — высокий утар металла, графитированные электроды, интенсивный шум и пылегазовыбросы, чокальный перегрев металла под дугой, науглероживание расплава графитированными электродами, слабое перемешивание расплава без применения кислородных или других методов продувки расплава газами, ограниченные возможности магнитно-гидродинамического перемешивания расплава, низкая производительность и высокий расход электроэнергии без применения газокислородных горелок для нагрева шихты, вспенивания шлака и кислородной продувки металла, ударно-переменная нагрузка на систему электроснабжения — в достаточной мере ликвидированы в печах постоянного тока.

В печах постоянного тока используются новые электрические режимы расплавления шихты, нагрева расплава, новый тип перемешивания расплава, который осуществляется на всех этапах плавки.

Серьезным фактором безопасности печей постоянного тока является конструкция подового электрода, которая может быть связана с ужасом жидкого металла в подину печи (подовый электрод обеспечивает подвод тока от источника питания к металлу). С этой точки зрения нами изучены различные конструкции подовых электродов. В настоящее время в Европе существуют такие варианты конструкций подовых электродов, как магнетито-графитовые электропроводные электроды, имеющие электрический контакт с металлом; воздухо- и водоохлаждаемые стальные электроды (множество стальных штырей, пластин или большие стальные цилиндры); так называемые ребристые аноды (рис. 160), состоящие из большого количества вертикально приваренных к горизонтальному дну штырей печи и расположенных в виде ячейки пчелиных сот тонких стальных плиточек (ребер), пространство между которыми заполняется и уплотняется монолитной магнетитовой массой, днище не охлаждается.

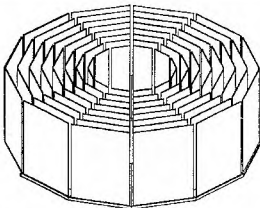


Рис. 160. Анал ребристого тина (подовый электрод) печи постоянного тока конструкции фирмы Siemens VAI (Германия)

Однако, по имеющейся информации, все эти варианты не получили широкого распространения из-за имеющихся случаев аварийного ухода металла в подину. На ряде фирм по этой причине охладели к печам постоянного тока, несмотря на ряд их преимуществ. В последние годы в России применяется совершенно новая конструкция подовых электродов (НТФ «ЭКТА» и «НИИМТ-РИНОЛИ», ранее «МТФ»). Подовый электрод состоит из базы, представляющей собой стальную трубу, заполненную медью. К наружной стенке трубы приварены стальные листы, проходящие через подину и являющиеся сменной частью электрода. Водяное охлаждение электрода расположено вне кожуха печи. Подовый электрод снабжен датчиками для контроля температуры. При замене футеровки отработанные листы подового электрода обрезают и приваривают новые. С помощью управляемого компьютерной программой преобразователя система подачи тока в печь обеспечивает такие вычурные потоки металла, которые не размывают подовый электрод.

В России на ряде предприятий от 2 до 15 лет безаварийно работают печи постоянного тока с описанной конструкцией подового электрода (рис. 161). Надежная конструкция подового электрода послужила решающим фактором распространения в России (в основном, в литейных цехах) печей постоянного тока.

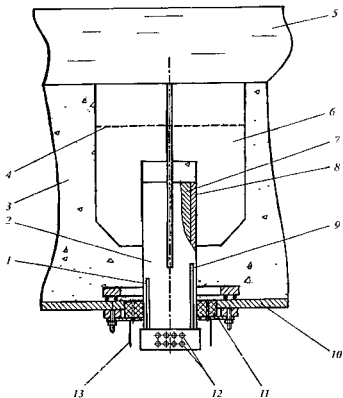


Рис. 161. Схема подового электрода печи постоянного тока конструкции фирмы «Экта»:

1, 9 — датчики температуры, 2 — подовый электрод; 3 — подина; 4 — линия резки листов при замене подины. 5 — расплав. 6 — стальные листы; 7 — медь; 8 — сталь. 10 — днище печи. 11 — изолятор, 12 — каналы водоохлаждения, 13 — прибор для контроля изоляции

Фирма Danieli разработала конструкцию подового электрода стержневого типа, состоящего из четырех элементов, три из которых вмонтированы в футеровку печи [161]. Электрод состоит из стальной части; водосхлаждаемой, соединяющей стальную и медную части; нижней трубчатой части и футерованной. Футерованная часть расположена в нижней части головки медного анода и содержит спиралеобразные каналы для воды. Внешняя поверхность покрыта керамическим материалом для предотвращения прорыва металла в электрод. Стальная и медная части соединены методом алюмотермической сварки. Подовые электроды этой конструкции успешно эксплуатируются на печах постоянного тока производства фирмы Danieli вместимостью 70...135 т. На этих печах расстояние от воды до жидкой стали составляет 100–180 мм.

Анализ работы дуговых печей постоянного тока, внедренных в последние годы, показал следующее [162].

Важнейшим результатом внедрения дуговых печей постоянного тока является значительное улучшение условий труда работающих за счет уменьшения уровня шума с 95...120 дБА от печей переменного тока до 80...95 дБА от печей постоянного тока (дБА — эквивалентный уровень звуковой мощности).

Здесь следует пояснить понятие эквивалентного уровня звуковой мощности.

Важнейшим показателем безопасности дуговых сталеплавильных печей является уровень шума (эквивалентный уровень звуковой мощности). Показатели уровня шума установлены ГОСТ 27409–97 «Шум. Нормирование шумовых характеристик стационарного оборудования. Основные положения». В соответствии с этим стандартом основной показатель уровня шума оборудования — уровень звуковой мощности, являющийся его собственной шумовой характеристикой (дБ), не зависящей от расстояния от оборудования и окружающих его условий, или скорректированный уровень звуковой мощности, учитывающий частотную коррекцию А шумомера (дБА). В то же время для определения уровня шума на рабочих местах или в других характерных точках используют показатели уровня звукового давления (дБ) — уровень шума в характерных точках вблизи оборудования или уровень звука (дБА), учитывающий частотную коррекцию А шумомера.

В соответствии с ГОСТ 12.1.003–83 «Шум. Общие требования безопасности» шум подразделяют на постоянный, уровень звука которого за 8-часовой рабочий день изменяется не более чем на 5 дБА, и непостоянный, уровень звука которого за 8-часовой рабочий день изменяется более чем на 5 дБА. Постоянный шум оценивают уровнем звука в дБА, а непостоянный — эквивалентным (по энергии) уровнем

звука в дБА, который представляет собой уровень звука постоянного шума, имеющего то же самое среднее квадратичное звуковое давление в течение определенного интервала времени. Дуговые сталеплавильные печи имеют непостоянный уровень шума и поэтому характеризуются эквивалентным уровнем звука в дБА, который согласно ГОСТ 12.1.003—83 на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий должен быть не более 80 дБА. Следует отметить, что согласно европейским нормам этот показатель может достигать 85 дБА.

Дуговые печи постоянного тока с точки зрения уровня шума имеют неоспоримое преимущество перед печами переменного тока в связи с наличием одного электрода вместо трех и более стабильной дугой. По нашим замерам среднее значение уровня шума на пяти печах постоянного тока составляло 83 дБА, а на четырех печах переменного тока — 111 дБА. Это свидетельствует о том, что внедрение печей постоянного тока является крупным шагом в направлении улучшения условий труда сталеваров.

Все предприятия России, внедрившие дуговые печи постоянного тока, отмечают уменьшение расхода электроэнергии до 23 %, уменьшение расхода электродов в 2,5...3 раза, уменьшение пылегазовыбросов до 10 раз, уменьшение угара металла до 5 раз, повышение производительности печей, большую стабильность горения дуги, улучшение качества выплавляемых сплавов, лучшее перемешивание металла (скорость движения металла 0,15...0,35 м/с в зависимости от силы тока), снижение трудоемкости работы сталеваров, снижение себестоимости сплавов и отливок, повышение стойкости футеровки. В дуговых печах постоянного тока освоена выплавка широкого сортамента сталей, чугунов и других сплавов. Эти выводы подтверждают ряд авторов.

Рассмотрим некоторые примеры результатов внедрения дуговых печей постоянного тока, изготовленных НТФ «ЭКТА».

На ОАО «Металлургический завод «Электросталь» (г. Электросталь Московской области) в 6-тонной дуговой печи постоянного тока освоена технология выплавки всего текущего сортамента сталей: конструкционных, инструментальных, быстрорежущих, коррозионно-стойких, жаростойких, жаропрочных, жаропрочных сплавов на никелевой основе — всего более 100 марок сталей и сплавов [163]. Отработаны электрические режимы плавки, отработаны все традиционные технологические схемы выплавки стали, в том числе с продувкой расплава газообразным кислородом. На заводе «Электросталь» отмечают следующие достоинства печи постоянного тока:

— печь не требует «бюлета», что облегчает переход от одной марочной группы сплавов к другой, часто без необходимости промывочных плавов;

- значительное снижение уровня шума;
- значительное уменьшение пылегазовыделений;
- обеспечение за счет электромагнитного перемешивания равномерного химического состава и температуры металла по всему объему ванны, начиная с момента расплавления; усвоение тугоплавких легирующих элементов менее чем за 10 минут;
- тенденция к ускорению процесса окисления углерода (особенно для металла с низким начальным углеродом);
- снижение утара хрома и металлической шихты в целом;
- повышение усвоения ванадия (с 82,1 % до 91,4 %) и вольфрама (с 88,5 % до 90,0 %).

На Рязанском ОАО «Тяжпрессмаш» с 2004 г. успешно эксплуатируется печь постоянного тока емкостью 20 т (реконструкция печи переменного тока емкостью 20 т). Плавки проводятся на обычной шихте (стружка механических цехов, покупной стальной лом, легированная высечка от штамповки). Качество металла (стабильность химсостава, механические свойства, макро- и микроструктура) по сравнению с печами переменного тока значительно улучшилось, брак по газовым раковинам снизился в 2 раза. Значительно улучшились условия экологии [164]. Полностью отсутствуют скачки напряжений при эксплуатации печи. В конструкцию печи введено мощное магнитодинамическое перемешивание. Сравнение показателей работы 20-тонной дуговой печи переменного и постоянного тока на заводе «Тяжпрессмаш» показано в табл. 164.

164. Сравнение показателей работы 20-тонной дуговой печи переменного и постоянного тока на заводе «Тяжпрессмаш»

Наименование показателей	Тип печи	
	ДСВ-20 (переменный ток)	ДППТУ-20 (постоянный ток)
Пыль, мг/м ³	27,2	9,9
Шум, дБА	98	84
Расход электроэнергии, кВт ч/т жидкой стали	880	740
Производительность по жидкому металлу, т/ч	4,54	7,16
Средняя длительность плавки, ч	4,92	3,5

Описание табл. 164

Наименование показателей	Тип печи	
	ДСВ-20 (переменный ток)	ДППТУ-20 (постоянный ток)
Угар металла общий, %	•	•
Расход электродов, кг/т жидкой стали	14,6	2,12
Расход FeSi, кг/т жидкой стали	13,8	11,2
Расход FeMn, кг/т жидкой стали	6,3	5,1
Расход FeCr, кг/т инструментальной жидкой стали	14,6	12,0
Расход FeV, кг/т инструментальной жидкой стали	2,4	1,1
Расход FeMo, кг/т инструментальной жидкой стали	2,1	2,1
Расход извести, кг/т жидкой стали	60	35
Расход шамота, кг/т жидкой стали	12,1	2,7
Расход восстановительной смеси (известь, FeSi 45, кокс), кг/т инструментальной жидкой стали	78,22	46,18
Выпуск стали в год, т	12 000	20 600
Расход перелитого чугуна, кг/т жидкой стали	110	7,5
Расход стального лома, кг/т жидкой стали	939	1041

Расход воды увеличился на 10 м³/ч.

Авторы работы [165] сравнили расход материалов в 20-тонных печах переменного и постоянного тока на заводе «Тяжпрессмаш» (г. Рязань) для углеродистых и легированных сталей (табл. 165).

При переводе печи ДСВ-20 на заводе «Тяжпрессмаш» на постоянный ток были сохранены все основные элементы механической части печи, заменены источники электропитания (в том числе трансформатор мощностью 8,5 МВ·А заменен на трансформатор мощностью

10,5 МВ А). Улучшились цеховая экономика и культура производства — уменьшились запыленность, шум, поломки электродов.

Авторы [166] сравнили технико-экономические показатели работы дуговых сталеплавильных печей переменного и постоянного тока вместимостью 25 и 150 тонн. Результаты этого сравнения приведены в табл. 166.

165. Удельный расход технологических материалов

Удельный расход, кг/т	Углеродистая сталь		Легированная сталь		Сталь 5ХНМ	
	ДСП	ДППТУ	ДСП	ДППТУ	ДСП	ДППТУ
Руда	11,0/45,0/ 15,9	1,0/9,0/ 5,9	—	—	—	—
Известь	22,0/65,0/ 50,0	1,5/37,0/ 14,5	19,0/78,0/ 48,0	9,0/53,0/ 21,0	15,0/78,0/ 48,0	10,0/39,0/ 20,0
Шамот	3,0/15,0/ 9,0	1,0/4,0/ 2,9	1,0/27,0/ 9,6	1,0/19,0/ 5,6	5,0/24,0/ 12,0	1,0/16,0/ 4,4
Ферросилиций	13,0/28,6/ 15,8	9,6/12,9/ 11,0	12,8/57,3/ 22,3	2,5/44,1/ 16,0	12,8/21,4/ 16,0	7,5/13,7/ 11,0
Ферромарганец	4,4/11,3/ 6,6	3,5/6,6/ 5,2	4,2/9,5/ 6,2	2,5/7,6/ 5,0	4,4/11,3/ 6,6	3,5/6,6/ 5,2

Примечание. тп/тах/среднее.

Опыт эксплуатации дуговых сталеплавильных печей постоянного тока разработки НТФ «ЭКТА» позволяет сделать следующие выводы.

1. За счет перемешивания расплава достигаются:

- большая эффективная площадь взаимодействия системы шлак — расплав;
- гомогенность температуры и химического состава расплава;
- быстрое растворение и высокое усвоение легирующих элементов;
- интенсивная скорость ведения технологических процессов;
- удаление неметаллических включений, дегазация расплава;
- минимальный удельный расход электроэнергии, сокращение утара шихты.

2. Печи постоянного тока конструкции НТФ «ЭКТА» несут в себе следующие инновационные решения:

- специальный источник питания постоянного тока;

166. Техничко-экономические показатели работы дуговых печей трехфазного и постоянного тока

Показатель	ДСП-25		ДСП-150		ДСППТ-150		
	1	2	3	4	5	6	7
Число электродов, шт.	3	1	3	1	2	3	4
Емкость печи, т	25	25	150	150	150	150	150
Мощность трансформатора, МВ·А	16	16	90	90	90	90	90
Мощность дуг суммарная, МВт	12	12	75	75	37,5	25	18,75
Сила тока дуги, кА	23	40	55	90	90	89	87
Напряжение на дуге, В	175	300	455	835	418	278	209
Диаметр электрода, мм	400	400	600	600	600	600	600
Высота слоя шлака, мм	40	40	500	500	500	500	500
Длина дуги, мм	170	320	520	1000	500	330	250
Заглубление дуги в металл, мм	70	0	165	0	0	0	0
Угол наклона столба дуги к оси электрода, °	28	0	45	0	0	0	0

КПД дуги:							
на высшей ступени	0,63	0,56	0,69	0,74	0,88	0,9	0,91
средний за цикл плавки	0,90	0,79	0,7	0,75	0,905	0,915	0,92
при горении на зеркало металла (без шлака)	0,57	0,54	0,45	0,435	0,462	0,474	0,475
Удельный расход электроэнергии (без применения ТКГ и подогрева шихты), кВт · ч/т	420	470	545	510	435	425	420
Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/т:							
в шахтных печах	—	—	320	300	225	215	210
в шахтных печах с использованием в заважку 25 % жидкого чугуна	—	—	250	230	145	140	135
Удельный расход электродов, кг/т	3,45	1,5	1,6	1,4	1,3	1,2	1
Производительность печи:							
т/ч	7,5	7,5	114	114	150	180	200
тыс.т/год	65	65	1000	1000	1315	1580	1750

- обеспечение постоянной подводимой мощности во все периоды плавки;
- конструктивно надежные половые электроды,
- подавление пылегазовыбросов из печи;
- автоматическая система управления источником питания, позволяющая минимизировать угар шихты (до 0,5...1,5 %);
- специальные автоматические режимы ведения плавки, обеспечивающие максимальную скорость ведения металлургических процессов, однородность температуры и химического состава расплава шлака и металла;
- управляемое магнитогидродинамическое перемешивание расплава;
- автоматизированный контроль параметров работы всех составных частей механического и электрического оборудования печи;
- быстрдействие всех исполнительных механизмов.

Глава 11

МИНИ-ЗАВОДЫ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ

Мини-завод — это единая и компактная технологическая линия металлургических агрегатов, выстроенных в одну цепочку, звенья которой максимально приближены и синхронизированы друг с другом посредством локальных и интегральных АСУТП [167]. Основным признаком современного мини-завода является минимальная продолжительность сквозного технологического цикла от шихты до готового проката — менее 3 ч. Кроме того, на мини-заводе должны быть обеспечены минимум затрат энергии и трудозатрат, минимальное загрязнение окружающей среды, компьютеризация и роботизация — все это за счет применения современных технологий.

В состав мини-завода электрометаллургии могут входить следующие комплекты технологического оборудования: прямого восстановления железа (или подготовки шихты); дуговых сталеплавильных печей; обеспыливания (газоочистки) металлургических агрегатов; вакуумирования, кислородного обезуглероживания и вакуумной дегазации; печей-ковшей; машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ); нагревательных печей; прокатных станков [168].

Наличие в составе мини-заводов электрометаллургии установок прямого восстановления железа открывает перспективу применения в качестве плавильных агрегатов не только дуговых, но и индукционных печей, так как в случае использования в качестве шихты металлизированных окатышей обеспечиваются плотная укладка шихты в печи и получение стали требуемого химического состава.

В составе мини-заводов в качестве плавильных агрегатов могут применяться различные типы дуговых сталеплавильных печей: печи переменного и постоянного тока, шахтные печи переменного и постоянного тока.

Обязательным является наличие установок пылегазоочистки.

На мини-заводах используют криволинейные или вертикальные МНЛЗ для отливки слябов и заготовок различного назначения.

Так как в производственных условиях практически невозможно обеспечить синхронную бесперебойную работу МНЛЗ и прокатного

стана (могут быть случаи, когда прокатный стан остановлен на ремонт, а МНЛЗ продолжает работать), в проекте мини-завода должны быть предусмотрены места складирования заготовок и нагревательная печь для их нагрева под прокатку

В составе мини-завода могут быть прокатные станы: крупносортовые, среднесортные, мелкосортные и проволочные, полосовые, рельсоболачные и балочные, профилегибочные [168].

Могут быть мини-заводы, включающие в себя часть перечисленного выше оборудования, например: дуговая печь, установка вакуумирования, печь-ковш, МНЛЗ, т.е. без прокатного стана. Могут быть и другие варианты состава мини-завода.

Прообразом современных мини-заводов был построенный фирмой Danieł в 1987—1990 гг. в бывшем СССР на заводе им. Фрунзе в г. Сумы (Украина) электросталеплавильный комплекс с подогревом шихты отходящими газами. В этом комплексе реализовались многие решения, используемые в современных мини-заводах. На момент пуска это была самая передовая в мире технологическая линия: дуговая сталеплавильная печь — печь-ковш — вакууматор — МНЛЗ. Этот комплекс работает и в настоящее время.

Одной из основных задач создания мини-заводов являются обеспечение металлопродукцией региона, в котором он расположен, а также использование лома, образующегося в регионе. При этом доставка материалов и готовой продукции производится на небольшие расстояния. Россия имеет большие запасы стального лома.

По мнению многих специалистов, оптимальный объем выпуска продукции на мини-заводе — до 1 млн т, но не менее 300 тыс. т с точки зрения окупаемости инвестиций. Фирма Danieł считает, что верхним пределом годового выпуска продукции на мини-заводе является величина 2 млн т [167].

Мини-заводы обладают следующими преимуществами по сравнению с крупными металлургическими заводами [169]:

- синхронизация процессов плавки, внепечной обработки и непрерывной разливки;
- использование современных технологий;
- минимальная потребность в территории (45 га против 600 га для завода полного цикла);
- меньшая масса оборудования (15,5 тыс. т против 120...160 тыс. т на заводе полного цикла);
- меньшее количество персонала;
- минимальное загрязнение окружающей среды (выбросы пыли — менее 10 мг/м³);
- меньшие потребности в энергоресурсах;

- в 3...4 раза меньше удельные капиталовложения (500...700 долларов США на 1 т готовой продукции против 2500 долларов для завода полного цикла);
- сроки строительства 30 месяцев против строительства и выхода на проектную мощность завода с полным циклом 8...10 лет;
- цикл производства на мини-заводах не более 5 ч, а на крупных металлургических предприятиях 7...10 дней;
- компактность мини-завода;
- меньшие транспортные потоки;
- более быстрая отгрузка продукции,
- упрощенные управляющие функции;
- меньше требуется оборотных средств и меньше срок их оборачиваемости;
- бóльшая выработка на одного работающего.

При создании мини-заводов используются новейшие технологические достижения.

В частности, плавку по технологии «flat bath» с непрерывной загрузкой металлошихты в расплавленный металл по типу процесса Consteel, когда дуга в течение всей плавки стабильно горит на «плоском» зеркале жидкой ванны; тонкослябную непрерывную разливку и технологию Castrip-разливку тонкой полосы на двухшаговом модуле.

Основными создателями мини-заводов являются фирмы Danieff (Италия), Siemens VAI (Германия) и SMS Demag (Германия).

В настоящее время в мире насчитывается более тысячи мини-заводов с объемом производства от 40 тыс. т до 2 млн т в год [169]. На пример, в табл. 167 приведены характеристики некоторых мини-заводов, созданных фирмой Danieff [167].

Завершено строительство мини-завода в Корее с объемом производства 500 тыс. т слитков стали специальных марок. Новый современный сталеплавильный комплекс базируется на наиболее передовых и производительных технологиях. В составе мини-завода следующее основное оборудование:

- шихтовый двор с двумя причалами;
- 70-тонная дуговая печь переменного тока FastArc с трансформатором 60 МВ А, оснащенная высокоимпедансным устройством, токопроводящими рукавами и инъекционными модулями (пять кислородных фурм и две для вдувания углерода);
- 70-тонный ковш-печь с плотно закрывающейся крышкой для снижения подсоса воздуха в ковш и, таким образом, минимизации окисления боковых поверхностей электродов и попадания кислорода в сталь, а также устранения насыщения расплава водородом и азотом в процессе обработки;

167. Мини-заводы фирмы Danielli (по материалам презентации фирмы Danielli Centro Met на семинаре «Мини-заводы нового поколения»)

Завод	Страна	Производительность, т/ч	Масса металла на выпуске из ДСП, т	Диаметр корпуса ДСП, мм	Время плавки (от выпуска до выпуска), мин	Мощность трансформатора, МВ·А
Al EZZ	Египет	126	99	5800	47	85 + 10 %
Sovel	Греция	133	100	6100	45	80 + 20 %
Duferco La Louviere	Бельгия	144	91	6400	38	100 (ДСП постоянного тока)
SN Logos	Португалия	133	120	6500	54	100 + 20 %
Aceralia Rebondos Azpeitia	Испания	176	130...140	6500	52	110 + 12 %
Belgo Minera Piracicaba	Бразилия	156	130	6800	50	102 + 20 %
Thy Marcinelle	Бельгия	180	150	7000	50	120 + 20 %
AlSA	Франция	166	150...180	7000	65	110 + 12 %

- 70-тонный вакууматор с независимой системой измерения температуры и отбора проб, оборудованием для определения содержания водорода и паронинжекционными вакуумными насосами производительностью 250 кг/ч при разряжении 0,5 мм рт. ст.;

- система подачи материалов;

- вспомогательное оборудование и устройства для эффективной работы цеха

Фирма Danieli применяет в мини-заводах установки прямого восстановления железа по процессу «HyL», по которому в 2005 г. в мире произведено 20 % продуктов прямого восстановления железа. Так, например, фирмой Danieli совместно с фирмой HyL создан в г. Абу-Даби (ОАЭ) мини-завод электросталлургии, включающий в себя установку прямого восстановления железа (рис. 162). Мощность этого завода составляет 1,6 млн т в год продукта прямого восстановления железа, 1,4 млн т в год стали, 620 тыс. т в год сортового проката и 480 тыс. т проволоки. На этом мини-заводе 150-тонная печь с разъемным кожухом работает только на горячих металлизированных окатышах в режиме непрерывной загрузки шихты через пятое отверстие. Печь снабжена цифровой системой регулирования электродов.

В настоящее время фирма Danieli создает для фирмы Suet Steel (Египет) новый мини-завод, который будет производить металлизированные окатыши, выплавлять и разливать на МНЛЗ малоуглеродистые и низколегированные стали, получая на выходе блюмы и заготовки, в том числе балочные.



Рис. 162. Мини-завод, созданный фирмами Danieli и HyL (Абу-Даби, ОАЭ)

Установка «EnergiKon» предназначена для производства 1,95 млн т/год высокоуглеродистых металлургических окатышей, которые при температуре свыше 600 °С должны пневмотранспортом подаваться в дуговую сталеплавильную печь. Применение системы пневмотранспорта обеспечивает наивысший выход железа из оксидов при выплавке стали, так как железосодержащая мезочка не теряется, как при перегрузке окатышей из шахтной печи в дуговую.

Для достижения требуемой производительности мини-завода проектируется 160-тонная дуговая сталеплавильная печь переменного тока, отличающаяся высокой гибкостью по составу шихты, основу которой составляют горячие окатыши, лом и холодные окатыши. Печь оснащается многочисленными форсунками, обеспечивающими равномерное распределение C и O₂ в печи. Особое внимание уделяется выбору местоположения печи, исходя из условия оптимизации подачи горячих металлургических окатышей в дуговую печь запатентованной системой пневмотранспорта.

Консорциум во главе с фирмой VAI (в настоящее время Siemens VAI, Австрия) построил и ввел в эксплуатацию мини-завод мощностью 800 тыс. т в год по производству стального листа на комбинате HADEED (Саудовская Аравия) [170].

Новый электросталеплавильный мини-завод HADEED-2 производит широкую гамму горяче- и холоднокатаного листа различного назначения из стали многих марок, включая конструкционную, для глубокой вытяжки, а также листы с гальваническим покрытием.

Основные виды продукции: горячекатаная сталь — рулоны, лист, рулонная полоса и заготовка для сварных труб; холоднокатаная сталь — рулоны стали конструкционной и рядовых марок и стали для глубокой вытяжки, а также рулоны стали с гальваническим покрытием.

Сталь выплавляют в 170-тонной электродуговой печи переменного тока из шихты, состоящей из металлургического железа, полученного на установках Midtex и HuL, и скрпты в соотношении 75 : 25. После внепечной обработки на установке ковш-печь сталь разливают на слэбы сечением 1650 × 2200 мм на МНЛЗ радиального типа с правым кристаллизатором, который имеет систему изгиба и выпрямления непрерывного слитка.

После порезки (максимальная масса заготовки 34 т), отжига, охлаждения слэбы прокатывают на полунепрерывном стане горячей прокатки с реверсивными клетями черновой прокатки и встроенной клетью с вертикальными вальками и рулонной моталкой и на пятиклетевом чистовом стане с одной нижней моталкой.

После охлаждения рулоны горячекатаной стали транспортируют в цех холодной прокатки или на линию продольной и поперечной резки. Часть холоднокатаных рулонов (150 000 т/год) подвергают отжигу и

проходной печи и прокатке на дрессировочном стане, другая часть рулонов (200 000 т/год) поступает в гальванический цех для нанесения антикоррозионного покрытия.

В цехе установлена 170-тонная дуговая печь переменного тока с трансформатором мощностью 120 МВ А со встроенным на высокой стороне реактором; максимальный рабочий ток 75 кА, максимальная ступень вторичного напряжения 1300 В. Печь имеет 4 устройства донной продувки ванны и систему эксцентрикового донного слива, которая позволяет обеспечить бесшлаковый выпуск стали. Компактная система компоновки печи и специально сконструированные узлы позволяют во время ремонтов быстро осуществлять замену печного корпуса целиком или только его верхней части меньше чем за 2 ч.

Печь оборудована роботами-манипуляторами для подачи продувочных фурм в печное пространство (две фурмы для вдувания кислорода, одна — для вдувания угольного порошка в струе кислорода). Фурмы вводят в печь через рабочее окно и через специальное стеновое отверстие справа от рабочего окна и служат при подаче соответствующих материалов для интенсификации расплавления металлизированных окатышей, образования вспененного шлака и эффективного обезуглежирования металла. Они могут работать одновременно для проведения продувки с расходом кислорода до 4500 м³/ч.

Устройством для подачи угольного порошка позволяет осуществлять его инжекцию через две фурмы с общим расходом до 100 кг/мин. Для повышения степени использования металлизированной шихты ее мелкодисперсные фракции отсеивают и вдувают в печь в зону рзвдеча между вспененным шлаком и поверхностью стальной ванны. Расходуемую фурму для вдувания вводят в печь через стеновое отверстие слева от рабочего окна. Технические характеристики печи приведены в табл. 168

Отходящие газы отсасываются в систему пылегазоочистки через свод дуговой печи, через свод конша-печи и через зонт над печью. В эту же систему отсасывают также пыль бункерных эстакад подачи шлакообразующих и ферросплавов в печь и ковш-печь. Газы отсасываются вентиляционной установкой производительностью 1,5 млн м³/ч. Во избежание возгорания печных газов в газоходе и снижения концентрации горючих компонентов газы разбавляют атмосферным воздухом, на выходе газов из печи в систему пылегазоочистки встроен искрогаситель. Очистка газов от пыли происходит в рукавных фильтрах, в очищенном газе содержание пыли не превышает 2 мг/м³.

Ковш-печь питается от трансформатора мощностью 26 МВ А и оборудован устройством для автоматического измерения температуры и отбора проб, а также двумя трайб-аппаратами для подачи порошковой проволоки с наполнителями из алюминия и силикокальция.

168. Технические характеристики электродуговой печи

Показатель	Значение
Емкость по жидкому металлу, т	170
Масса металла, сливаемого из печи, т	150
Масса жидкого остатка, т	20
Диаметр корпуса, м	7,0
Объем печного пространства, м ³	103
Система донного выпуска металла из печи	Эксцентриковая (ЕВТ)
Диаметр электродов, мм	610
Мощность трансформатора, МВ · А	120
Степени вторичного напряжения постоянного мощности, В	960...1300
Максимальный рабочий ток, А	75
Расход (максимальный) кислорода при вдувании фурмой, м ³ /ч:	
расходной	1800
охлаждаемой	2500
Скорость (максимальная) вдувания, кг/мин:	
углерода	2 × 50
извести	400
медных фракций металлизированной шихты	400
Скорость (максимальная) продувки металла инертным газом, л/мин	4 × 60

Сталеразливочный ковш в шлаковой зоне футерован шпинелемагнетитом, в днище ковша установлена пористая пробка для продувки металла аргоном, скорость продувки регулируется в пределах от 80 до 500 л/мин, чтобы обеспечить все стадии процесса рафинирования. Технические характеристики ковша-печи приведены в табл. 169

Одноручьевая МНЛЗ спроектирована на разливку 825 тыс. т стали в год из 150-тонных сталеразливочных ковшей. Прямой кристаллизатор обеспечивает равномерный контакт между корочкой слитка и внутренней поверхностью медного кристаллизатора по всей его длине. В результате происходит однородный и быстрый рост корочки слитка

169. Технические характеристики ковша-печи

Показатель	Значение
Номинальная емкость, т	150
Мощность трансформатора, МВ · А	26
Диаметр электродов, мм	405
Диаметр расплава электродов, мм	700
Число пористых пробок для продувки в днище ковша	1
Расход инертного газа (аргон/азот) для продувки металла, л/мин	80...500
Продолжительность обработки металла в ковше, мин	38
Скорость нагрева металла, °С/мин	5,6
Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/(т · °С)	0,39
Расход электродов, г/(кВт · ч)	8,36

и до минимума сокращается риск обрыва слитка, неметаллические включения всплывают к поверхности, обеспечивая высокое качество металла в теле слитка. Непрерывно-литой вертикальный слиток после выхода из кристаллизатора изгибается по радиусу 8 м, а затем выпрямляется в горизонтальное положение с помощью системы направляющих и правильных роликов, запатентованной фирмой VAI. Металлургическая длина слитка, отлитого из одного ковша, равна 27,2 м. Направляющие и правильные ролики относительно небольшого диаметра плотно прилегают к слитку, что сводит к минимуму выпучивание его поверхности из-за ферростатического давления жидкого металла внутри слитка. На МНЛЗ установлены система регулирования ширины кристаллизатора для отливки слывов длиной до 12 м и система компьютерного контроля качества поверхности. Обе системы защищены патентами фирмы VAI. Технические характеристики МНЛЗ приведены в табл. 170.

Мини-завод снабжен автоматизированной системой управления и системой водоохлаждения.

В России имеются благоприятные условия для создания мини-заводов прежде всего потому, что в России большие ресурсы стального лома.

Первый мини-завод в России был построен в 2000 г. — «Новоросметалл» в Краснодарском крае в составе 25-тонной дуговой сталепла-

170. Технические характеристики МНЛЗ

Показатель	Значение
Тип машины	Радиального типа с прямым кристаллизатором
Число ручьев	1
Радиус изгиба, м	8
Длина кристаллизатора, мм	900
Металлургическая длина слитка, отлитого из одного ковша, м	~27,2
Максимальная скорость разливки, м/мин	1,5
Размеры литого сляба, мм	
толщина	220
ширина	900...1650
Максимальная масса мерной заготовки, т	~34

вильной печи, агрегата ковш-печь и установки непрерывной разливки стали. В 2003 г. был введен «Фроловский электросталеплавильный завод» в Волгоградской области в составе 50-тонной дуговой сталеплавильной печи, агрегата ковш-печь и сортовой установки непрерывной разливки стали. Однако на этих заводах было установлено оборудование, не соответствующее современным требованиям.

В настоящее время построен электросталеплавильный комплекс (линия: дуговая печь — печь-ковш) на Серовском металлургическом заводе и Рединский мини-завод на двух площадках Нижне-Сергинского метизно-металлургического завода. Современное технологическое оборудование для этих комплексов поставила фирма Siemens VAI (Германия).

Создан мини-завод (литейно-прокатный комплекс) в г. Ярцево Смоленской области в составе 30-тонной дуговой сталеплавильной печи, агрегата ковш-печь, двухручьевого сортового МНЛЗ и мелкосортного прокатного стана. Этот комплекс предназначен для снабжения строительного комплекса Москвы сортовым прокатом. Генеральный проектировщик этого завода — ОАО «АХК ВНИИМЕТМАШ имени академика А.И. Целикова».

Глава 12

СЕРТИФИКАЦИЯ ДУГОВЫХ И ИНДУКЦИОННЫХ СТАЛЕПЛАВИТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Одним из показателей работы сталеплавильного оборудования является его безопасность, а одним из инструментов безопасности — сертификация.

Накоплен значительный опыт сертификации сталеплавильного и сталеразливочного оборудования, а также оборудования для внепечной обработки стали [171–174]. В данном случае речь идет о сертификации соответствия этого оборудования требованиям безопасности российских стандартов и правил:

- ГОСТ 12.2.046.0–2004 «Оборудование технологическое для литейного производства. Требования безопасности»;
- ГОСТ 12.2.007.9–93 (МЭК 519-1–84) «Безопасность электротермического оборудования. Часть 1. Общие требования»;
- ГОСТ 12.2.099–84 «Агрегаты для выплавки стали. Общие требования безопасности»;
- ПБ 11-552–03 «Правила безопасности в сталеплавильном производстве»;
- ГОСТ Р 50014.3–92 (МЭК 519-3–88) «Безопасность электротермического оборудования. Часть 3. Частные требования к электротермическим устройствам индукционного и прямого нагрева сопротивлением и индукционным электропечам».

Следует отметить, что во введенном недавно в России ГОСТ 12.2.046.0–2004 содержатся специальные требования безопасности для дуговых и индукционных плавильных печей.

В Российской Федерации указанное оборудование подлежит обязательному подтверждению его соответствия установленным требованиям либо в форме получения сертификата соответствия, либо в форме принятия декларации о соответствии и регистрации ее в органе по сертификации.

Необходимость сертификации оборудования для выплавки и разливки стали вызвана следующим:

- указанное оборудование может характеризоваться по российскому классификатору кодами технологического оборудования для

литейного производства, которое подлежит обязательной сертификации;

- металлургическое оборудование относится к опасным промышленным объектам, подведомственным Ростехнадзору, а для получения разрешения на применение требуется сертификат соответствия;
- при проведении сертификации обязательно решается ряд вопросов повышения безопасности сертифицируемого оборудования;
- наличие сертификата соответствия повышает престиж разработчиков и изготовителей металлургического оборудования.

Следует отметить некоторые особенности, выявленные в результате накопленного опыта.

1. С нашей точки зрения при создании мини-заводов целесообразно включать в их состав установки получения продуктов прямого восстановления железа с тем, чтобы эти продукты применялись в качестве шихты для дуговых и индукционных печей в горячем и брикетированном виде. Применение восстановленного железа в качестве шихты позволяет использовать на мини-заводах не только дуговые, но и индукционные печи, так как при использовании восстановленного железа обеспечиваются плотная укладка шихты и получение требуемого химического состава стали. Проведенный нами анализ показал, что применение продуктов прямого восстановления железа обеспечивает технические и экономические преимущества по сравнению с применением в качестве шихты стального лома.

2. При сертификации дуговых печей для плавки стали нами проведен анализ результатов применения на ряде заводов России дуговых печей постоянного тока, который показал целесообразность использования применяемой в России конструкции подошвых электродов, надежность печей, улучшение качества металла и технико-экономических показателей работы печей. Существенно также значительное снижение уровня шума в сравнении с печами переменного тока.

3. При сертификации дуговых печей и печей-ковшей особое внимание уделяется качеству сварных соединений, контролю водоохлаждаемых элементов на герметичность.

В России, в г. Череповце, организовано изготовление водоохлаждаемых элементов дуговых сталеплавильных печей (вначале это фирма «Фуксметмаш», а сейчас «Феникс»). Эта продукция сертифицирована.

4. В индукционных сталеплавильных печах важным фактором безопасности является напряженность магнитного поля, которая должна быть не более 80 А/м. Более высокая напряженность магнитного поля отрицательно сказывается на здоровье работающих (сердечно-сосудистые и онкологические заболевания). Для обеспечения допустимой величины напряженности магнитного поля индукционные

печи должны быть снабжены магнитными экранами из высококремнистой стали.

Анализ работы индукционных плавильных печей показывает, что печи средней частоты (60...10 000 Гц) имеют преимущества по сравнению с печами промышленной частоты (50...60 Гц), в том числе и с точки зрения напряженности магнитного поля.

Печи средней частоты по сравнению с печами промышленной частоты имеют более высокий термический коэффициент полезного действия, работают по технологии без жидкого остатка металла и шлака от предыдущей плавки, более маневренны (по сменности работы и смене сплавов), не требуют сушки шихты. Печи средней частоты, как правило, не создают радиопомех. Все сертифицированные индукционные печи средней частоты имеют только тиристорные преобразователи. При эксплуатации индукционных печей необходимо периодически замерять напряженность магнитного поля.

5. Также существенным фактором безопасности индукционных печей является вероятность прорыва жидкого металла через футеровку на водоохлаждаемый индуктор. Опыт эксплуатации индукционных плавильных печей показывает, что наличие в конструкции печей индикаторов (сигнализаторов) состояния футеровки не гарантирует безаварийную работу печей. Более надежным, с нашей точки зрения, является замер толщины футеровки после каждой плавки с помощью специального инструмента (с записью в журнале) и немедленная замена футеровки после достижения предельно допустимого размера.

6. Предметом заботы о безопасности сталеплавильного и сталеразливочного оборудования является применение газовых горелок (например, в промежуточных ковшах МНЛЗ, в комбинированных горелках дуговых печей и т.д.). В этом случае необходимо контролировать содержание СО в воздухе рабочей зоны, которое должно быть не более 20 мг/м³.

7. При сертификации любого металлургического оборудования обращается особое внимание на полноту и содержание руководства по эксплуатации, в котором должны быть изложены все необходимые требования и меры безопасности.

В процессе сертификации металлургического оборудования проводятся его испытания. Контроль электробезопасности проводится в соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 60204-1–2007 «Электрооборудование машин и механизмов. Часть 1 Общие требования», а методика испытаний по ГОСТ Р 51838–2001 «Электрооборудование производственных машин. Методы испытаний». Качество заземления оценивается по показателю «непрерывность цепи защиты».

Сопротивление заземления, которое должно быть $\leq 0,1$ Ом, можно также проверить омметром. Сопротивление изоляции должно быть ≥ 1 МОм, и его измеряют при напряжении 500 В постоянного тока между проводами силовой цепи и цепи защиты мегомметром. Электропрочность изоляции проверяют повышенным напряжением, но не ниже двойного значения номинального напряжения (как правило, ≥ 1000 В) в течение 1 мин. Испытания электробезопасности показали во всех случаях положительные результаты. Сопротивление изоляции оказалось во всех случаях > 50 МОм, а на некоторых приводах дуговых печей > 1000 МОм, печей-ковшей — 140 МОм. Контроль напряжением 1500...2500 В на всех изделиях проводили в течение 1 мин, пробоя изоляции не было.

С 2003 г. в России введен ГОСТ Р 51837—2001 (МЭК 60398—99) «Оборудование электротермическое. Общие методы испытаний», согласно которому при первом испытании новой дуговой или индукционной печи испытательное напряжение U_i , подаваемое в течение 1 мин, должно соответствовать данным:

Номинальное напряжение U_n , В	Испытательное напряжение U_i , В
$U_n \leq 60$	500
$60 < U_n \leq 125$	1000
$125 < U_n \leq 250$	1500
$250 < U_n \leq 500$	1500, 2000
$U_n > 500$	$2U_n + 1000$

Во время испытания не должно произойти перекрытия, пробоя или возгорания изоляции. Положительные результаты испытаний свидетельствуют о высоком качестве применяемой электрической изоляции.

Кроме того, индукционные печи испытываются на расход и нагрев воды в индукторе и на герметичность водосклаждаемого индуктора под давлением, в 1,5 раза превышающим рабочее.

Важнейший показатель безопасности плавильных печей — уровень шума.

Эквивалентный уровень звука в дБА согласно ГОСТ 12.1.003—83 на постоянных рабочих местах должен быть ≤ 80 дБА (согласно европейским нормам, это 85 дБА).

В случае, если уровень шума печей превышает 80 дБА, то Орган по сертификации требует от предприятия-изготовителя, чтобы в инструкции по эксплуатации было указание о необходимости применения индивидуальных средств защиты.

Печи постоянного тока, с точки зрения уровня шума, имеют неоспоримое преимущество перед печами переменного тока из-за наличия одного электрода (вместо трех) со стабильной дугой. По нашим замерам среднее значение уровня шума на 5 печах постоянного тока составляло 83 дБА, а на четырех печах переменного тока — 111 дБА. Это свидетельствует о том, что освоение печей постоянного тока — крупный шаг в улучшении условий труда сталеваров.

Источник шума в индукционных печах — в основном, насосы системы водоохлаждения, которые должны устанавливаться в отдельном помещении. В большинстве случаев уровень шума индукционных печей оказался в пределах нормы.

Во всех замеренных случаях в пределах установленных норм оказались показатели вибрации, герметичности и температуры наружных поверхностей печей, доступных к прикосновению.

В связи с тем, что современная дуговая печь содержит большое количество водоохлаждаемых элементов, качество сварки и герметичность этих узлов очень важны для надежности работы печей. Пример изготовления водоохлаждаемых элементов на предприятии «Фуксметмаш» (ныне «Феникс»), где большое внимание уделяют качеству поступающего металла. Каждая партия стального проката снабжена сертификатом качества, содержащим данные о химсоставе металла и его механических свойствах. Независимо от этого, образцы каждой партии металла подвергаются химическому анализу и механическим испытаниям: лаборатория подтверждает соответствующую марку стали; в отдельных случаях проверяется микроструктура. Лаборатория обеспечивает 100 %-ный контроль поступающего металла.

Водоохлаждаемые трубные сварные изделия подвергают испытаниям трижды с целью проверки герметичности: вначале сжатым воздухом проверяется герметичность сегментов, затем гидротесты сваренных изделий в целом (например, при 12 атм в течение 15 мин) и в третий раз — в присутствии заказчика.

Готовая продукция сопровождается проверочным листом, где указаны давление воды и продолжительность гидротестов, результаты проверки сварных швов (рентгеноскопии, ультразвукового и магнитного контроля), подтверждается проведение термобработки; документ подписывает ответственное лицо. К проверочному листу прикладывают сведения о сварщиках, копии их удостоверений, сертификата качества на металл, акта проверки сварочных электродов и присадочных материалов, протоколов входного контроля (химанализа металла) и гидротестов.

Один из факторов безопасности оборудования — температура доступных для обслуживающего персонала наружных поверхностей, ко-

торая не должна быть ≥ 45 °С. Так, для печей фирмы Danieľ в зоне, наиболее вероятной для прикосания — наружной поверхности водоохлаждаемого кожуха печи (на уровне стен), температура была 38 °С, в нижней части кожуха — на уровне откосов и подины — 280...440 °С, но эти зоны менее вероятны для прикосания.

При сертификации индукционных печей контролируют напряженность H магнитных полей, которые, как известно, вредны для человека.

Наши исследования показывают, что если нормативный нижний предел для печей промышленной частоты $H = 80$ А/м, то для печей средней частоты фактические значения (средние по нашим замерам) — 54 А/м.

В процессе сертификации также оценивают соответствие конструкции сертифицируемого оборудования требованиям безопасности российских стандартов — визуально либо по конструкторской документации.

Оцениваются такие показатели безопасности как механическая устойчивость печей; наличие ограждений; сигнализации; наличие защиты от токов перегрузки и коротких замыканий; обеспечение пожаро- и взрывобезопасности; контроль состояния футеровки; наличие указаний в руководстве по эксплуатации о проедении всех операций с металлом и шлаком только при отключенной печи; оборудование укрытий зон газовыделения, присоединяемых к вытяжной вентиляционной системе с устройством для очистки отходящих газов; наличие пульта управления в отдельном помещении и световых табло, информирующих о ходе технологического процесса; обеспечение эксплуатационной документацией, в том числе по технике безопасности; наличие световой сигнализации, контроля режима охлаждения, заземляющих устройств; указание в технической документации допустимого тока утечки; наличие запасных систем подоохлаждения; наличие автоматических выключателей, плавких предохранителей и необходимых блокировок; обеспечение недоступности частей, находящихся под напряжением, для случайного прикосновения и др.

Для обеспечения безопасной работы электропечи должны быть оборудованы следующими блокировками и сигнализацией:

а) автоматическим отключением электропитания и подачей аварийного светового и звукового сигнала в случае прекращения или уменьшения подачи охлаждающей воды ниже допустимой величины или в случае увеличения ее температуры выше допустимой;

б) блокировками дверей, обеспечивающими отключение всех токоведущих частей, расположенных внутри кожуха, перед их возможным открытием;

в) при нарушении изоляции силовой электрической цепи электропечи относительно корпуса (земли) должно быть предусмотрено устройство (устройства) с действием на отключение питания электропечи и подачей аварийной световой и звуковой сигнализации;

г) для защиты от сверхтоков силовых цепей электропечи в электросхеме должна быть предусмотрена установка предохранителей или выключателей

Кроме указанных выше, при сертификации индукционных печей проводятся еще проверки: надежности крепления рамы печи к фундаменту; наличия у гидростанции предохранительных клапанов, защищающих установку от повышенного давления; наличия фиксации подъема крышки в крайнем положении; скорости разрядки конденсаторов после отключения установки от сети; наличия приборов контроля режима охлаждения; величины тока утечки; надписей и обозначений на органах управления и приводных механизмах; напряжения цепей управления; наличия защитной оболочки гибкой электропроводки; наличия в руководстве по эксплуатации указания о подключении печей к вытяжной вентиляции; наличия требований к охлаждающей воде и др.

При сертификации серийного выпуска печей проводился также анализ состояния производства в целях выявления условий, обеспечивающих стабильное получение требуемых характеристик. При этом оценивали наличие, состав и техническое обслуживание средств производства, а также историю предприятия, уровень технологии и оборудования, состояние контроля, испытаний и приемки готовых изделий. Обращается внимание на входной контроль поступающих комплектующих и материалов, порядок ремонта технологического оборудования, поверки контрольно-измерительных средств. При осмотре производства проводится идентификация сертифицируемого оборудования. Особое внимание уделяют наиболее ответственным техпроцессам: при производстве дуговых печей — это сварка и контроль герметичности водоохлаждаемых узлов, индукционных — технология изготовления индукторов

Проведена также сертификация отдельных индукционных плавильных печей: печи фирмы C.E.I.A.S.p.A. (Дания), установленной на заводе «Бронницкий ювелир» (Россия), печей фирмы ASEG GALLONI S.p.A. (Италия), установленных в ООО «Ювелита» (Россия); индукционной печи ИСТ-04 производства завода ДАГЗЭТО (Россия), поставленной ООО «Электросплав» (Россия); высокочастотной плавильной установки фирмы Linn High Therm GmbH (Германия), поставленной на Приокский завод цветных металлов. Результаты сертификации печей — положительные.

Сертификация печей, поставляемых как единичные изделия по контрактам, проводится, как правило, на основании анализа представляемых документов с последующей оценкой безопасной эксплуатации печей у потребителей. В процессе сертификации оценивается достаточность информации по мерам безопасности в эксплуатационной документации. При оценке работы печей у потребителей рассматривается весь комплекс вопросов безопасной эксплуатации оборудования: условия труда и техники безопасности; наличие указаний о мерах безопасности в технологической документации; вопросы экологии, в том числе загрязнения воздуха рабочей зоны; наличие у потребителя инструкции по эксплуатации и чертежей оборудования и т.д.

Оценивают также прогрессивность новых технических решений. Так, следует выделить такие новые технические решения фирмы Siemens VAI для дуговых печей, как система донного выпуска металла, полное оснащение печи водоохлаждаемыми элементами, токопроводящие консоли электродов; применение газокислородных горелок, водоохлаждаемой кислородной фурмы и др.

Фирмой Siemens VAI созданы и производятся дуговые печи переменного и постоянного тока с шахтным подогревом шихты теплом отходящих газов; двойные шахтные печи; шахтные печи с поддерживающими пальцами (для удерживания скрапа в шахте); двухкорпусные печи. В шахтных печах сокращается расход электроэнергии (более чем на 100 кВт ч/т) и расход электродов; на 40 % повышается производительность печей, на 20 % уменьшается содержание пыли в отходящих газах.

Проведенное в порядке инспекционного контроля за сертифицированной продукцией наблюдение за работой шахтной печи на заводе «Северсталь» показало безотказную работу печи при отсутствии обслуживающего персонала на рабочей площадке с полным дистанционным компьютерным управлением с пульта.

Анализ эксплуатации дуговых печей постоянного тока в России подтверждает ряд их преимуществ:

- снижение расхода электродов в 2...4 раза (на Курганмашзаводе — до 1,4 кг/т);
- большая стабильность горения дуги, длительность периода плавления в 5-тонной печи сокращается на 15...20 мин;
- лучшее перемешивание металла;
- меньший угар легирующих;
- сокращение газопыльных выбросов по сравнению с печами переменного тока в 2,65 раза;
- повышение стойкости футеровки стел;
- снижение, как отмечено выше, уровня шума;
- экономия электроэнергии (на 23%).

Следует отметить технический уровень производства индукционных печей фирмы АВР, имеющего особенности:

- механизированное вращающееся устройство (собственной разработки) для намотки катушки индуктора из полый медной трубы прямоугольного сечения;
- магнитопровод из полого алюминиевого профиля;
- нанесение противопожарных защитных покрытий на шланге водяного охлаждения;
- установка на цилиндр гидросистемы экрана, защищающего от попадания жидкого металла;
- автоматическая линия резки полосы для магнитопроводов с программным управлением (фирмы Schwabe);
- термообработка неизолированного индуктора;
- нанесение изоляции индуктора распылением в камере;
- очистка индуктора после термообработки с помощью пылевидной смеси (80 % корунда и 20 % кварцевого стекла).

Печи фирмы АВР средней частоты (емкостью 0,25...20 т) могут поставляться вместе с системой автоматизации (автоматическое поддержание температурного режима с выдачей информации), устройствами для выдвигания футеровки, удаления шлака, контроля состояния футеровки, вибраторами для набивки футеровки.

Можно отметить также некоторые особенности печей фирмы EGES (0,1...25 т):

- оригинальная конструкция индуктора, монолитно помещенного в огнеупорный бетон на глиноземной основе; испытания его герметичности проводят при давлении 30...35 атм, т.е. в 5...6 раз выше рабочего давления (при норме 1,5 рабочего давления);
- применяют преобразователи с контуром параллельного резонанса; автоматическую систему, обеспечивающую постоянную мощность, пульт дистанционного компьютерного управления преобразователем и гидросистемой; управляемые выпрямители на основе тиристоров; батареи конденсаторов преобразователей > 600 кВг, устанавливаемой под платформой рядом с печью; электронный индикатор утечки тока; модульную конструкцию электронного блока; постоянный контроль температуры и расхода воды в системе охлаждения;
- осуществляется перевод действующих печей промышленной частоты на среднюю частоту с одновременным повышением мощности и производительности печей; при этом сокращается расход электроэнергии (табл. 171)

Сертифицированные индукционные печи средней и высокой частоты ЗАО «РЭЛТЕК» разработаны в сотрудничестве с различными российскими научными организациями. Так, футеровка печей разработа-

на совместно с Восточным институтом огнеупоров и Первоуральским динасовым заводом; система управления — с научной фирмой «УПИ Резонанс»; бесконтактный измеритель температуры металла — с кафедрой радиофизики «УГТУ-УПИ».

171. Некоторые результаты модернизации индукционных печей*

Фирмы Гурции	Вместимость печи, т	Мощность печи, кВт		Частота, Гц		Производи- тельность печи, т/ч	
		А	Б	А	Б	А	Б
Ferro Dokum	2	1750	1250	250	50	3,5	1,8
Ar Dokum	3	3000	2000	250	50	6,0	3,5
Demisas	1,6	800	400	250	50	1,5	0,5

* Перевод с промышленной частоты на среднюю: А — после модернизации, Б — до модернизации.

ЗАО «РЭЛТЕК» поставляет среднечастотные индукционные печи с системами электропитания, построенными на современных полупроводниковых преобразователях частоты, в которых используются мощные управляемые тиристоры и силовые транзисторные модули. Такие системы обеспечивают питание печей токами средней и низкой частоты, а также позволяют перераспределить мощность по секциям индуктора (индуктор выполнен в виде отдельных секций, чем достигается эффект зонного перераспределения энергии в рабочем объеме печи). Для удаления шлака после окончания плавки в этих печах предусмотрен двунаправленный наклон тигля печи; при наклоне тигля назад — слив шлака по одному желобу, а при наклоне вперед — по второму желобу происходит разливка чистого металла.

В составе комплекта индукционной печи поставляются системы гидроуправления наклоном печей и поворотом крышек, системы замкнутого водяного охлаждения оборудования, компьютерного управления процессом плавки, а также механизированной загрузки шихты в печь с помощью вибротележек. В комплект поставки могут быть включены вспомогательные механизмы — донные и стеновые вибротрамбовщики футеровки, инструменты для укладки футеровки, гидравлический механизм выталкивания футеровки и другие приспособления.

Заливочные индукционные системы фирмы АВР обеспечивают поддержание расплавленного металла с постоянной температурой и

постоянным химсоставом, отсутствие шлаковых включений в металле при заливке, позволяют вводить модификаторы, точно дозировать заливаемый металл. Имеются однокювшовые или двухкювшовые системы (опрокидывающиеся ковши или ковши с пробками). Заливочные индукционные системы фирмы АВР хорошо зарекомендовали себя при заливке металла в формы. Режим заливки автоматизирован.

Состояние безопасности сталеплавильных печей необходимо рассматривать в комплексе с безопасностью смежного технологического оборудования. Поскольку большинство кислых дуговых и индукционных печей работают в литейных цехах, необходимо также рассмотреть вопрос сертификации литейного оборудования [175] — формовочного, смесеприготовительного, очистного и др.

Весь комплекс технологического оборудования литейного цеха должен быть проверен на безопасность.

Литейное оборудование подлежит обязательной сертификации на соответствие ГОСТ 12.2.046.0–2004 «Оборудование технологическое для литейного производства. Требования безопасности», а очистное оборудование еще ГОСТ 31335–2006 «Оборудование технологическое для литейного производства. Оборудование для дробеметной и дробеметно-дробеструйной обработки. Требования безопасности». Проведенные работы на ряде предприятий-изготовителей по сертификации литейного оборудования показали, что это оборудование имеет достаточно высокий уровень безопасности, а на предприятиях литейного машиностроения имеются квалифицированные испытательные лаборатории. Учитывая сложность этого оборудования и то обстоятельство, что его доставка в лабораторию для проведения сертификационных испытаний привела бы к значительному удорожанию работ, испытания обычно проводятся на заводе-изготовителе.

При проведении сертификации литейного оборудования на предприятиях России и СНГ анализируют технические условия; при этом обращают внимание на соответствие кодов ОКП, наименований и обозначений изделий, наличие разделов «Технические требования» и «Требования безопасности», указания о правилах приемки, методах контроля, составе периодических испытаний и т.д. При анализе руководства по эксплуатации обращают внимание на наличие требований по монтажу, требований к размещению оборудования, указаний о предных факторах, о порядке ввода в эксплуатацию, о граничных условиях внешних воздействий, правил управления оборудованием (в том числе при опасных ситуациях), требований по индивидуальной защите для обслуживающего персонала, транспортированию и строповке, обеспечению пожаро- и взрывобезопасности и электробезопасности, обучению персонала, указаний по устранению неисправностей и т.д.

Важной характеристикой технологического легкого оборудования, которую проверяют при сертификации, является уровень вибрации, регламентируемый ГОСТ 12.1.012–2004 «Вибрационная безопасность. Общие требования». Этот стандарт устанавливает санитарные нормы – максимальный уровень допустимой технологической вибрации, действующей на операторов стационарных машин и оборудования. Согласно этому стандарту (пункт 4.3) максимальное среднеквадратичное значение скорректированного виброускорения не должно превышать для общей вибрации $0,1 \text{ м/с}^2$, для локальной вибрации – $0,5 \text{ м/с}^2$.

Методика измерения вибрации определена ГОСТ 31319–2006 «Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах».

В тех случаях, когда сертифицируют сложные технологические линии или комплексы, существующие правила сертификации разрешают проводить испытания после монтажа оборудования во время эксплуатации.

Наряду с испытаниями, связанными с измерениями, в процессе сертификации проводят оценку (визуально и на основе анализа конструкторской документации) соответствия конструкции оборудования требованиям безопасности соответствующих стандартов. При этом обращают внимание на наличие ограждений движущихся и вращающихся частей машины и блокировок, обеспечивающих отключение машины при открытом ограждении; жесткость конструкции ограждений, наличие предохранительных устройств от перегрузок; приспособлений для строповки; надежность конструкции органов управления; наличие сигнализации, устройства аварийного отключения; соответствие «Правилам устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» в случае применения таких сосудов в составе конструкции машины; наличие вытяжных вентиляционных устройств или мест для их присоединения, рабочих площадок и лестниц при недоступности органов управления с пола; возможность местного освещения (при необходимости); свободного доступа к управлению, наладке, обезжуживанию и очистке; наличие устройств против самоотвертывания крепежа, устройств, отключающих машину при падении давления в гидро- или пневмосистеме; невозможность самопроизвольного включения оборудования при отключении электроэнергии или падении давления; наличие измерительных приборов, центрального пульта управления в линиях, позволяющих в аварийных ситуациях отключить всю линию, предупреждающих знаков опасности; наличие устройств, предохраняющих гидросистему от гидравлического удара, необходимых символов и надписей; наличие единого ввода питания электрооборудования; надежность закрывания дверей электрошкафов; отсутствие остаточного напряжения; укладку кабелей с за-

щитой их от механических повреждений; обеспечение пожаро- и взрывобезопасности и др. Контролируют также выполнение содержащихся в стандартах специфических требований безопасности для конкретных видов оборудования.

После выдачи сертификатов периодически проводят инспекционный контроль за сертифицированной продукцией, включающий ее испытания, анализ состояния производства, получение информации о выпуске сертифицированной продукции, наличии рекламаций и замечаний потребителей, изменений в конструкции и технологии, проверку выполнения рекомендаций протокола анализа состояния производства, наличие маркировки сертифицированной продукции знаком соответствия.

По результатам инспекционного контроля подтверждается или приостанавливается (отменяется) действие сертификатов соответствия в случае выявленных нарушений и установления несоответствия выпускаемой продукции требованиям безопасности.

Опыт работы показывает, что в процессе сертификации во многих случаях выявляется ряд недостатков и в соответствии с рекомендациями Органа по сертификации проводят необходимые доработки конструкции, направленные на обеспечение безопасности работающих, повышается контроль в процессе производства оборудования, обрабатывается необходимая документация. Сертификация технологического оборудования позволяет существенно повысить его безопасность.

Многие предприятия положительно оценивают сертификацию оборудования, в результате которой улучшились качество продукции, ее безопасность, надежность, конкурентоспособность. Практика показала, что сертификация способствует продвижению на рынок сертифицированного оборудования. Все это свидетельствует о необходимости сертификации технологического оборудования. Кроме того, необходимость сертификации подтверждается еще и тем, что сертификация препятствует пути на рынок недоброкачественной продукции.

Сертификация металлургического оборудования способствует техническому перевооружению предприятий, так как облегчает доступ оборудования в Россию. Кроме того, в процессе сертификации решается ряд вопросов безопасности работы этого оборудования. Запись в сертификате соответствия о его распространении на запасные части способствует бесперебойной работе сертифицированного оборудования.

С работой электросталеплавильных печей непосредственно связаны оборудование для прямого восстановления железа (шютты для электросталеплавильных печей) и его сертификация. В связи с этим необходимо осветить вопросы сертификации оборудования для получения продукта прямого восстановления железа производства американской фирмы Midrex [128].

Фирма Midrex является ведущей в мире фирмой по разработке технологии, проектированию и изготовлению оборудования для прямого восстановления железа. 53 комплекса оборудования этой фирмы построены в 18 странах. Фирма Midrex успешно разрабатывает комплексы прямого восстановления железа, начиная с 1969 г. Эти комплексы поставлены в Мексику, Индию, Венесуэлу, Саудовскую Аравию, Бразилию и другие страны. Уже в 1982 г. в мире более 50 % губчатого железа было произведено на установках фирмы Midrex, а в 2003 г. — 64,6 % (из 49,5 млн т).

В России на Оскольском электрометаллургическом комбинате работает 4 комплекса прямого восстановления железа по технологии фирмы Midrex. Все 4 установки поставлены в 1980-е годы. В настоящее время фирма Midrex совместно с австрийской фирмой Siemens VAI поставила комплекс оборудования для прямого восстановления железа производительностью 1,4 млн т в год на Лебединский горно-обогатительный комбинат Белгородской области.

Особенностью и сложностью сертификации комплекта оборудования прямого восстановления железа являлось большое количество входящего в комплект оборудования.

Фирма Midrex имеет технический центр, в котором исследуют образцы руды заказчика. В лабораторных печах производится восстановление железа, затем брикетирование на опытной прессе и исследование брикетов в лаборатории.

При сертификации был рассмотрен ряд вопросов соответствия конструкции оборудования прямого восстановления железа требованиям ГОСТ 12.2.003–91 «Оборудование производственное. Общие требования безопасности», ПБ 11–493–02 «Общие правила безопасности для металлургических и коксохимических предприятий и производств» и ПБ 06–317–99 «Единые правила безопасности при дроблении, сортировке, обогащении полезных ископаемых и окучивании руд и концентратов», в том числе: загрязнение воздуха рабочей зоны, защита и маркировка коммуникаций, состояние пожаро- и взрывобезопасности, вопросы заземления, система управления, аварийное отключение комплекса, наличие сигнальных устройств, обеспечение безопасности транспортировки оборудования, безопасность работы громотов, эксплуатация газового хозяйства, наличие ограждений и вентиляции. Было подтверждено соответствие оборудования указанным стандартам и правилам. Было рассмотрено также состояние монтажной и эксплуатационной документации, предоставляемой потребителю.

Был проведен анализ состояния производства наиболее ответственных узлов шахтной печи. Фирма Midrex разрабатывает технологические процессы изготовления деталей и узлов, осуществляет кон-

троль качества и приемку готовых изделий. Во время посещения фирмы эксперты ознакомились с технологией изготовления деталей, методикой сварки, протоколами проверки геометрических размеров деталей и функциональной проверки узлов. Наиболее ответственным технологическим процессом при изготовлении деталей и узлов шихтовой печи является сварка, качество сварки контролируется визуально, с помощью краски и выборочно рентгеном.

Органу по сертификации были представлены материалы системы качества, сертификаты соответствия менеджмента системы качества стандарту ISO 9001:2000, процедура входного контроля комплектующих и материалов, процедура поверки измерительных средств, процедура ремонта технологического оборудования. С каждой деталью и узлом в производстве перемещаются чертеж, технологический процесс и лист контроля. В целом анализ состояния производства показал, что на фирме имеются необходимые условия для обеспечения соответствия выпускаемой продукции установленным требованиям.

В состав комплекса по прямому восстановлению железа входит около 400 единиц оборудования, в изготовлении которого участвуют многие фирмы Америки и Европы. В процессе сертификации была проработана техническая документация по большому числу видов оборудования, в том числе технические описания, протоколы испытаний, копии сертификатов, копии сопроводительных документов. Следует отметить, что на фирмах Siemens VAI и Midrex отработана четкая система оценки и выбора поставщиков комплектующих, разработки проектных требований к оборудованию и отдельным узлам, позволяющая обеспечить высокое качество оборудования.

В процессе сертификации был выборочно проведен ряд испытаний. Один из сваренных узлов был проверен рентгеном в аккредитованной американской лаборатории, результаты положительные.

Была проверена электробезопасность мотора брикет-пресса, результаты следующие: сопротивление изоляции — более 50 МОм (при норме более 1 МОм), отсутствие пробоя изоляции при проверке напряжением 2500 В. Проверена также степень защиты мотора грохота, результат IP55 (норма — не менее IP32). На аналогичном оборудовании проведены замеры содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны в трех местах — воронки загрузочного устройства, пылеулавливания в зоне нижнего уплотнительного газа и пылеулавливания в зоне горячего брикетирования; результаты следующие (средние): содержание NO — 1,65 мг/м³ (норма ПДК — 2 мг/м³), содержание SO₂ — 0,12 мг/м³ (норма ПДК — 10 мг/м³), содержание CO — 0,12 мг/м³ (норма ПДК — 20 мг/м³).

В составе комплекса прямого восстановления железа имеется ряд единиц оборудования, относящихся к опасным промышленным объектам — сосуды, работающие под высоким давлением; газовые горелки; компрессоры. Фирма Midrex подготовила и представила в Орган по сертификации комплект разрешительных документов на это оборудование: разрешение Госгортехнадзора на эксплуатацию сборника жидкостей, работающего под давлением; разрешение на эксплуатацию газового оборудования и газовых горелок; лицензию на право эксплуатации взрывоопасных объектов и лицензию на право производства металлизированных окатышей; сертификаты соответствия на газовые горелки линий подвода и регулировки газа, камеру сгорания для системы горения газа и на систему регулирования и подачи газа; комплект документов по сосудам, работающим под давлением.

По требованию Органа по сертификации фирма Midrex разработала для российских предприятий инструкцию по технике безопасности для работы на оборудовании для прямого восстановления железа, в которой, в числе других вопросов, рекомендует ряд мер по предотвращению загорания железа.

При поставках комплексов прямого восстановления железа в Россию предусматривается горячее брикетирование восстановленного железа.

В результате проведенных работ фирмы Siemens VAI (Австрия) и Midrex (США) получили российский сертификат соответствия на серийный выпуск комплексов оборудования для прямого восстановления железа. Срок действия сертификата — 3 года. На основе этого сертификата соответствия в настоящее время произведена поставка такого комплекта оборудования на Лебединский ГОК. Намечены аналогичные поставки и на другие российские предприятия.

Также непосредственное отношение к электросталеплавильным печам имеют установки для разделения воздуха (производства кислорода, азота и аргона).

Кислород находит все большее распространение в сталеплавильном производстве, в том числе начиная с 40-х годов XX века в дуговых печах для ускорения расплавления шихты и продувки ванны с целью интенсивного окисления углерода. Применение кислорода в дуговых печах привело к повышению производительности печей; снижению удельного расхода электроэнергии, электродов и огнеупоров; улучшению качества стали.

Большое распространение в электросталеплавильном производстве находит также азот, особенно для легирования коррозионно-стойкой, теплостойкой, износостойкой сталей. В перспективе ожидается увеличение производства стали, легированной азотом. Сталь, легиро-

ванная азотом, обладает высокой способностью к сварке, пайке, горячей и холодной деформации.

В сталеплавильном производстве широко используется аргон, особенно для продувки стали в печах-ковшах.

В связи с этим сертифицированы воздухооxygenительные установки производства итальянской фирмы SIAD [176]. Производительность этих установок по кислороду 200...15 000 м³/ч, по азоту до 300 % производительности по кислороду, по аргону 92 % рекуперации (рис. 163–165).

Разделение воздуха на кислород, азот и аргон происходит по следующей технологической схеме:

- подача воздуха через фильтр в компрессор, где воздух сжимается до 5...6,7 бар при температуре воздуха 35 °С;
- охлаждение воздуха в трубном доохладителе и затем в водной воде до 10...12 °С при сохранении давления воздуха 5 бар; вода для охлаждения подается из испарительной башни, где охлаждение воды происходит с помощью сухого азота;
- очистка воздуха с одновременной сушкой и науглероживанием, удаление из воздуха СО₂, при этом сухой воздух сохраняет температуру и давление; очистка воздуха производится с помощью слоя молекулярных сит и слоя активированного глинозема;
- подача воздуха в теплообменник (состав воздуха: 21 % кислорода, 78 % азота и 1 % аргона) и его нагрев при выходе из теплообменника;
- подача воздуха по тарелкам в дистилляционную колонну, где происходит сепарация воздуха на кислород, азот и аргон;
- подача воздуха в турбину при $t = -60...-70$ °С, где происходит дальнейшее охлаждение воздуха до $t = -170$ °С;
- выдержка воздуха в течение 10 ч в турбине при $t = -170$ °С, при этом воздух становится жидким;
- передача жидкого воздуха в среднюю и нижнюю части верхней колонны, газообразный воздух находится в верхней части верхней колонны, а жидкий — в нижней части;
- переход газообразного воздуха в нижнюю часть верхней колонны и его конденсация из-за разности давлений;
- возврат жидкого воздуха через тарелки в нижнюю колонну;
- испарение азота вверх из-за разности удельных весов (создается система — внизу жидкий воздух, вверху газообразный азот);
- воздух внизу насыщен кислородом, происходит отбор кислорода в газообразном состоянии из нижней части верхней колонны;
- направление кислорода в кислородный компрессор;
- направление азота в смеси с аргоном в свой компрессор;
- отделение аргона от азота по разнице удельных весов (азот — 0,8 кг/дм³, аргон — 1,4 кг/дм³).



Рис. 163. Комплект оборудования для разделения воздуха

Сертификацию воздуходелительных установок проводили на соответствие следующим стандартам:

— ГОСТ 12.2.003–91 «Оборудование производственное. Общие требования безопасности»;

— ГОСТ 21944–76 «Аппараты колонные стальные диаметром от 600 до 10 000 мм. Расстояние между тарелками»;

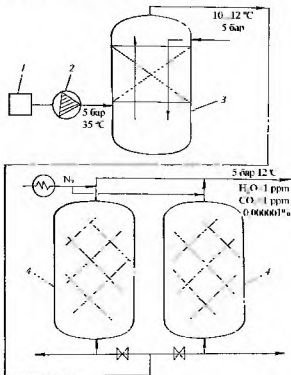


Рис. 164. Схема подготовки воздуха к разделению:

1 — фильтр, 2 — воздушный компрессор для сжатого воздуха, 3 — охладитель воздуха, 4 — блоки очистки (работают попеременно)

— ГОСТ 24755—89 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий»;

— ГОСТ 14249—89 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность».

При оценке соответствия воздухоочистительных установок стандартам особое внимание было уделено проверке расчетов этого оборудования на прочность в соответствии с установленными методиками. Было определено, что все расчеты на прочность (укрепления отверстий в обечайках, переходах и выпуклых днищах сосудов и аппаратов;

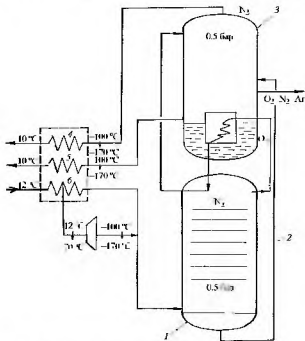


Рис. 165. Схема разделения воздуха на кислород, азот и аргон:

1 — нижняя колонна; 2 — воздухопровод; 3 — верхняя колонна; 4, 5, 6 — трубопроводы соответственно для азота, кислорода, воздуха

цилиндрических обечаек, конических элементов, днищ и крышек сосудов и аппаратов) были выполнены в соответствии с российскими стандартами. Кроме того, были проверены следующие характеристики: внутренний диаметр нижнего и верхнего колонных аппаратов (до 4000 мм); расстояние между тарелками нижнего и верхнего колонных аппаратов (до 300 мм); материал, из которого изготовлены тарелки в нижней и верхней колоннах (сталь и медь); тип нижней и верхней колонн (бесколпаковые).

Наряду с оценкой соответствия стандартам в процессе сертификации воздуходелительных установок было также рассмотрено их соответствие следующим правилам безопасности Ростехнадзора:

- ПБ 11-544-03 «Правила безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха»;
- ПБ 11-493-02 «Общие правила безопасности для металлургических и коксохимических предприятий и производств»;
- ПБ 11-552-03 «Правила безопасности в сталеплавильном производстве».

При рассмотрении соответствия правилам безопасности было установлено следующее:

- комплект оборудования воздуходелительной установки оснащен звуковой и световой сигнализацией;
- при производстве газообразного азота обеспечено содержание в нем кислорода, не превышающее установленные нормы; на линиях подачи азота в компрессоры установлены газоанализаторы с системой блокировок, исключающей поступление азота в компрессоры с содержанием кислорода, превышающим допустимое значение;
- для смазывания цилиндров поршневых кислородных компрессоров предусмотрено применение дистиллята, полученного из воды питьевого качества;
- хранение, газификация и транспортирование жидких (криогенных) продуктов разделения воздуха производится только в технических устройствах (сосуды, аппараты, цистерны и др.), специально предназначенных для данного продукта;
- в целях очистки сырого аргона от кислорода предусмотрена система автоматического измерения содержания кислорода в сыром аргоне, поступающем в реактор;
- на все трубопроводы нанесена опознавательная краска и соответствующие надписи;
- технические устройства производства продуктов разделения воздуха оснащены системами автоматического и дистанционного управления, контроля технологических процессов, системами противопожарной защиты, связи и сигнализации;

- подача газообразных продуктов разделения воздуха к техническим устройствам металлургического производства предусмотрена централизованной по трубопроводу;
- кислородные коммуникации и технические устройства защищены от попадания на них горючих веществ;
- на кислородопроводах отсутствует арматура из сплавов на основе титана;
- предусмотрена централизованная подача кислорода к сталеплавильным печам и конвертерам;
- места, где расположена запорная и регулирующая арматура, освещены;
- кислородопроводы и кислородные устройства защищены от попадания на них масла;
- руководством по эксплуатации предусмотрена проверка плотности кислородопроводов и арматуры мыльным раствором не реже одного раза в полгода с записью результатов проверки в журнале;
- в местах фланцевых соединений установлены постоянные токопроводящие перемычки.

В процессе сертификации проведены испытания: качества сварных швов (в том числе радиографией, ультразвуком и окрашиванием), герметичности колонн и компрессоров, электробезопасности электродвигателей и шкафов управления, уровня шума и вибрации компрессоров. Проверена степень защиты электроаппаратуры (IP 32—IP 55). На фирме SIAD разработаны методики проведения испытаний: на герметичность сосудов, теплообменников, трубопроводов; также на утечку с помощью нанесения жидкой пленки (метод выделения пузырьков); гидростатических испытаний на герметичность для оборудования под давлением; испытаний для определения рабочих характеристик воздушоразделительных установок; полевых пневматических испытаний для холодных блоков первичного теплообменника и кислорода.

Фирма SIAD получила сертификат соответствия системы менеджмента качества стандарту UNI EN ISO 9001:2000, сертификат соответствия европейским директивам, сертификат TUV на право изготовления сосудов высокого давления, китайский сертификат на сосуды высокого давления, разрешение Ростехнадзора на применение компрессорных установок, российский сертификат соответствия на компрессоры, разрешение Проматомнадзора на изготовление сосудов, работающих под давлением для потребителей Республики Беларусь.

Чистота производимого кислорода не менее 99,5 % O_2 .

В процессе сертификации проверена система входного контроля поступающих комплектующих и материалов, операционного контроля по ходу производства и контроля готовых изделий.

В целях проверки наличия необходимых условий для выпуска сертифицируемой продукции Органом по сертификации был проведен анализ состояния производства, который показал следующее.

Общая площадь предприятия в Бергамо 24 000 м², в том числе производственная - 10 400 м².

Одной из приоритетных задач является защита природы (защита окружающей среды)

Компрессоры кислорода, азота и аргона являются трехступенчатыми: на первой ступени (поршень-цилиндр) происходит сжатие от 0,2...0,4 бара до 3 бар, на второй ступени до 9...10 бар, на третьей ступени до 25...35 бар. В сталеплавильный цех кислород подается под давлением 15 бар. Для регулирования давления у компрессора имеется буферная емкость.

Производство компрессоров организовано в трех корпусах. В одном из них расположен склад комплектующих и обработанных деталей (например, коленвалы). Площадь всего корпуса - 2100 м², склада - 700 м². На территории склада работают автоматическая система выбора нужных деталей, два мостовых крана, производится входной контроль деталей и комплектующих (сверка с чертежами, стандартами и проверка геометрических размеров). В этом же корпусе производится предельная сборка узлов, работают конвейер транспортировки поршней, участок гидротестирования, установка гидротестирования поршней, участок общей сборки компрессоров. Все детали и узлы перемещаются в производстве с сопроводительным листом с перечнем технологических операций и контроля. В процессе производства компрессоры подвергаются гидротестированию цилиндров давлением, в 1,5 раза превышающим рабочее; пневмотестированию демпферов; рентгеновскому контролю сварных швов; проверке на эксплуатационные показатели.

В другом корпусе площадью 1400 м² производится сборка трубопроводов с арматурой. Здесь имеется сварочный участок с ручной и полуавтоматической сваркой - электродуговой и в среде аргона. Здесь имеется участок рентгеновского контроля сварных швов. В этом корпусе расположен склад запасных частей. Трубопроводы также проверяются на герметичность. В третьем корпусе площадью 1400 м² расположен участок эксплуатационных испытаний компрессоров

Недалеко от г. Бергамо, в г. Барьяно, расположен корпус производства колонн площадью 2500 м² (теплоизолированных кожухов). Здесь установлены вальцы для гибки листовой стали, имеется 2 мостовых крана грузоподъемностью 20 т каждый. На колоннах производятся сварочные работы (имеется ряд сварочных постов) и установка арматуры. Колонны поставляются заказчику с вакуумными тисками. Все сварщики аттестованы. Сварные швы контролируются рентгеном и проникающей

краской. Колонны проверяются на герметичность пневматической опрессовкой с давлением больше рабочего в 1,1...1,25 раза. Кроме того, проверяются протечки с помощью мыла.

В конструкторском отделе создана единая компьютерная сеть с заказчиками. На дисплее видны все процессы, проходящие у заказчиков аналогично информации на пульте управления у потребителя.

При осмотре производства была проведена идентификация сертифицируемого оборудования.

Для поставок в Россию фирма подготовила руководства по эксплуатации оборудования на русском языке с указанием требований и мер безопасности.

В результате анализа состояния производства установлено, что на фирме SIAD имеются необходимые условия для обеспечения соответствия выпускаемой продукции установленным требованиям.

Проведенные работы позволили выдать фирме SIAD российский сертификат соответствия на комплекты технологического оборудования для производства кислорода, азота и аргона, применяемых в металлургической и других отраслях промышленности.

В последнее время, после выдачи сертификата соответствия, на фирме SIAD проведен ряд усовершенствований производства воздухо-разделительных установок:

- создана камера для снижения уровня шума — в этой камере ус-танавливается работающий компрессор;
- создан участок автоматической сборки основных узлов компрессора с конвейерной подачей деталей;
- создан новый участок входного контроля с увеличенным штатом;
- внедрена машина автоматической мойки деталей;
- освоено производство крупногабаритных компрессоров с большей производительностью; энергия, потребляемая единицей компрессора, возросла с 450 до 1000 кВт. На производство этого оборудования получена лицензия.

Комплект оборудования для производства кислорода и азота, поставленный на ОАО «Металлургический завод имени А.К. Серова», достиг проектной производительности.

Накоплен некоторый опыт сертификации мини-заводов электрометаллургии на соответствие требованиям безопасности российских стандартов и правил безопасности Ростехнадзора, в частности, проведена сертификация мини-заводов, поставляемых в Россию фирмами *Danieli* (Италия) и *Siemens VAI* (Германия) [168].

Особенностью сертификации мини-заводов является то, что они представляют собой сложный комплекс оборудования и технологических процессов.

Как уже отмечено, в состав мини-завода электрометаллургии могут входить следующие комплексы технологического оборудования прямого восстановления железа; дуговых сталеплавильных печей обеспыливания (газоочистки) металлургических агрегатов; вакуумирования, кислородного обезуглероживания и вакуумной дегазации; ковшей-печей; машин непрерывного литья заготовок; нагревательных печей; прокатных станов. Неотъемлемой частью любого мини-завода является электросталеплавильная печь. Каждый из указанных комплексов является сложным технологическим оборудованием влияющим на безопасность мини-завода в целом, поэтому при сертификации таких заводов проводят оценку всех технологических комплексов, входящих в мини-завод; каждый из этих комплексов должен иметь отдельный сертификат соответствия.

Обязательным условием сертификации мини-заводов является также оценка завода в целом.

Сертификация мини-заводов электрометаллургии способствует их созданию в России.

При сертификации серийно выпускаемой продукции предусмотрен инспекционный контроль сертифицированной продукции, позволяющий подтвердить ее соответствие требованиям безопасности и дающий определенные гарантии ее безопасного применения. Что же касается сертификации небольших партий или единичных изделий, то дополнительным подтверждением их безопасности может быть оценка степени безопасности их работы в процессе эксплуатации. К тому же такая оценка является и проверкой правомерности выдачи сертификатов.

Последующая оценка безопасности оборудования при его эксплуатации имеет принципиальное значение еще и потому, что во многих случаях оно поступает для оснащения не только известных заводов, традиционно работающих на аналогичном оборудовании, но и для вновь создаваемых небольших производств, где уровень подготовки обслуживающего персонала не всегда отвечает необходимым требованиям. Особое внимание в этих случаях должно уделяться анализу эксплуатационной и технологической документации.

К настоящему времени накоплен определенный опыт сертификации оборудования в виде небольших партий или единичных изделий и последующей оценки безопасной его эксплуатации. Примерами могут служить такие оценки, проведенные на ряде предприятий.

Предприятия, где проводятся такие проверки, заранее оповещаются органом по сертификации и имеют возможность подготовиться к оценке безопасности работы их оборудования. На некоторых из них проводятся специальные мероприятия. Так, на одном из заводов разработан и утвержден заместителем главного инженера план мероприятий, кото-

рый содержит поручения службам завода по подготовке информационных материалов, эксплуатационной и технико-экономической документации.

В процессе оценки безопасности работы сертифицированного оборудования эксперты органа по сертификации знакомятся с условиями производства, в котором оно эксплуатируется, и с изготавливаемой на нем продукцией. Представитель органа по сертификации обязательно беседует с рабочими, обслуживающими сертифицированное оборудование, об условиях их труда и о технике безопасности; знакомится с актом ввода оборудования в эксплуатацию и журналом техники безопасности; получает информацию о том, были ли при работе на сертифицированном оборудовании несчастные случаи и травмы; просматривает журнал неисправностей оборудования, который ведет ремонтная служба. При этом обязательно выясняется, есть ли на предприятии чертежи сертифицированного оборудования и инструкции по его эксплуатации, были ли замечания к его конструкции и вносились ли в нее изменения; как сами работники предприятия оценивают безопасность оборудования и были ли замечания со стороны внешних организаций (ЦСМ, Ростехнадзора, Госсанэпиднадзора и т.д.)

Для безопасной эксплуатации оборудования важно, чтобы в технологическом процессе обязательно были предусмотрены меры безопасности. Так, при проверке безопасности работы индукционной плавильной печи F3-S на ОАО «Бронницкий ювелир» (Московская обл.) было установлено, что в технологическом процессе плавки сплава золотого-серебряно-медь отсутствовал раздел техники безопасности. Поэтому в акте проверки орган по сертификации рекомендовал заводу разработать инструкцию по технике безопасности, в которой, в частности, должна была быть указана обязательность проведения любых операций с жидким металлом (например, перемешивания) только при выключенной печи, а также постоянного контроля состояния футеровки печи (тигля) с тем, чтобы избежать проникновения жидкого металла через футеровку к водоохлаждаемому индуктору, что может привести к взрывоопасной ситуации. Такая инструкция заводом была разработана, и копия ее направлена в орган по сертификации.

При оценке безопасности эксплуатации сертифицированного оборудования обязательно обращается внимание на состояние воздушной среды на рабочих местах.

Необходимо отметить, что при проведении сертификации изделий Орган по сертификации следит за тем, чтобы в инструкциях по их эксплуатации содержались указания о необходимости устройства отсосов от этого оборудования и вентиляции производственных помещений.

При проверке безопасности сертифицированного оборудования обращается также внимание на освещенность рабочих мест. Такие

проверки, в частности, могут проводиться силами органов Госсанэпиднадзора.

Практика показала, что работа по оценке безопасности работы оборудования, сертифицированного как единичные изделия или партии, способствует повышению безопасности его эксплуатации, росту культуры производства.

Конечной продукцией большинства электросталеплавильных печей с кислой футеровкой, работающих в литейных цехах, являются отливки, предназначенные, главным образом, для машиностроения.

Анализ эксплуатации изделий машиностроения показывает, что в ряде случаев машины выходят из строя именно из-за низких механических свойств литых деталей. Например, в области продукции электротехнической промышленности известны случаи выхода из строя гидрогенераторов из-за низких механических свойств литых щек полюсов, и только после соответствующих исследований и замены марки стали эти аварии прекратились; на железнодорожном транспорте были нередки аварии тепловозов из-за разрушения литых втулок коллектора тяговых электродвигателей и была заменена марка стали; были поломки залитых баббитом литых вкладышей тяговых электродвигателей.

Поэтому для более полной оценки безопасности машин необходимо предварительно сертифицировать на безопасность отливки, особенно в тех случаях, когда изготовленные из них детали работают при циклических и динамических нагрузках. С таким же предложением выступают, например, специалисты авиационной промышленности, которые считают необходимым проводить сертификацию авиационных материалов. Критерием такой оценки могут служить прежде всего требования к механическим свойствам отливок, которые, по сути, и являются требованиями безопасности.

Для проведения сертификации отливок имеется соответствующая нормативная база, так как существующие стандарты на эту продукцию четко определяют требования к механическим свойствам с конкретным указанием, какие именно критерии безопасности то или иное свойство должно обеспечивать. Более того, ряд стандартов содержит конкретные указания на то, какие именно марки сплавов должны применяться для тех или иных условий безопасной эксплуатации изделий.

Основным стандартом, регламентирующим номенклатуру показателей и изданным в рамках «Системы показателей качества продукции», является ГОСТ 4.439–86 «Отливки. Номенклатура показателей». В нем перечислены свойства отливок, обеспечивающие механическую безопасность изготовленных из них деталей: прочность, пластичность, сопротивление разрушению при ударе, износостойкость, стойкость против механических повреждений, равномерность износа, эксплуа-

тационные свойства и, соответственно, показатели, обеспечивающие эти требования безопасности: временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость, верхний и нижний пределы твердости, неравномерность твердости, микроструктура

В ГОСТ 977–88 «Отливки стальные. Общие технические условия» отливки в зависимости от назначения разделяются на три группы по требованиям к их механическим свойствам, связанным с безопасностью работы оборудования в разных условиях эксплуатации. Этот стандарт устанавливает также методы контроля механических свойств и дает рекомендации по применению указанных в нем марок стали в конкретных условиях эксплуатации, в том числе для тяжело нагруженных деталей конкретных изделий; для деталей, работающих под действием статических и динамических нагрузок, при повышенных температурах; для износостойких деталей; деталей повышенной прочности и вязкости, работающих в условиях ударных нагрузок и ударно-абразивного износа; для деталей с разной толщиной стенок, работающих в морской среде; деталей для авиации, работающих в агрессивных средах, в нефтяных средах под давлением, в сервистых средах; для деталей, работающих длительное время под нагрузкой при высоких температурах; для деталей, работающих в условиях кавитационного разрушения; для деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам; для деталей, работающих под высоким давлением; для деталей, работающих на ударный износ и т.д.

Для повышения механической безопасности изделий машиностроения целесообразно расширить номенклатуру сертифицируемых литых деталей оборудования, работающего при циклических и динамических нагрузках (изделий для железнодорожного, автомобильного, воздушного и водного транспорта, электротехники, продукции станкостроения, строительно-дорожного и химического машиностроения, подъемно-транспортного и энергетического оборудования и др.).

Накоплен значительный опыт сертификации отливок, сгруппированных по технологическим переделам (например, изготовленных из стали, выплавленной в одной и той же сталеплавильной печи; или залитых в формы, изготовленные на одной и той же формовочной машине и т.д.). Одним из примеров такой сертификации является сертификация широкой номенклатуры отливок на Амурском судостроительном заводе, которая показала высокий уровень безопасности производимых на нем литых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубов В.Л., Гасик М.И.** Электрометаллургия ферросплавия Днепропетровск: Системные технологии. 2002. 704 с.
2. **Юшкин Н.П.** Минералогические проблемы кремнезема // Кварц. Кремнезем: Матер. Междунар. семинара. Сыктывкар, 2004. С. 7–8.
3. **Слагоден Е.В.** Современное образование кремния и минералов кремнезема // Кварц. Кремнезем. Матер. Междунар. семинара. Сыктывкар, 2004. С. 10–13.
4. **Турашева А.В.** Состояние и проблемы минерально-сырьевой базы кварцевого плаячного сырья Российской Федерации // Кварц. Кремнезем: Матер. Междунар. семинара. Сыктывкар, 2004. С. 178–181.
5. **Сойфер В.М.** Кислая электроплавка стали в заготовительном комплексе машиностроения // Электрoметаллургия. 2008. № 7. С. 19–24.
6. **Стойченко А.П., Медовар Л.Б.** Кислый процесс в современном производстве стали // Электрoметаллургия. 2007. № 12. С. 13–16.
7. **Sink E.E., Dable F.B.** // Trans. Am. Foundrymen's Assoc. V. 46. 1938. P. 65–132.
8. **Шульце Ю.А.** Неметаллические включения в электростали. М.: Металлургия, 1964. 207 с.
9. **Шульце Ю.А.** Производство отливок из стали. Киев – Донецк. Вища школа, 1983. 183 с.
10. **Чуйко Н.М., Чуйко А.Н.** Теория и технология электроплавки стали. Киев – Донецк. Вища школа. 1983. 248 с.
11. **Крамаров А.Д.** Физико-химические процессы производства стали. М.: Металлургиядат. 1954. 200 с.
12. **Крамаров А.Д.** Производство стали в электропечах. М.: Металлургия, 1969. 350 с.
13. **Явойский В.И.** Теория процессов производства стали. М.: Металлургия, 1967. 782 с.
14. **Меджибанский М.Я.** Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. Киев – Донецк. Вища школа, 1979. 280 с.
15. **Энлот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В.** Термохимия сталеплавильных процессов. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1969. С. 75–81.
16. **Григорян В.А., Беляничков Л.Н., Стомахин А.Я.** Теоретические основы электроплавильных процессов. М.: Металлургия, 1979. 256 с.
17. **Сойфер В.М.** Выплавка стали в кислых электропечах. М.: Металлургия, 1987. 121 с.
18. **Сойфер В.М., Кузнецов Л.Н.** Дуговые печи в сталелитейном цехе. М.: Металлургия, 1989. 175 с.
19. **Сойфер В.М.** Огнеупоры для дуговых сталелитейных печей малой емкости. М.: Металлургия, 1994. 189 с.

20. Соффер В.М. Теоретические основы, разработка и внедрение ресурсосберегающей технологии выплавки стали в кислых электропечах: Дис. д-ра техн. наук. Днепропетровск. 1999. 330 с.
21. Байков Х.Х., Пономарев С.Г., Обьеденнов А.Н., Мартыненко С.В. Литейное производство ФГУП «ПО Уралвагонзавод» и перспективы его развития // Литейное производство. 2006 № 10. С. 2–4.
22. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю. Перспективы использования агрегатов коша – печь в печах, производящих фасонное стальное литье // Электromеталлургия 2006 № 12. С. 13–17.
23. Горелов В.Г., Крючков О.Б., Пономарев В.Д. Повышение трещиностойчивости стальных отливок // Литейщик России 2006 № 10 С. 27–29.
24. Ивашенков Ю.М., Солдатов В.Г. Взаимосвязь механических свойств с эксплуатационными характеристиками литых стальных деталей железнодорожного транспорта // Литейное производство. 2008 № 6 С. 15–17.
25. Ершов Г.С., Черныков В.А. Взаимодействие фаз при выплавке легированных сталей. М.: Металлургия, 1973. 263 с.
26. *Металлургия стали* / под ред. В.И. Ялойского, Ю.В. Кряковского. М.: Металлургия, 1983. 584 с.
27. Ершов Г.С., Бычков Ю.Б. Свойства металлургических расплавов и их взаимодействие в сталеплавильных процессах. М.: Металлургия. 1983. 216 с.
28. Еланский, Г.Н., Еланский Д.Г. Строение и свойства металлических расплавов учеб. пособие для вузов. М.: МГВМИ. 2006. 228 с.
29. Кондратьев С.Е. Наследственность структуры и свойств литой стали // Литейное производство. 2008 № 9 С. 6–10.
30. *Атлас шлаков*. пер. с нем. / под ред. И.С. Кулакова. М.: Металлургия, 1985. 207 с.
31. Воскобойников В.Г., Кулрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. М.: Металлургия, 1985. 479 с.
32. Теория и практика непрерывных сталеплавильных процессов / А.В. Ялойский, В.И. Ялойский и др. // Научные труды МИСиС. М.: Металлургия, 1978. № 109. С. 4–42.
33. Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1987. 462 с.
34. Каземис Е.К., Зинададзе Г.Н., Бельских М.А. Термодинамика процессов сублимации, диссоциации и газофазных реакций в парах над кремнеземом // Известия АН СССР Серия «Металлы» 1985 № 1 С. 46–48.
35. Ершов Г.С. Исследование особенностей взаимодействия металлургических фаз при выплавке легированных сталей // Автореф. дис. д-ра техн. наук Ленинград, 1968.
36. Морозов А.Н. Кинетика процесса выгорания углерода при выплавке малоуглеродистой стали: Всесоюзная науч. конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали». Челябинск, 1990. С. 12–13.
37. Гасик М.М., Гасик М.И. // Известия АН СССР. Металлы 1985. № 3 С. 22–30.
38. Fisher W.A., Schramacher J.F. // Arch. Eisenhüttenwesen. 1978. Bd. 49. № 9. S. 431–435.
39. Левин А.М. // Производство стали и ферросплавов 1969. Вып. 6. С. 49–72.

40. Фролов С.Ф. Исследование и разработка технологического процесса плавки и термообработки кислой углеродистой стали для отливок группы особого качества // Автореф. дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону. 1964.
41. Малюшча Я.Н., Ковальчук Г.З. Сульфиды в сталях и чугунах. М.: Металлургия, 1988. 247 с.
42. Влияние окисленности углеродистой стали на качество отливок / В.Г. Горелов, И.М. Гальперин и др. // Литейное производство. 1996. № 4. С. 9–10.
43. Денисов В.А., Денисов А.В. Получение плотных отливок // Литейное производство. 1995. № 10. С. 8–10.
44. Шульге Ю.А., Адамчук С.И., Блиник Г.А. Роль неметаллических включений в особо чистой модифицированной стали // Литейное производство. 1988. № 12. С. 8–9.
45. Mousa I. Wpływ modyfikacji na rozdrobnienie struktury i właściwości mechaniczne staliwa Prt. // Odlew. 1981. № 4. С. 117–123.
46. Микей И.А., Михайленко Г.Ф. Повышение качества стали для изготовления отливок деталей магистральных электровозов // Технология электрометаллического производства. 1981. Вып. 8. С. 2–3.
47. Горелов В.Г., Денисова Е.И. Кошловое модифицирование кислой электростали // Литейное производство. 1990. № 9. С. 13.
48. Stransky K. Termodynamické rozbírkou vzniku bodlin v ocelových odlitcích // Slevarenský. 1980. Bd. 28. № 9. С. 373–377.
49. Друян М.А. Дегазация стали в процессе плавки и ситуационная пористость в стальном литье // Автореф. дис. канд. техн. наук. Донецк. 1960.
50. Микей И.А., Прохской Л.И. Обработка стали в ковше шлакообразующей смесью // Литейное производство. 1977. № 10. С. 34.
51. Шульге Ю.А. Пути улучшения качества стали в отливках // Литейное производство. 1977. № 11. С. 23–25.
52. Cizner J., Jenusta J. / Slevarenský. 1980. Bd. 28. № 9. С. 357–360.
53. Бекерман Ф.А., Мархасин Е.С. О влиянии ввода кальция в форму на кладостойкость стальных отливок // Литейное производство. 1981. № 10. С. 32.
54. Горелов В.Г., Егоров А.А., Бычков В.П. Влияние раскисления алюминием и селенокальцием на ударную вязкость стали 20Л // Литейное производство. 1980. № 11. С. 27.
55. Штайнметц К., Отерс Ф. Металлургические основы поведения серы в литейном чугуне и стали // Черные металлы. 1977. № 8. С. 3–12.
56. Горелов В.Г., Егоров А.А., Плетнев В.П. Влияние раскисления на качество отливок из углеродистой стали // Литейное производство. 1980. № 8. С. 8.
57. Сучков А.Н., Морев А.В., Мелух А.Г. Влияние комплексных раскислителей на неметаллические включения и механические свойства стали 35Л // Литейное производство. 1980. № 9. С. 13.
58. Влияние модифицирования на неметаллические включения и свойства сталей 20ГФЛ и 08ГФЛ / А.Е. Аксельрод, Л.П. Житков и др. // Литейное производство. 1983. № 3. С. 10–11.
59. Афтаназиянц Е.Г., Бабаскин Ю.З. Влияние модифицирования добавками азота и ванадия на структуру и свойства среднеуглеродистой стали // Литейное производство. 1981. № 12. С. 14–15.
60. Белокуров С.М., Кривоносов В.В. и др. Шлакообразующая смесь для раскисления кислой стали. А.С. 1705360 СССР. МКИ⁸ С 21 С7/06 15.01.92. Бюл. № 2.

61. Calcium alloy steel additive and method thereof. Патент 4956009 США, «МКИ» С 21 С7,064. Опубл. 11 09 90.
62. Шагалов В.Л., Раковский Ф.С. и др. Способ раскиснения и легирования низкоуглеродистой ванадийсодержащей электростали. А С. 1659493 СССР «МКИ» С 21 С05/52
63. Повышение механических свойств сталей для литых деталей жидкостной системы тракторов / А.А. Аллопов, Е.И. Голуб и др. // Прогрессивная технология в машиностроении. Рубцовск, 1995. С. 7–9.
64. Těhovník F., Koroušic V., Přesern V. Optimalizace modifikace nekovinských vteřinok v železných ocelích. // Kov Zřt., Technol. 1992. 26. № 1–2. С. 125–130.
65. Шуб Л.Г., Ахмедов А.Ю. О целесообразности модифицирования стали // Металлургия машиностроения. 2006. № 5. С. 38–41.
66. Горелов Н.Г., Садохон Г.Н., Ляшенко В.Л. Влияние комплексной РЗМ-содержащей легатуры на хладостойкость стальных отливок // Литейное производство. 1995. № 10. С. 10–11.
67. Кирьянов Ю.М., Соколов А.Н., Алюмов Е.В., Соifer В.М. Исследование технологического процесса выплавки жаропрочной малоуглеродистой стали, модифицированной редкоземельными металлами, для деталей электротермического оборудования // Технология электротехнического производства: тр. ВПТИ/электро. Л.: ВНИИЭЛЕКТРОМАШ. 1973. № 7. С. 22–23.
68. Бахметьев В.В., Колокольцев В.М. Улучшение свойств сталей воздействием на их расплав // Литейное производство. 1997. № 5. С. 30–31.
69. Мищенко Г.Н. Обработка жидкой стали электротоком // Литейное производство. 1997. № 7. С. 17–18.
70. Применение продувки инертным газом для рафинирования чугуна и стали в литейном производстве / А.Ю. Черныгин, Д.А. Лубянов и др. // Новые материалы и технологии. Москва. 1994. С. 97.
71. Соifer В.М. Новые проекты дуговых сталеплавильных печей фирмы «Даниели» // Электрометаллургия. 2008. № 4. С. 46–48.
72. Электродуговые печи нового поколения как фактор обновления сталеплавильного производства / В.Д. Сидяренко, А.Н. Попова и др. // Труды девятого конгресса сталеплавыльщиков. М., 2007. С. 28–33.
73. Daniel News. Модернизация сталеплавильного цеха компании Stomala. Болгария. № 152. Декабрь 2007. Daniel Group. С. 15.
74. Соifer В.М. Сертификация металлургического оборудования и техническое перевооружение сталеплавильного производства // Электрометаллургия. 2005. № 7. С. 14–16.
75. Опыт работы шахтной печи в электросталеплавильном производстве ОАО «Северсталь» / А.В. Зиборова, Б.Я. Балдаев и др. // Труды восьмого конгресса сталеплавыльщиков. М., 2005. С. 256–257.
76. Райле В. Высокотехнологический процесс SIMETALCIS ULTIMATE и комбинированные горелки (RCB). Особые решения для повышения производительности электродуговых печей // Современные проблемы электрометаллургии стали. Челябинск. Издательство ЮУрГУ. 2007. С. 3–10.
77. Смоларенко В.Д. Электродуговые печи нового поколения. Научно-технические, аддитивные и информационные материалы. М.: Институт «АО ВНИИЭТО», 2006. 42 с.
78. Соifer В.М. Металлургическое оборудование производства фирмы «DANIELI» // Современная электрометаллургия. 2006. № 2. С. 45–49.

79. Ротенберг Г.Б. Огнеупорные материалы: перевод с англ. М.: Металлургия, 1980. 342 с.
80. Соيفер В.М., Заслодича А.И. Применение набивной футеровки в кислых дуговых сталеплавильных печах с цилиндрическим кожухом // *Сталь*. 1962. № 4. С. 320.
81. Соифер В.М. Набивная кислая футеровка дуговых сталеплавильных печей. М.: Информэлектро, 1979. 47 с.
82. Физико-химические способы активизации и модифицирование кварцевых песков / З.Я. Иткин, В.А. Смолко и др. // *Вопросы теории и технологии литейных процессов*. Челябинск, 1996. С. 90–94. 171.
83. Соифер В.М., Нюсич А.М., Анкина Л.А. Оценка огнеупорности крупных и мелких кварцевых песков // *Литейное производство*. 1990. № 8. С. 10–11.
84. Gou V.J. Study on new material for open – throat bit mould // *Taiikand gongchong* 1995 № 3. С. 25–29.
85. Попков К.Н., Потавов Е.В. Обогащение кварцевых песков центробежно-лопаточным способом для приготовления жидкостекляных смесей // *Литейное производство*. 2007. № 9. С. 11–13.
86. Василенко Н.Е. Возможность использования амурских песков в качестве формовочных материалов // *Новые литейно-металлургические процессы и сплавы*. Комсомольск-на-Амуре, 1995. С. 115–116.
87. Лясе А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси. М.: Машиностроение, 1965. 332 с.
88. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машгиз, 1963. 412 с.
89. Srinagesh K. *International Cast Metals J.* 1979. March. P. 50–63.
90. Дорошенко С.П. Совершенствование технологий изготовления форм и стержней из жидкостекляных смесей // *Литейное производство*. 1983. № 1. С. 14–15.
91. Копылов А.Н. Условия образования прочного жидкостекляного тела // *Вопросы теории и технологии литейных процессов*. Челябинск, 1991. С. 49–54.
92. Жуковский С.С. Проблемы прочности формовочных смесей // *Литейное производство*. 1985. № 5. С. 5–7.
93. Samsnowicz Z., Korolewicz Z., Mikulezynski T. *Pace Komitji Metalurgiozno* // *Odlwniezej PAN* 1983. V. № 30. S. 7–20.
94. Тепляков С.Д. Строение и физико-химические характеристики нагретого жидкого стекла // *Литейное производство*. 1984. № 5. С. 18–20.
95. Айлер Р. Химия кремнезема. пер с англ. Т. 1. М.: Мир, 1982. 1127 с.
96. Фролов Ю.Г., Шабанова Н.А., Попов В.В. Поликонденсация кремнезевой кислоты в водной среде. Влияние концентрации кремнезевой кислоты // *Коллоидный журнал*. 1983. Т. 45. Вып. 2. С. 382–386.
97. Кайнарский И.С. Динас. М.: Металлургиямет, 1961. 496 с.
98. Никифоров С.А., Никифорова М.В. Получение высококремнезистого жидкостекляного связующего при модифицировании кремнеземом // *Вопросы теории и технологии литейного производства*. Челябинск, 1996. С. 45–48, 168.
99. Barian A., Kristek I. *Slevarestvji*. 1982. V. 30. № 2/3. S. 58–60.
100. Jelinek P., Petrikova R. *Gjesserejtechnjk*. 1982. V. 28. № 1. S. 21–25.
101. Иванов А.А., Ромашкин В.Н. Упрочнение жидкостекляных смесей и внутренние напряжения в связующих // *Литейное производство*. 1984. № 7. С. 13–14.

102. **Исследование** глин Переводного месторождения / Р.С. Шуляк, В.В. Приваченко и др. // *Огнеупоры* 1986. № 1. С. 35–40.
103. **Николюкской Л.С., Смоларенко В.Д., Кузнецов Л.Н.** Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / М.: *Металлургия*, 1981. 463 с.
104. **Ожороков Н.В.** Дуговые сталеплавильные печи. М.: *Металлургия*, 1971. 434 с.
105. **Лузгин В.И., Петров А.Ю., Флерман Л.И.** Индукционные тигельные печи средней частоты нового поколения // *Литейщик России* 2002. № 1. С. 22–24.
106. **Лузгин В.И., Петров А.Ю., Флерман Л.И., Якушев К.В.** Индукционные плавильные модули средней частоты — основа литейного производства // *Литейщик России* 2003. № 3. С. 26–29.
107. **Двухчастотные** двухчастотные установки индукционной плавки металлов для литейного производства / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, Ф.Н. Сарапулов и др. // *Литейщик России*. 2004. № 5. С. 29–33.
108. **Многофункциональный** плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях миниметаллургических предприятий и литейных цехов крупных машиностроительных заводов / Е.А. Коршунов, Д.Н. Гайманов, В.Л. Бастриков и др. // *Литейщик России* 2004. № 10. С. 21–25.
109. **Новые возможности** решения специальных технологических задач при индукционной плавке металлов в полях средней и низкой частоты / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.А. Рачков и др. // *Литейщик России*. 2005. № 4. С. 23–25.
110. **Индукционные** плавильно-литейные системы и плавильные установки малой емкости для литейного производства и лабораторий / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.А. Рачков и др. // *Литейщик России* 2006. № 3. С. 10–14.
111. **Лузгин В.И., Петров А.Ю., Рачков С.А., Якушев К.В.** Индукционные среднечастотные плавильные комплексы для литейного производства // *Литейное производство*. 2006. № 5. С. 23–27.
112. **Бийрактар И.** Особенности печей «EGES» // *Литейщик России*. 2008. № 8. С. 14–15.
113. **Каплевич А.Н.** Английские печи на АО «Петрозаводскмаш» // *Литейное производство* 2007. № 6. С. 22.
114. **Гендзель В.Л., Неволов А.К.** ОАО «Новозибковский завод «Индуктор» // *Электromеталлургия* 2008. № 3. С. 38–40.
115. **Фролов С.П., Самсонов Н.А., Плешков Ю.М., Матвеев Ю.В.** Источники питания для индукционных плавильных печей и дуговых печей постоянного тока // *Литейщик России*. 2005. № 6. С. 50–51.
116. **Сойфер В.М.** Технология изготовления и защиты в эксплуатации индукторов индукционных тигельных плавильных печей // *Электromеталлургия* 2007. № 2. С. 27–30.
117. **Найдек В.Л., Русаков П.В., Шивский О.И.** Энергетическая стратегия конструктивно-технологической оптимизации индукционных тигельных печей // *Металлургия машиностроения* 2007. № 6. С. 2–4.
118. **Вакуумная** индукционная плавильно-разливочная установка ВИАМ-2002 для получения высококачественных спесплавов / Е.Н. Каблов, В.В. Сидоров и др. // *Электromеталлургия*. 2004. № 5. С. 24–26.
119. **Модернизация** вакуумной плавильной установки с донным сливом / Ю.С. Елисеев, В.В. Константинов и др. // *Литейное производство*. 2005. № 9. С. 30–32.

120. Изгиль И. Индукционные плавильные печи средней частоты производства фирмы EGES // *Литейщик России*. 2007. № 11. С. 14–16.
121. Дегтяренко Г.И., Руско В.И., Смоликов В.С. Обзор зарубежных и отечественной информации // *Металлургия машиностроения*. 2007. № 1. С. 39–43.
122. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Физикохимия и технология электроферросплавов. Днепропетровск: Современные технологии. 2005. 448 с.
123. Сойфер В.М. Использование продуктов прямого восстановления железа в электросталеплавильных печах // *Бюллетень научно-технический и экономический информации. Черная металлургия*. 2007. Вып. 8 (1292). С. 33–35.
124. Смоляренко В.Д. Интегрированный электрометаллургический мини-завод с загрузкой горячих окатышей и электродуговой печь // *Электрометаллургия*. 2005. № 9. С. 43–45.
125. Казаков С.В., Гартен В. Восьмая международная конференция по электрометаллургии стали // *Электрометаллургия*. 2005. № 12. С. 36–43.
126. Hunter R. Handling and shipping of DRI/HBI. VA. TECHN. M. 2005. 10 p.
127. Сойфер В.М. Прямое восстановление железа из железной руды и лежалорудных окатышей // *Наука и технология в России*. 2007. № 1 (83). С. 28–30.
128. Сойфер В.М., Петрушко А.В. Сертификация оборудования для получения продукта прямого восстановления железа — шихты для дуговых сталеплавильных печей // *Электрометаллургия*. 2007. № 1. С. 30–34.
129. Лякишев Н.П., Гасик М.И., Дашевский В.Я. Металлургия ферросплавов. Ч. 1. Металлургия сплавов кремния, марганца и хрома: учеб. пособие. М.: Учеба, 2006. 116 с.
130. Лякишев Н.П., Гасик М.И., Дашевский В.Я. Металлургия ферросплавов. Ч. 2. Металлургия сплавов вольфрама, молибдена, ванадия, титана, шестивалентных и редкоземельных металлов, ниобия, циркония, алюминия, бора: учеб. пособие. М.: Учеба, 2007. 150 с.
131. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. М.: Металлургия, 1985. 479 с.
132. Шуб Л.Г., Ахмадеев А.Ю. О целесообразности модифицирования стали // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 5. С. 38–41.
133. Горелов В.Г., Крючков О.Б., Пономарев Д.Л. Оптимизация технологии получения низколегированных сталей с использованием присадки силикобария для повышения трещиностойкости отливок // *Литейщик России*. 2004. № 11. С. 16–18.
134. Горелов В.Г., Крючков О.Б., Пономарев В.Д. Повышение трещиностойкости стальных отливок // *Литейщик России*. 2006. № 10. С. 27–29.
135. Гацуря В.М., Михеев Ф.В. Повышение механических и литейных свойств стали 35Л модифицированием // *Литейное производство*. 2004. № 8. С. 7–9.
136. Горелов В.Г., Романенко Д.Г., Демидова Е.И. Микролегирование кислой стали с использованием ванадиясодержащих отходов // *Литейное производство*. 2002. № 2. С. 9–10.
137. Снижение себестоимости стальных отливок за счет легирования ванадием / Ю.В. Гребнев, В.В. Досенко и др. // *Литейное производство*. 2006. № 5. С. 13–14.
138. Филиппенков А.А. Ванадийсодержащие стали для машиностроения // *Литейщик России*. 2003. № 11. С. 8–10.

139. Сидоренко М.Ф. Теория и технология электроплавки стали. М.: Металлургия, 1985. 134 с.
140. Расчеты металлургических процессов на ЭВМ / Д.И. Рыжонков, С.Н. Палерин и др. М.: Металлургия, 1987. 230 с.
141. Палерин С.Н., Серов Г.В., Крашенинников М.Г. Теория металлургических процессов. Термодинамические и кинетические расчеты металлургических процессов. М.: МИСиС, 1978. 56 с.
142. Современные энергосберегающие электротехнологии / под ред. С. Лути. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. 548 с.
143. Кувалдин А.Б. Воздействие переменного электромагнитного поля на персонал электроустановок промышленных предприятий // Электрометаллургия. 2002. № 3. С. 33–37.
144. Кувалдин А.Б. Методы электромагнитной обработки // Электрометаллургия. 2002. № 5. С. 46–47.
145. Petrowicz O. Aktueller Kenntnisstand biologischer Wirkungen elektromagnetischer Felder. Wie sind Gesundheitsrisiken zu beurteilen. Technische Universität Braunschweig. Fachgebiet Elektrowärme. 18–19 Oktober 2001. 9 s.
146. Сойфер В.М. Магнитная безопасность индукционных печей // Металлургия машиностроения. 2004. № 5. С. 23–26.
147. Сойфер В.М. Электромагнитные поля индукционных печей // Электрометаллургия. 2004. № 3. С. 37–39.
148. Сойфер В.М. Магнитная безопасность индукционных печей // Наука и технология в России. 2005. № 1. С. 28–29.
149. Протасов В.Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России. М.: Финансы и статистика, 2000. 671 с.
150. Экология литейного производства / под ред. А.Н. Бондина, С.С. Жуковского и др. Брянск: Издательство БГТУ, 2001. 315 с.
151. Симонян Л.М., Поталочкин А.Н., Муштафин Р.М. Методы оценки и анализ источников выбросов CO₂ с использованием автоматизированной базы данных // Электрометаллургия. 2004. № 7. С. 37–40.
152. Буторина И.В. Экологические показатели производства стали на металлургических предприятиях стран ЕС и СНГ // Электрометаллургия. 2003. № 4. С. 28–32.
153. Гигиенические нормативы химических веществ в окружающей среде / под ред. В.В. Семенового. СПб.: Профессional, 2005. 763 с.
154. Альтгаузен А.П., Попов А.Н., Ляхович А.П. Электротермия и проблемы экологии. М.: Информэлектро, 1986. 28 с.
155. Грачев В.А. О новом законе «Об охране окружающей среды» // Литейщик России. 2002. № 1. С. 10–13.
156. Лопухов Г.А. Удаление диоксинов из технологических газов дутьевой сталеплавильной печи // Электрометаллургия. 2004. № 4. С. 29–33.
157. Сойфер В.М. Новые проекты дуговых сталеплавильных печей фирмы «Даниэль» // Электрометаллургия. 2002. № 4. С. 46–48.
158. Шилан М., Трещалин А.В. Технология сушки очистки промышленных газов на литейных и металлургических предприятиях // Литейщик России. 2008. № 3. С. 10–13.
159. Кузнецов Л.Н., Волковский Л.А. Утилизация пыли от производства стали в дуговых сталеплавильных печах // Электрометаллургия. 2004. № 9. С. 23–26.

160. Малиновский В.С. Энергоэкономические возможности дуговых печей постоянного тока нового поколения // *Электрометаллургия*. 2007. № 7. С. 8–14.
161. Лопухов Г.А. Подовый электрод дуговой сталеплавильной печи постоянного тока конструкции фирмы DANIELI // *Электрометаллургия*. 2004. № 6. С. 48.
162. Соيفер В.М. Анализ работы дуговых плавильных печей постоянного тока. ООО «НТФ «ЭКТА» и ООО «МТФ» // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 6. С. 10–12.
163. Понов В.Н., Кривенков Н.А. Дуговая печь постоянного тока нового поколения на ОАО «Металлургический завод «Электросталь» // *Литейное производство*. 2005. № 7. С. 20–21.
164. Володин А.М., Богдановский А.С., Малиновский В.С. Результаты работы печи постоянного тока ДППТУ-20 на АОФ «Тяжпрессмаш» // *Литейное производство*. 2004. № 11. С. 31–35.
165. Линчевский Б.В., Зайцев В.М., Мяслов Д.Г. Сравнение плавильной работы дуговой печи переменного и постоянного тока на ОАО «Тяжпрессмаш» // *Литейщик России*. 2008. № 12. С. 28–30.
166. Макаров А.Н., Шимко М.Б., Острик В.В. Анализ основных технико-экономических показателей работы дуговых печей постоянного и переменного тока // *Электрометаллургия*. 2004. № 3. С. 5–9.
167. Смоларенко В.Д. Семинар «Мини-заводы нового поколения: развитие на основе инноваций» // *Современная электрометаллургия*. 2005. № 3. С. 68–69.
168. Соифер В.М. Сертификация мини-заводов электрометаллургии // *Электрометаллургия*. 2007. № 11. С. 36–37.
169. Стеблов А.Б., Матейко А.В. Эффективность и риски мини-заводов // *Электрометаллургия*. 2008. № 7. С. 2–9.
170. Смоларенко В.Д. Электросталеплавильный мини-завод НАДЕЕД-2 по производству стального листа // *Электрометаллургия*. 2004. № 10. С. 2–7.
171. Сидорина К.Д., Соифер В.М. Сертификация индукционных плавильных печей // *Электрометаллургия*. 2000. № 5. С. 13–17.
172. Соифер В.М. Сертификация электросталеплавильных печей: тр. шестого конгресса сталеплавильщиков. М., 2001. С. 291–296.
173. Соифер В.М. Сертификация плавильного и разливочного оборудования для литейного производства // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 1. С. 23–27.
174. Соифер В.М. Сертификация оборудования для выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали // *Электрометаллургия*. 2008. № 3. С. 33–35.
175. Соифер В.М., Сидорина К.Д., Рябов С.П. Сертификация технологического оборудования для металлургического производства // *Электрометаллургия*. 2002. № 2. С. 2–8.
176. Соифер В.М. Сертификация установок для разделения воздуха (производства кислорода, азота и аргона) // *Электрометаллургия*. 2008. № 8. С. 38–42.

Производственно-техническое издание

Соифер Владимир Маркусович

**ВЫПЛАВКА СТАЛИ
В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ**

Редактор *Е.Д. Макаренко*

Переплет художника *Т.Н. Галицкий*

Корректоры: *Л.Е. Соловьева, Л.И. Сажина, В.О. Кобякова*

Инженер по компьютерному макетированию *А.Л. Девя*

Сдано в набор 18.03.09. Подписано в печать 01.07.09.

Формат 60×88^{1/8}. Бумага офсетная. Гарнитура Newton

Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,4. Уч.-изд. л. 28,7.

Тираж 1000 экз. Заказ

ОАО "Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромынский пер., 4/1, стр. 3

Отпечатано в ГУП ППП "Типография "Наука" РАН
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-217-03450-5



9 785217 034505