

Н. И. КЛОЧНЕВ

**ТЕХНОЛОГИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА  
ОТЛИВОК  
из высокопрочного чугуна  
с шаровидным графитом**

**МАШГИЗ**

Н. И. КЛОЧНЕВ  
канд. техн. наук

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ОТЛИВОК  
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА  
С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1962

В книге освещены вопросы технологии производства отливок из нового конструкционного материала — высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Рассмотрены специфические особенности литейных свойств высокопрочного чугуна, особенности технологии литейной формы, технологии плавки чугуна, способы обработки чугуна сфероидизирующими присадками, особенности изготовления форм и стержней, заливки форм, термической обработки отливок, а также основные виды брака литья и способы его устранения.

Книга предназначена для инженерно-технических работников литейных цехов и работников научных учреждений.

Рецензент д-р техн. наук проф. **К. И. Ващенко**

Редактор инж. **О. В. Черняк**

---

*Редакция литературы по горячей обработке металлов*

*Зав. редакцией инж. С. Я. ГОЛОВИН*

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>Глава I. Литейные свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом . . . . .</b>	<b>9</b>
1. Жидкотекучесть . . . . .	9
2. Усадка . . . . .	16
3. Внутренние литейные напряжения . . . . .	31
<b>Глава II. Плавка чугуна и обработка его магнием . . . . .</b>	<b>40</b>
1. Состав чугуна . . . . .	40
2. Плавильные печи . . . . .	44
3. Применяемые присадки . . . . .	51
<b>Глава III. Технология литейной формы . . . . .</b>	<b>82</b>
1. Выбор плоскости разъема и положения отливки в форме . . . . .	82
2. Выбор усадочного масштаба при изготовлении моделей . . . . .	83
3. Литниковая система . . . . .	84
4. Питание отливок . . . . .	86
5. Подвод металла к отливке . . . . .	93
<b>Глава IV. Особенности литья деталей из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом . . . . .</b>	<b>104</b>
1. Литье в песчаные формы . . . . .	104
2. Литье в оболочковые формы . . . . .	119
3. Литье в кокили . . . . .	123
4. Центробежное литье . . . . .	133
<b>Глава V. Термическая обработка высокопрочного чугуна с шаровидным графитом . . . . .</b>	<b>137</b>
1. Основы термической обработки . . . . .	137
2. Виды и режимы термической обработки . . . . .	141
<b>Глава VI. Характерные виды брака при производстве отливок из чугуна с шаровидным графитом и меры борьбы с ним . . . . .</b>	<b>157</b>
1. Смешанная структура шаровидного и пластинчатого графита . . . . .	157
2. Черные пятна . . . . .	159
3. Усадочные раковины и усадочная пористость . . . . .	163
4. Горячие трещины . . . . .	165
5. Холодные трещины . . . . .	167
6. Газовая подкорковая пористость . . . . .	168
Литература . . . . .	169

## ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
52	19-я сверху	никеля	магния
52	20-я сверху	(85% Mg и 15% Ni)	(85% Ni и 15% Mg)
53	3-я снизу	$T$	$\Delta T$
75	Табл. 24, 6-я графа	$a_K$ в $кГм/см^2$	$a_K$ в $кГм$ (по Изоду)
120	7-я сверху	$\sigma$	$\delta$

Н. И. Клочнев «Технология производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом». Зак. 822.

## ВВЕДЕНИЕ

В 1946 г. был разработан новый технологический процесс получения чугуна с шаровидным графитом, позволивший резко повысить прочностные свойства чугуна. Этот процесс заключался в том, что расплавленный чугун перед заливкой в литейные формы обрабатывался небольшими количествами церия.

Затем, в качестве сфероидизатора начали применять магний, что значительно повысило не только прочностные, но и пластические свойства чугуна в литом состоянии [1].

Последующие исследования привели к тому, что при помощи соответствующей термической обработки оказалось возможным получать чугун с различной структурой металлической основы, что расширило область применения нового конструкционного материала.

В настоящее время получают чугун с шаровидным графитом, имеющий предел прочности при растяжении выше  $100 \text{ кг/мм}^2$ , относительное удлинение до 20% и ударную вязкость до  $10 \text{ кгм/см}^2$ .

Проведенные исследования показали, что помимо высоких прочностных показателей, чугун с шаровидным графитом обладает весьма высокой износостойкостью, хорошими антифрикционными свойствами, высокой окалиностойкостью, ростоустойчивостью и т. п.

Все это позволяет уже теперь применять чугун с шаровидным графитом для многих ответственных деталей в машиностроении, заменяя им в ряде случаев стальные поковки, стальное литье, ковкий чугун и некоторые цветные сплавы. При замене серого чугуна чугуном с шаровидным графитом можно значительно уменьшить толщину стенок деталей, не понижая прочности, и тем самым уменьшить вес машин. В ряде случаев повышается стойкость деталей, отлитых из высокопрочного чугуна взамен серого. Так, например,

стойкость прокатных вальков и изложниц, отлитых из высокопрочного чугуна, возрастает в 2—3 раза.

Однако качество литых деталей зависит не только от механических, но в значительной степени и от его технологических свойств. Показатели механических свойств, определяемые на специальных образцах, могут быть получены в реальных отливках только в том случае, если технология отливки основана на учете хорошо изученных особенностей литейных свойств сплавов.

Литейные свойства оказывают существенное влияние на заполняемость формы, на возможность получения деталей с тонкими стенками сложной конфигурации, на получение отливок без усадочных и газовых раковин с размерами, соответствующими чертежу детали, без трещин, неметаллических включений и других литейных дефектов.

Недостаточный учет особенностей литейных свойств сплавов приводит к литейному браку, что приносит громадные убытки народному хозяйству.

Предотвращение брака литья невысказано без знания литейных свойств и без применения научных методов контроля, позволяющих оценить причины появления тех или иных дефектов и наметить правильные пути предупреждения или их устранения.

Из железоуглеродистых сплавов серый чугун с пластинчатым графитом обладает хорошей жидкотекучестью, незначительной величиной линейной усадки; небольшой склонностью к образованию усадочных раковин, горячих трещин, неметаллических включений; незначительной величиной напряжений и небольшой склонностью к образованию холодных трещин.

Модифицированный чугун с пластинчатым графитом в сравнении с серым чугуном имеет несколько пониженную жидкотекучесть, повышенную объемную и линейную усадку, повышенную величину литейных напряжений.

Белый чугун обладает меньшей жидкотекучестью, большей величиной линейной усадки, большей склонностью к образованию уса-

дочных раковин, значительной склонностью к образованию горячих и холодных трещин.

Углеродистая сталь имеет большую склонность к образованию усадочных раковин и горячих трещин, что создает значительные затруднения при производстве стальных деталей.

Что же касается чугуна с шаровидным графитом, то систематические исследования показали, что одни его литейные свойства аналогичны свойствам серого чугуна, другие же аналогичны свойствам стали. Так, например, жидкотекучесть чугуна до и после обработки магнием почти одинакова, оставаясь значительно выше жидкотекучести стали, что является существенным преимуществом чугуна, как литейного материала. Чугун с шаровидным графитом, имея небольшую склонность к образованию горячих трещин, также выгодно отличается от стали.

Затрудненная линейная усадка чугуна с шаровидным графитом аналогична линейной усадке серого чугуна и значительно ниже линейной усадки стали. Это оказывает благоприятное влияние на получение меньших напряжений в отливках, хотя воздействие других факторов приводит к тому, что величина напряжений в отливках из высокопрочного чугуна выше, чем в аналогичных отливках из серого чугуна.

Чугун с шаровидным графитом обладает большой склонностью к образованию усадочных раковин аналогично стали и белому чугуну. Для предупреждения их возникновения следует устанавливать прибыли и холодильники.

Обработка чугуна магнием уменьшает образование газов в отливках, но увеличивает количество неметаллических включений — «черных пятен», которые значительно снижают прочностные свойства чугуна.

Акад. А. А. Бочвар установил, что литейные свойства зависят от интервала кристаллизации сплава.

Так как величина температурного интервала кристаллизации зависит прежде всего от состава сплава, то по диаграмме состояния можно заранее предугадать литейные свойства: склонность к обра-

зованию усадочных раковин или усадочной пористости, степень ликвации, степень жидкотекучести, склонность к образованию горячих трещин и т. п.

Чистые металлы и эвтектические сплавы, у которых температурный интервал кристаллизации практически равен нулю, склонны к образованию сосредоточенных усадочных раковин, в то время как доэвтектические сплавы, имеющие широкий температурный интервал кристаллизации, склонны к образованию рассеянной усадочной пористости.

Высокопрочный чугун эвтектического состава кристаллизуется в очень узком интервале температур, поэтому при затвердевании в нем образуются сосредоточенные усадочные раковины.

В чугуне доэвтектического состава температурный интервал кристаллизации значительно шире, чем в чугуне эвтектического состава и при кристаллизации образуются сильно разветвленные дендриты аустенита, глубоко проникающие внутрь жидкости. При взаимной встрече и переплетении растущих дендритов жидкость между их ветвями оказывается замкнутой. При застывании этой жидкости происходит усадка и образование местных усадочных раковин. Количество таких мелких раковин бывает очень большим, в результате чего чугун в средней части отливки имеет вид рыхлой, пористой массы, называемой зоной усадочной рыхлоты или усадочной пористости.

От величины температурного интервала кристаллизации зависит и жидкотекучесть сплава. Чистые металлы или сплавы с очень узким интервалом кристаллизации обладают максимальной жидкотекучестью, так как при кристаллизации образуются мало разветвленные дендриты с утолщенными осями. Течение жидкости в этом случае происходит сравнительно свободно и осуществляется хорошее заполнение литейной формы. В сплавах с широким интервалом кристаллизации жидкотекучесть значительно меньше.

От величины интервала кристаллизации в значительной степени зависит ликвация сплава. Как известно, причиной внутрикристаллической ликвации является разность между концентрациями

компонентов в застывающей жидкости и образовавшихся кристаллах. Поэтому, чем шире интервал кристаллизации, тем более будет проявляться внутрикристаллическая ликвация.

Склонность сплавов к образованию горячих трещин, возникающих при затрудненной усадке, также в значительной степени зависит от интервала кристаллизации. В сплавах с большим интервалом кристаллизации имеется большой перепад температур между различными зонами сплава в тот период, когда сплав находится в твердо-жидком состоянии и когда легче всего образуются горячие трещины. Наоборот, чем меньше интервал кристаллизации, тем меньше склонность сплава к образованию горячих трещин, так как перепад температур в этом случае незначителен и отливка застывает более равномерно.

Одной из существенных литейных характеристик сплавов является температура плавления (затвердевания), которая у чугуна изменяется в довольно широких пределах в зависимости от его состава и главным образом в зависимости от содержания углерода в чугуне. При низком содержании углерода, характерном для ковкого чугуна, температура плавления выше, чем при более высоком содержании углерода, характерном для чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом. В сравнении с углеродистой сталью чугун с шаровидным графитом имеет более низкую температуру плавления, что в значительной мере упрощает технологию отливки деталей из этого чугуна.

Для получения качественных отливок большое значение имеет температура чугуна при заливке форм. При высокой температуре заливки повышается жидкотекучесть сплава, происходит лучшее заполнение литейной формы, образуется меньше газовых раковин и неметаллических включений, а в чугуне с шаровидным графитом при более высокой температуре заливки образуется меньшее количество усадочных раковин. Поэтому в производственных условиях всегда стремятся заливать чугун, обработанный магнием при более высокой температуре.

Специфические особенности литейных свойств чугуна с шаровид-

ным графитом не позволяют ориентироваться только на использование хорошо известных принципов, применяемых при отливке деталей из серого чугуна и стали и требуют разработки также специфического технологического процесса литья.

При разработке технологического процесса производства отливок из чугуна с шаровидным графитом большое внимание уделяется выбору плоскости разъема моделей в связи с большой склонностью этого чугуна к образованию черных пятен и опасностью образования дефектов усадочного происхождения.

Расчет элементов литниковой системы, определение места подвода металла к отливке, определение количества и размеров прибылей для отливки из чугуна с шаровидным графитом имеют специфические особенности, связанные с особенностями его литейных свойств.

Особое место при производстве отливок из чугуна с шаровидным графитом занимают вопросы плавки чугуна и обработки его сфероидизирующими присадками. В виду того что в настоящее время имеется много способов обработки чугуна магнием, выбор наиболее приемлемого способа часто представляет значительные трудности, тем более, что в периодической литературе по этому вопросу имеются разноречивые мнения.

Наконец, большое значение имеют вопросы, связанные с выявлением дефектов в отливках из чугуна с шаровидным графитом и мерами их предотвращения.

В связи с изложенным, в данной книге рассматриваются литейные свойства чугуна с шаровидным графитом, технология литейной формы, плавка чугуна и обработка его сфероидизирующими присадками, специфические особенности заливки форм, термическая обработка литья, основные виды брака отливок и меры борьбы с ним.

Материалы, включенные в книгу, изложены на основе исследований автора, проведенных в ЦНИИТМАШ, а также данных других советских и зарубежных исследований и опыта литейных цехов, освоивших производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Глава V написана канд. техн. наук И. О. Цыпиным.

## ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

### I. ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ

Управление процессом заполнения литейных форм расплавленным металлом и изучение влияния этого процесса на качество отливок представляет весьма трудную задачу, так как при течении металла по литниковым каналам и в литейной форме происходят сложные физико-химические явления, непрерывно изменяющие свойства металла, от которых, в свою очередь, зависит качество отливки.

Как показали многочисленные исследования, качество отливок зависит не только от свойств металла в твердом состоянии, но в значительной мере и от свойств жидкого сплава, поэтому изучение свойств сплавов в жидком состоянии имеет большое практическое значение.

До последнего времени считали, что жидкости резко отличаются от твердых тел расположением атомов, и проводили аналогию между жидким и газообразным состоянием.

Новая теория [2] проводит аналогию между жидким и твердым состоянием при температурах, близких к точке кристаллизации. При этих температурах состояние жидкости характеризуется, так называемым, ближним порядком в относительном расположении атомов, характерным для соответствующих кристаллов.

Расположение атомов в жидкости при указанных выше температурах не является совершенно беспорядочным, как в газе, а сходно с правильным расположением, в которое оно переходит при кристаллизации этой жидкости.

В связи с этим различия в отношении плотности, сил сцепления и характера теплового движения в твердом и жидком состоянии очень незначительны. Что же касается величины текучести и степени порядка, то эти факторы в твердом и жидком состоянии имеют существенные различия.

При нагревании твердых тел степень порядка в расположении атомов уменьшается и чем выше температура, тем разупорядочение становится все большим, особенно по мере приближения к температуре плавления.

Наиболее заметная разница между твердыми телами и жидкостью заключается в величине текучести, т. е. способности изменять свою форму без изменения объема.

Если металлы в твердом состоянии при нормальной температуре обладают совсем незначительной текучестью, причем эта текучесть выражается в пластической деформации под действием больших усилий, то при достижении температуры плавления текучесть резко возрастает.

Текучесть жидкости имеет вполне определенный физический смысл — она определяется величиной обратной вязкости

$$\varphi = \eta^{-1},$$

где  $\varphi$  — текучесть жидкости;

$\eta$  — динамическая вязкость.

Вязкость металлов и сплавов, т. е. внутреннее трение между соседними слоями жидкости при относительном смещении этих слоев, определяется из следующего уравнения:

$$\eta = \frac{P}{S} \frac{dv}{dy} \text{ г/см} \cdot \text{сек (пуаз)},$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость в  $\text{г/см} \cdot \text{сек}$ ;

$P$  — сила взаимодействия между частицами (сила внутреннего трения) в  $\text{г} \cdot \text{см/сек}^2$ ;

$S$  — поверхность скользящих слоев в  $\text{см}^2$ ;

$\frac{dv}{dy}$  — градиент скорости сдвига слоев в  $1/\text{сек}$ .

Кинематическая вязкость жидкости выражается уравнением

$$\nu = \frac{\eta}{d} \text{ см}^2/\text{сек (стокс)},$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость;

$d$  — плотность жидкости;

$\eta$  — динамическая вязкость

и представляет собой динамическую вязкость, поделенную на удельный вес жидкости.

Определение вязкости производится на основе законов течения жидкости в капиллярных трубках или же путем изучения колебаний тел, взвешенных в жидкости. Вязкость по первому методу определяется по скорости истечения жидкости через капиллярную трубку при постоянном давлении.

Объем жидкости, вытекающей за  $t$  сек. через трубку радиусом  $r$  см и длиной  $l$  см, определяется согласно закону Пуазейля

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \cdot \frac{p_2 - p_1}{l} t,$$

где  $V$  — объем жидкости в  $\text{см}^3$ ;

$r$  — радиус трубки в  $\text{см}$ ;

$p_2 - p_1$  — разность давлений на концах капиллярной трубки, в динах на  $\text{см}^2$ .

Из формулы следует, что количество жидкости, протекающей через трубку, прямо пропорционально радиусу трубки в четвертой степени и падению давления и обратно пропорционально коэффициенту вязкости.

При определении вязкости по методу колебаний жидкости сообщается вращательное движение, и коэффициент вязкости вычисляется из наблюдаемого логарифмического декремента затухания (логарифм отношения амплитуд двух следующих друг за другом качений), который пропорционален  $\sqrt{\eta d}$ , где  $\eta$  — динамическая вязкость:  $d$  — плотность жидкости.

Динамическая вязкость оказывает влияние как на получение отливок без газовых раковин и неметаллических включений, так и на характер течения металла (ламинарный или турбулентный). Чем больше динамическая вязкость, тем больше количество газов и неметаллических включений может остаться в затвердевшей отливке. Это следует из уравнения Стокса

$$U = \frac{2}{9} g \frac{1}{\eta} r^2 (d_m - d_{вкл}) \text{ см/сек},$$

где  $U$  — скорость всплываний включений в  $\text{см/сек}$ ;

$g$  — ускорение силы тяжести в  $\text{см/сек}^2$ ;

$\eta$  — динамическая вязкость в  $\text{г/см}\cdot\text{сек}$ ;

$r$  — радиус включений в  $\text{см}$ ;

$d_m$  — плотность металла в  $\text{г/см}^3$ ;

$d_{вкл}$  — плотность включений в  $\text{г/см}^3$ .

Кинематическая вязкость оказывает влияние в основном на характер движения металла, особенно в каналах малого сечения.

По различным данным динамическая и кинематическая вязкость выражаются величинами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Температура материала при испытании в град.	Температура перегрева в град.	Динамическая вязкость в $\text{г/см}\cdot\text{сек}$	Кинематическая вязкость в $\text{см}^2/\text{сек}$
Вода . . . . .	+20	—	0,0102	0,01020
Ковкий чугун (3,1% С) . . .	1340	30	0,0265 0,0190	0,00379 0,00276
Серый чугун (4% С) . . . .	1250	100	0,0210	0,00317
Сталь (0,3% С) . . . . .	1535	25	0,0285	0,00407
	1555	45	0,0260	0,00375
	1610	100	0,0230	0,00339
Шлак . . . . .	1300—1400	—	0,5—30,0	—

Как видно из табл. 1 динамическая вязкость чугуна примерно в два раза выше вязкости воды, а кинематическая вязкость чугуна почти в четыре раза ниже вязкости воды.

Влияние динамической и кинематической вязкости на характер течения металла в форме (ламинарный или турбулентный) определяется критическим значением числа Рейнольдса

$$\text{Re}_{кр} = \frac{U_{кр}D}{\nu},$$

где:  $\text{Re}_{кр}$  — число Рейнольдса (безразмерное);

$D$  — диаметр канала в см;

$U_{кр}$  — скорость движения (критическая) в см/сек;

$\nu$  — кинематическая вязкость в см<sup>2</sup>/сек.

Ламинарный характер движения жидкости в канале сохраняется до тех пор, пока скорость жидкости не превысит скорость, определяемую критическим значением числа Рейнольдса. Если  $\text{Re}_{кр}$ , вычисленное по приведенной формуле, больше скорости движения жидкости по каналу, то поток сохраняет ламинарный характер. Если же  $\text{Re}_{кр}$  меньше скорости движения жидкости, то поток будет иметь турбулентный характер. Таким образом, чем больше вязкость, тем большая скорость движения жидкости может быть допущена, не меняя ламинарного характера движения.

Для оценки характера движения металла в каналах часто пользуются уравнениями гидравлики, при этом необходимые расчетные данные о величине динамической и кинематической вязкости и чисел Рейнольдса принимаются исходя из того, что сплавы находятся полностью в жидком состоянии. Между тем, при течении сплавов по литниковым каналам состояние сплава непрерывно меняется в связи с понижением его температуры и с появлением в нем твердых кристаллов, которые изменяют его физические свойства: текучесть, вязкость, поверхностное натяжение. Поэтому применять уравнения гидравлики в этом случае по-видимому можно лишь с некоторыми ограничениями.

Течение сплавов по литниковым каналам и в литейной форме определяется их жидкотекучестью.

Исследованиям жидкотекучести цветных металлов и сплавов, стали и серого чугуна посвящено довольно много отечественных и зарубежных работ [3] — [11].

В большинстве опубликованных работ жидкотекучесть определяется как способность металлов и сплавов заполнять литейную форму. Что же касается факторов, определяющих жидкотекучесть, то в этом вопросе нет единой точки зрения.

По мнению одних авторов жидкотекучесть определяется как величина, обратная вязкости. Другие авторы считают, что жидкотекучесть определяется такими физическими свойствами как вязкость и поверхностное натяжение. Третья группа авторов считает, что ни вязкость, ни поверхностное натяжение не оказывают существенного влияния на жидкотекучесть.

При экспериментальном определении жидкотекучести чугуна жидкий металл заливается под постоянным гидростатическим давлением в литейную форму, имеющую канал обычно в виде спирали

постоянного сечения. Длина заполненной части канала и характеризует жидкотекучесть данного сплава.

Совершенно очевидно, что длина заполненной части канала зависит как от свойств металла, так и от свойств формы и от условий заливки.

Естественно возникает вопрос о том, существует ли зависимость между длиной спирали, полученной при таком испытании, и жидкотекучестью, как способностью заполнять литейную форму? Можно ли сказать, что сплав, дающий более длинные спирали при испытании на жидкотекучесть, будет лучше заполнять литейную форму? К сожалению, как показывает практика, такого вывода сделать нельзя. Тем не менее эта технологическая проба широко применяется при исследованиях жидкотекучести, так как все же позволяет сделать сравнительные выводы о степени жидкотекучести различных сплавов при заливке в одинаковых условиях, по аналогии с испытанием образцов на механические свойства, которые хотя и не дают одновременно представления о качестве металла образца и качества отливки в толстом и тонком сечении, однако все же дают возможность получить сравнительную характеристику качества сплавов при их затвердевании в одинаковых условиях.

Результаты определения жидкотекучести позволили установить некоторые закономерности и выразить их в виде определенных зависимостей.

Для определения жидкотекучести серого чугуна Н. Г. Гиршович предложил следующую формулу [3]:

$$\lambda = v\tau = k_1 v \frac{Rd}{\alpha} \cdot \frac{c(t_{жс} - t_0) + mL}{t_m - t_f} = k \frac{Rd}{\alpha} \cdot \frac{c(t_{жс} - t_0) + mL}{t_m - t_f},$$

где  $v$  — средняя скорость движения металла в форме в  $см/сек$ ;

$\tau$  — время течения в сек;

$R$  — приведенная толщина отливки или пробы на жидкотекучесть в  $см$ ;

$d$  — уд. вес металла в  $г/см^3$ ;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в  $кал/см^2 сек. ^\circ C$ ;

$c$  — теплоемкость металла в  $кал/г ^\circ C$ ;

$t_{жс} - t_0$  — перегрев над температурой нулевой текучести в град.;

$m$  — относительное количество твердой фазы, при котором наступает нулевая текучесть;

$L$  — скрытая теплота кристаллизации в  $кал/г$ ;

$t_m - t_f$  — переменная разность температур между металлом и формой;

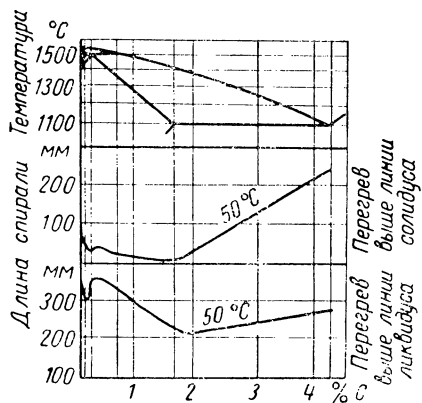
$k_1$  и  $k$  — коэффициенты пропорциональности.

Эта формула дает зависимость жидкотекучести в основном от температурных факторов, условий теплообмена между металлом и формой и от приведенной толщины отливки. Автор указывает, что главную роль играет период движения металла в форме до достижения температуры ликвидуса.

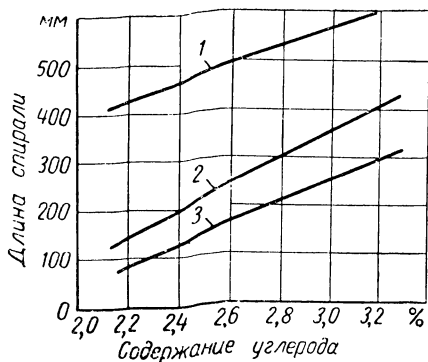
Проведенные исследования показали, что величина жидкотекучести зависит от вида диаграммы состояния.

На фиг. 1 показана связь жидкотекучести с диаграммой состояния для чугуна, а на фиг. 2 зависимость жидкотекучести от температуры чугуна [12].

Рассмотрение диаграмм состояния и кривых жидкотекучести показывают, что максимальной жидкотекучестью обладают сплавы,



Фиг. 1. Связь жидкотекучести с диаграммой состояния.



Фиг. 2. Зависимость жидкотекучести от температуры чугуна:

1 — температура чугуна 1650°; 2 — температура чугуна 1540°; 3 — температура чугуна 1430°.

затвердевающие в узком температурном интервале, а минимальной жидкотекучестью — сплавы, затвердевающие в широком температурном интервале.

Основное влияние на жидкотекучесть сплава оказывает его теплосодержание. Чем больше теплосодержание, тем дольше металл находится в жидком состоянии, тем дольше не прекращается его течение в форме. Для чугуна одного и того же состава теплосодержание зависит главным образом от температуры чугуна при заливке.

Из рассмотрения таких свойств жидких сплавов как текучесть, вязкость и жидкотекучесть следует, что определение вязкости (и обратной ей величины текучести) и жидкотекучести производится совершенно различными методами.

Анализ характера движения металла в канале технологической пробы для определения жидкотекучести показал, что это движение носит турбулентный характер, при котором зависимость потерь от числа Рейнольдса незначительна, следовательно незначительно и влияние вязкости на жидкотекучесть.

Проведенные в последнее время экспериментальные исследования вязкости, жидкотекучести и поверхностного натяжения применительно к цветным сплавам показали, что ни вязкость, ни поверх-

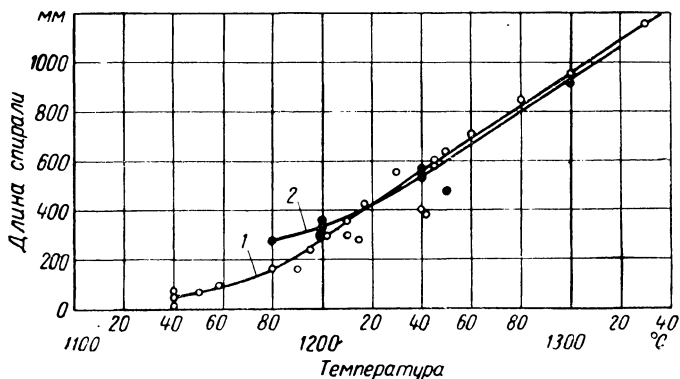
ностное натяжение не оказывают существенного влияния на жидкотекучесть [13].

При определении жидкотекучести нами исследовался чугун доэвтектического, эвтектического и заэвтектического состава, до и после обработки его магнием.

Жидкотекучесть определялась по длине заполненной части спирали сечением  $50 \text{ мм}^2$  и длиной  $1500 \text{ мм}$  [14].

Кривые изменения жидкотекучести чугуна показаны на фиг. 3.

Кривые показывают, что жидкотекучесть чугуна с шаровидным и пластинчатым графитом практически одинаковы.



Фиг. 3. Зависимость жидкотекучести от температуры чугуна при заливке:

1 — чугун с шаровидным графитом; 2 — чугун с пластинчатым графитом.

В табл. 2 приведены данные о жидкотекучести чугуна, обработанного никельмагниевогой лигатурой [15].

Таблица 2

Плавка	Лигатура в %	Химический состав в %						$\sigma_b$ в кг/мм <sup>2</sup>	Длина спирали в мм
		C	Si	Mn	P	S	Ni		
I	0,0	3,68	1,69	0,79	0,22	0,110	0,06	22	510
II	0,3	3,67	1,65	0,70	0,21	0,075	0,08	24	320
III	0,6	3,63	1,65	0,75	0,22	0,070	0,11	28	200
IV	1,25	3,45	1,81	0,72	0,22	0,060	0,32	46	50
V	1,45	3,42	2,10	0,70	0,22	0,032	0,33	69	140

Автор делает вывод, что жидкотекучесть ваграночного чугуна, обработанного магниевой лигатурой, быстро уменьшается вследствие понижения температуры при обработке магнием.

18 испытаний на жидкотекучесть дали для исходного чугуна среднюю длину спирали  $916 \text{ мм}$ , а для чугуна со сфероидальным графитом  $870 \text{ мм}$  [16].

Несмотря на довольно вязкий вид поверхности, чугун с шаровидным графитом имеет большую жидкотекучесть и дает возможность отливать тонкостенные детали при сравнительно низких температурах, в особенности в тех случаях, если содержание углерода находится в пределах 3,3—3,8%. В цеховых условиях отливают детали толщиной 3,2 мм при температуре 1260° [17]. Прутки толщиной 3,2 мм отливают длиной до 800 мм. Этим пользуются при изготовлении сварочных прутков из магниевого чугуна [18].

На величину жидкотекучести оказывает значительное влияние химический состав чугуна. С повышением содержания углерода в доэвтектическом чугуне жидкотекучесть увеличивается, так как при этом сокращается интервал кристаллизации и чугун приближается к эвтектическому составу. С повышением содержания углерода в заэвтектическом чугуне жидкотекучесть ухудшается, так как при этом увеличивается интервал кристаллизации. Точно так же действует кремний и фосфор. При особенно низком содержании кремния и незначительном перегреве жидкотекучесть чугуна резко снижается.

При наличии в чугуне значительного количества серы марганец вступает с ней в соединение, образуя  $MnS$ . Тугоплавкие частицы  $MnS$ , находясь во взвешенном состоянии, сильно уменьшают жидкотекучесть.

Таким образом, чугун, обработанный магнием, имеет хорошую жидкотекучесть и при соответствующей температуре им можно заливать весьма тонкостенные детали.

## 2. УСАДКА

Расплавленный чугун, залитый в литейную форму, постепенно охлаждается до комнатной температуры с уменьшением объема и линейных размеров.

При переходе металла из жидкого состояния в твердое наряду с ближним порядком в относительном расположении атомов устанавливается дальний порядок, характерный для кристаллических тел. При этом расстояние между соседними атомами уменьшается, вследствие чего происходит уменьшение объема и линейных размеров отливки, называемое усадкой.

Усадка чугуна оказывает весьма существенное влияние на качество отливок, поэтому при разработке конструкций литых деталей и технологического процесса литья необходимо учитывать особенности усадки и по возможности устранять отрицательные ее последствия.

Это в особенности относится к чугуну с шаровидным графитом, так как процесс усадки такого чугуна отличается от процесса усадки других сплавов, в том числе и от обычного серого чугуна с пластинчатым графитом.

Процесс усадки металлов и сплавов происходит в жидком состоянии, при переходе из жидкого состояния в твердое и в твердом состоянии.

Важнейшим следствием усадки чугуна с шаровидным графитом в жидком состоянии и при переходе из жидкого состояния в твердое является образование усадочных раковин и усадочной пористости.

Определение объема усадочных раковин может быть произведено несколькими способами.

а) **Метод непосредственного измерения объема усадочной раковины.** При этом способе отливку разрезают и полость усадочной раковины заполняют керосином или сухим песком. Объем керосина или песка, пошедшего на заполнение усадочной раковины, и определяет ее объем.

б) **Пикнометрический метод.** Тигель известного объема погружают в ковш с расплавленным чугуном и после достижения температурного равновесия плотно закрывают его крышкой и в таком положении извлекают из ковша.

После полного охлаждения полученного слитка его взвешивают при нормальной температуре и определяют удельный объем делением объема тигля при температуре отбора чугуна на вес полученного слитка.

Объемная усадка чугуна в жидком состоянии определяется как разность удельных объемов при требуемой температуре в жидком состоянии и при температуре ликвидуса (начало затвердевания). Таким образом изменение объема в жидком состоянии определяется формулой:

$$V_{\text{жидк.}} = V_{\text{уд. (жидк.)}} - V_{\text{уд. (ликв.)}}$$
$$V_{\text{уд. (жидк.)}} = \frac{V_{\text{тигля}} \text{ (при данной температуре)}}{\Theta_{\text{слитка}} \text{ (вес слитка при нормальной температуре)}}$$
$$V_{\text{уд. (ликв.)}} = \frac{V_{\text{тигля}} \text{ (при температуре ликвидуса)}}{\Theta_{\text{слитка}} \text{ (вес слитка при нормальной температуре)}}$$

Температура чугуна в жидком состоянии определяется при отборе пробы платина — платинородиевой термпарой.

Температура ликвидуса для чугуна данного состава определяется экспериментальным путем.

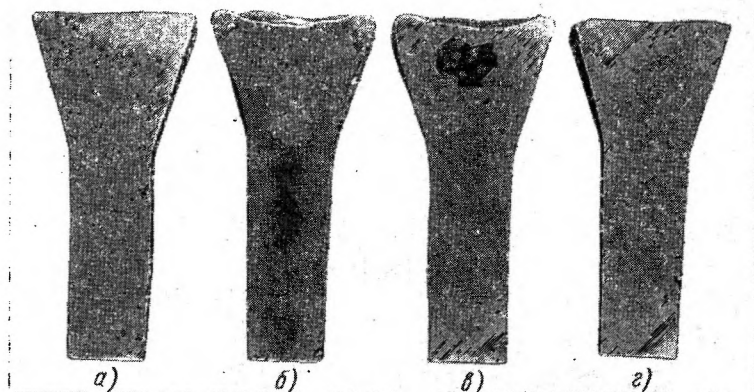
Объем тигля при нормальной температуре определяется по весу ртути, налитой в него при плотно закрытой крышке. Объем тигля при температуре отбора проб определяется по коэффициенту теплового расширения графита.

Как показали экспериментальные исследования, объем усадочных раковин в отливках из чугуна зависит в значительной мере от процесса выделения графита.

Небольшая склонность серого чугуна к образованию усадочных раковин объясняется тем, что выделение графита при эвтектической кристаллизации, сопровождающееся увеличением объема, способствует уменьшению объема усадочной раковины, а иногда и полному ее устранению.

В белом чугуном в процессе формирования усадочной раковины графит не выделяется, поэтому в отливках образуются усадочные раковины и усадочная пористость значительного объема.

В отличие от серого чугуна с пластинчатым графитом чугуном с шаровидным графитом обладает большей склонностью к образованию усадочных раковин. Одинаковые детали, отлитые по одной и той же технологии из чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом, неизменно показывают отсутствие усадочных раковин в первом случае и наличие их во втором. Наглядным подтверждением сказанному служат результаты следующего опыта.



Фиг. 4. Образцы, залитые чугуном:

*a* — до обработки чугуна магнием; *b* — после обработки магнием; *v* — после обработки чугуна магнием и ферросилицием; *z* — после испарения магния из чугуна.

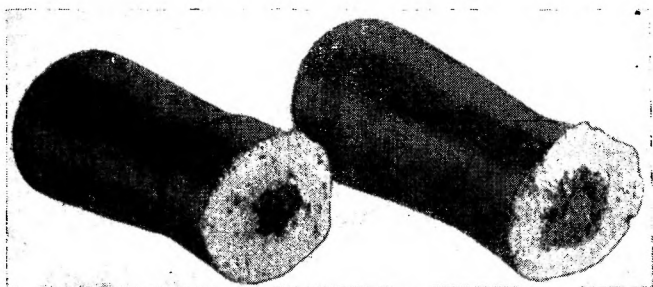
Чугуном с пластинчатым графитом был залит образец, показанный на фиг. 4, *a*. Излом образца был серый. В отливке, как видно из фигуры, усадочная раковина отсутствует. Затем этот чугун был обработан магнием. В изломе такой чугуном был белым, а в отливке имелась усадочная пористость (фиг. 4, *b*). Затем жидкий чугун был обработан ферросилицием. Структура чугуна после этого была характерной для высокопрочного чугуна — излом имел стальной цвет, графит имел шаровидную форму, а отливка имела значительную усадочную раковину (фиг. 4, *v*).

Затем жидкий чугун, обработанный магнием и ферросилицием, был нагрет до температуры 1500°, выдержан при этой температуре в течение 20 мин. и залит в форму. Графит в таком чугуном вновь приобрел пластинчатую форму, так как магний весь испарился, чугуном приобрел характерный для серого чугуна излом и усадочной раковины в отливке не было обнаружено (фиг. 4, *z*).

Чугун с шаровидным графитом склонен к образованию сосредоточенных усадочных раковин и сосредоточенной усадочной пори-

стости. Наибольший объем сосредоточенных усадочных раковин образуется в отливках из чугуна, близкого к эвтектическому составу, имеющему очень узкий температурный интервал кристаллизации.

При кристаллизации чугуна доэвтектического состава образуются сильно развитые дендриты аустенита, между их ветвями остается



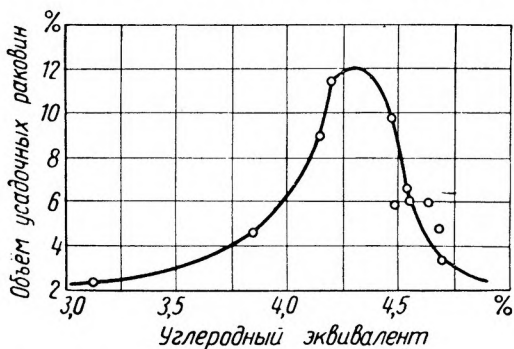
Фиг. 5. Усадочная пористость.

замкнутая жидкость, при затвердевании которой в условиях отсутствия доступа жидкого чугуна образуется пористость. Усадочная пористость хорошо видна даже невооруженным глазом в центральных частях цилиндрических отливок, так как образующиеся на наружных частях отливок дендриты, проникая к центру, становятся менее разветвленными, а при взаимной их встрече образуются значительные не полностью замкнутые пространства между дендритами, дающие возможность жидкости стекать вниз, обнажая ветви дендритов (фиг. 5).

Объем усадочных раковин в отливках из чугуна с шаровидным графитом зависит в значительной степени от углеродного эквивалента (фиг. 6).

В заэвтектическом чугуне объем сосредоточенных усадочных раковин увеличивается по мере уменьшения углеродного эквивалента, достигая максимальной величины у чугуна, имеющего состав, близкий к эвтектическому. Уменьшение углеродного эквивалента в доэвтектическом чугуне приводит к уменьшению объема сосредоточенных усадочных раковин.

Существенное влияние на объем усадочных раковин оказывает температура чугуна в момент заливки форм. Опыты показывают,

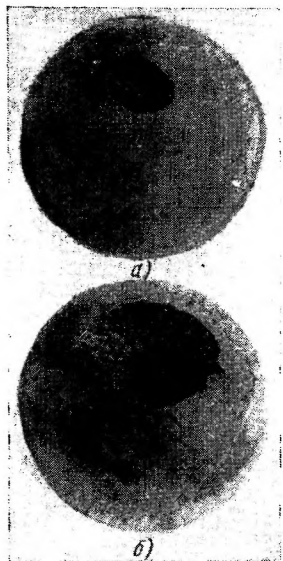


Фиг. 6. Зависимость объема усадочных раковин от углеродного эквивалента.

что чем ниже температура чугуна при заливке форм, тем больше объем усадочных раковин в отливках.

На фиг. 7 показаны два разрезанных шара, залитых при разной температуре чугуном, имеющих один и тот же химический состав.

Шар (а), залитый при температуре 1280°, имел значительно меньший объем усадочной раковины, по сравнению с шаром (б), залитым при температуре 1150°.



Фиг. 7. Усадочные раковины в отливке шаров, залитых чугуном, обработанным магнием:

а — при температуре 1280°;  
б — при температуре 1150°.

В табл. 3 приведены данные об объеме усадочных раковин в отливках из чугуна с шаровидным графитом в зависимости от температуры заливки.

Зависимость объема усадочных раковин от температуры заливки чугуна с шаровидным графитом показана на фиг. 8.

Помимо внутренних и внешних усадочных раковин, расположенных в верхней части отливок, часто образуются утяжины на боковой поверхности (фиг. 9).

Образование боковых поверхностных утяжин вызвано тем, что при формировании усадочных раковин внутри их создается разрежение. Прочность внешней корки отливки в этот момент еще крайне незначительна, и она под действием атмосферного давления вдавливается внутрь усадочной раковины.

На фиг. 10 показана форма усадочной раковины в отливке, на которой ясно видны каналы, соединяющие полость раковины с атмосферой (на отливке с внешней стороны видна впадина, образовавшаяся от воздействия внешнего атмосферного давления).

Прямые эксперименты по определению разрежения, которое образуется в полости усадочной раковины, подтверждают это положение [19], [20].

На фиг. 11 показаны боковые прибыли, питавшие одинаковые по размерам отливки. Как видно, серый чугун (фиг. 11, а) не имеет усадочной раковины; углеродистая сталь (фиг. 11, б) имеет значительную усадочную раковину, как и чугун с шаровидным графитом (фиг. 11, в).

Приведенные примеры со всей убедительностью показывают, что чугун с шаровидным графитом обладает большой склонностью к образованию усадочных раковин, что необходимо учитывать при разработке технологического процесса литья.

Для определения величины и характера протекания линейной усадки металлов и сплавов применяются приборы различных конструкций.

Химический состав в %						Температура чугуна при заливке в °С	Объем уса- дочных раковин в %
C	Si	Mn	S	P	Mg		
3,38	1,87	0,63	0,006	0,11	0,088	1260	9,40
						1240	10,20
						1230	10,50
						1210	11,40
3,07	1,94	0,77	0,007	0,11	0,081	1280	2,70
						1240	5,10
						1230	6,00
						1160	9,70
3,46	2,45	0,68	0,016	0,18	0,080	1320	3,45
						1300	4,71
						1280	5,27
						1240	6,52
2,88	2,23	0,69	0,006	0,26	0,078	1270	1,70
						1236	4,33
						1220	4,76
						1200	6,07
3,45	1,78	0,64	0,021	0,277	0,080	1242	6,10
						1225	7,02
						1210	9,03
						1160	13,50

На фиг. 12 показан прибор конструкции инж. И. Ф. Большакова, несколько усовершенствованный в ЦНИИТМАШе.

Прямоугольный образец размерами 25 × 25 × 300 мм заливается в установленную горизонтально открытую литейную форму. Перед заливкой формы в нее опускаются два вертикальных штифта, один из которых закрепляется в неподвижную, а второй — в подвижную каретку прибора. Обе каретки устанавливаются на раме прибора. Подвижная каретка соединяется с индикатором, показывающим как расширение, так и усадку чугуна.

Для автоматической записи кривой линейной усадки подвижная каретка шарнирно соединена с рычагом, второй конец которого может перемещаться в горизонтальной плоскости по стержню, прикрепленному наглухо к станине прибора. На этом же конце рычага укреплено записывающее перо. На станине прибора укреплен барабан, который вращается вокруг горизонтальной оси при помощи часового механизма. На этот барабан одевается миллиметровая

бумага. В процессе вращения барабана и перемещения пера производится вычерчивание кривой линейной усадки.

Для измерения температуры охлаждающегося образца в форму перед ее заливкой устанавливается платино-платинородиевая термопара. Горячий спай термодпары защищается кварцевым наконечником.

Изменение температуры и изменение размеров образца фиксируется через одни и те же промежутки времени, что позволяет построить кривые «усадка — время» и «температура — время» и совместно их проанализировать.

В ЦНИИТМАШ был создан прибор для определения линейной усадки при помощи проволочных датчиков.

Принцип действия прибора основан на фиксации изменения длины образца в процессе усадки сплава с помощью проволочного датчика на основе изменения его электрического сопротивления.

Проволочный датчик наклеивается на металлическую пластину, соединяемую с исследуемым образцом через посредство стержня, изготовленного из инвара.

Фиг. 8. Зависимость объема усадочных раковин от температуры чугуна при заливке. Углеродный эквивалент:

1 — 4,04%; 2 — 4,14%; 3 — 4,34%; 4 — 3,75%; 5 — 3,71%.

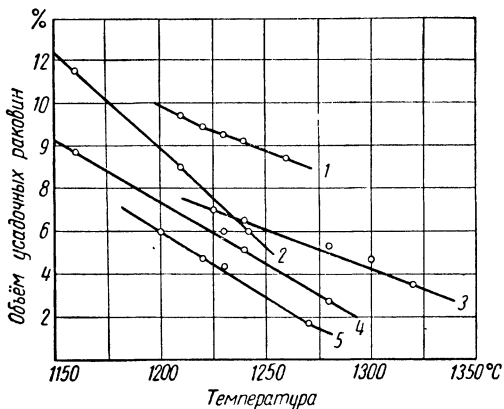
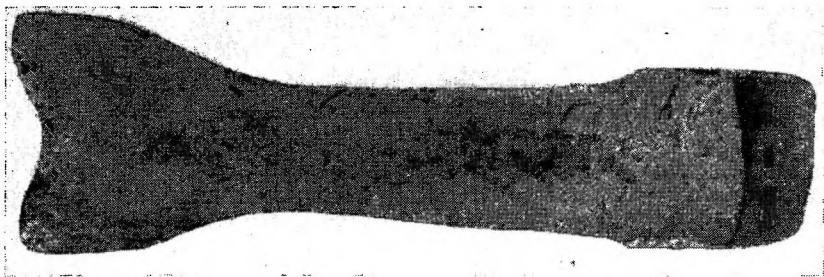


Схема прибора показана на фиг. 13. Изменения длины образца в процессе усадки через стержень передаются на стальную пластину, которая изгибается, а вместе с ней испытывает деформацию и проволочный датчик, расположенный на пластине.

В связи с изменением длины датчика изменяется его электрическое сопротивление, которое фиксируется при помощи измерительного моста и записывается электронным потенциометром, применяемым для записи температур.

Исследования процесса усадки показали, что чугуны с шаровидным и пластинчатым графитом имеют на кривых свободной линейной усадки предусадочное расширение, доперлитную усадку, расширение при перлитном превращении и послеперлитную усадку. Общая величина линейной усадки равна алгебраической сумме доперлитной и послеперлитной усадки, предусадочного расширения и расширения при перлитном превращении.

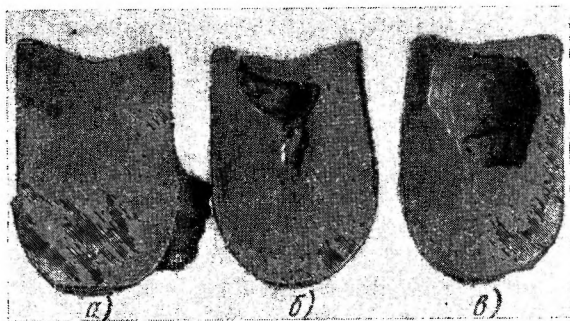
Записанные кривые «усадка — время» (фиг. 14) показали, что предусадочное расширение не обнаружено в углеродистой стали,



Фиг. 9. Внешние усадочные раковины (утяжины).



Фиг. 10. Характерная внутренняя усадочная раковина в шаре, залитом чугуном, обработанном магнием.



Фиг. 11. Усадочные раковины в прибылях:  
а — серый чугун; б — углеродистая сталь; в — чугун с шаровидным графитом.

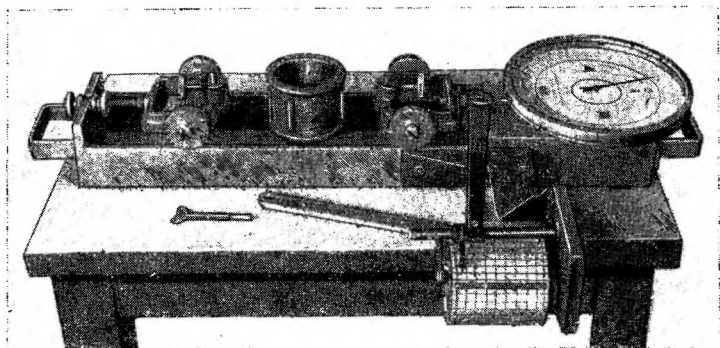
аустенитной стали и в белом чугуна. Чугун с шаровидным графитом имеет предусадочное расширение больше, чем чугун с пластинчатым графитом в 2—3 раза. Химический анализ показал, что чем больше графита в чугуне, тем больше величина предусадочного расширения (табл. 4).

Таблица 4

Содержание графита в %	Величина предусадочного расширения в %
1,50	0,41
1,65	0,43
2,14	0,56
2,26	0,60
2,55	0,65

Таким образом, экспериментально было показано, что предусадочное расширение является следствием выделения графита. Предположения о том, что предусадочное расширение является следствием выделения газов не подтвердились. В работе [21] показано, что образование шаровидного графита не может быть связано непосредственно с содержанием газов в расплаве, так как при одинаково низком содержании кислорода графит, выделившийся в шаровидной форме при введении магния, при введении алюминия выделяется в пластинчатой форме. При вводе больших количеств магния или алюминия содержание кислорода в чугуне понижается примерно одинаково; при малых добавках содержание кислорода зна-

наково низком содержании кислорода графит, выделившийся в шаровидной форме при введении магния, при введении алюминия выделяется в пластинчатой форме. При вводе больших количеств магния или алюминия содержание кислорода в чугуне понижается примерно одинаково; при малых добавках содержание кислорода зна-



Фиг. 12. Общий вид прибора для определения величины и характера протекания линейной усадки.

чительно ниже после обработки магнием, чем алюминием. Усадка же, несмотря на различное содержание газов, в обоих случаях одинаково мала, так как графит в этом случае выделяется в пластинчатой форме. Записи кривых предусадочного расширения чугуна с шаровидным графитом показали, что в чугуне доэвтектического состава величина его возрастает по мере увеличения углеродного эквивалента. Так, например, в чугуне с углеродным эквивалентом 3,85 величина предусадочного расширения соста-

вила 0,55%, а в чугуна с углеродным эквивалентом 4,14 она повысилась до 0,93%.

Что же касается чугуна с шаровидным графитом эвтектического состава, то величина предусадочного расширения в нем мало изменяется составляя 0,55—0,58% при изменении углеродного эквивалента от 4,41 до 4,58.

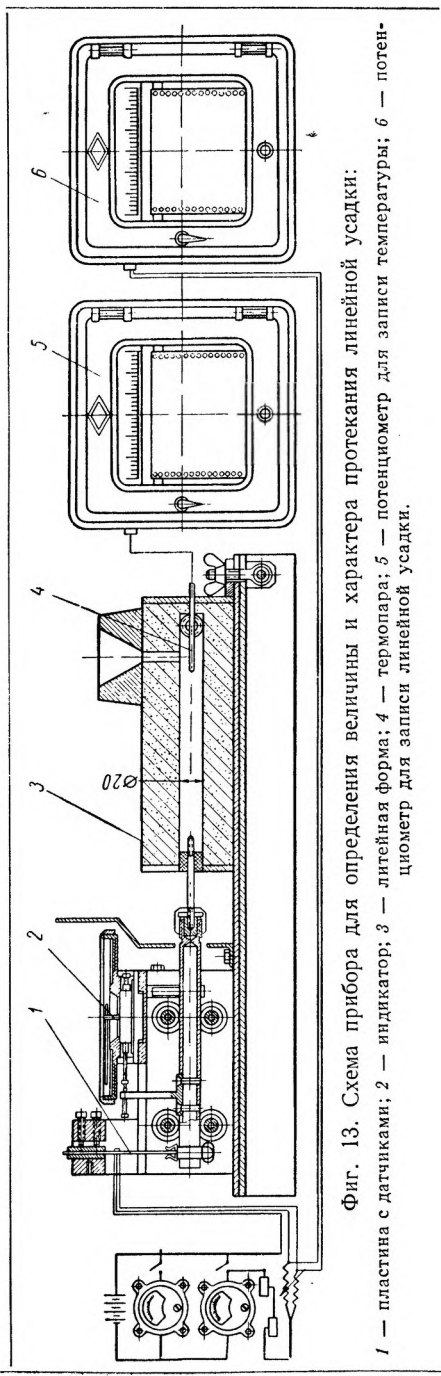
Совместное рассмотрение кривых предусадочного расширения и температурных кривых показывает, что чугун с пластинчатым и шаровидным графитом сходного химического состава имеет существенное различие в ходе кривых, в продолжительности и температуре эвтектической кристаллизации и в величине предусадочного расширения.

На фиг. 15 показаны кривые охлаждения и предусадочного расширения серого чугуна с пластинчатым графитом следующего химического состава: 3,27% С; 2,62% Si; 0,59% Mn; 0,062% S и 0,29% P.

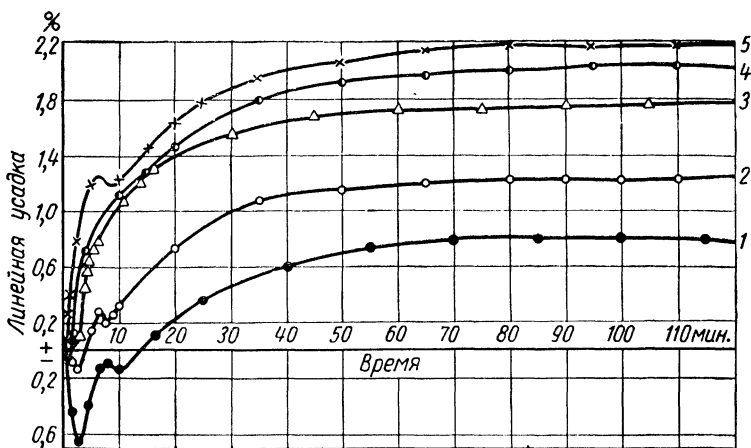
В этом случае расширение образца началось при температуре 1130° и закончилось при температуре 1120°. Температура эвтектической кристаллизации для этого чугуна была равна 1130°. Длительность эвтектической кристаллизации составила 85 сек. Величина предусадочного расширения составила 0,18%.

Расширение началось в начале и закончилось в конце эвтектической температурной остановки.

Кривая охлаждения и линейной усадки показывает, что температурной остановке при эвтектической кристаллизации

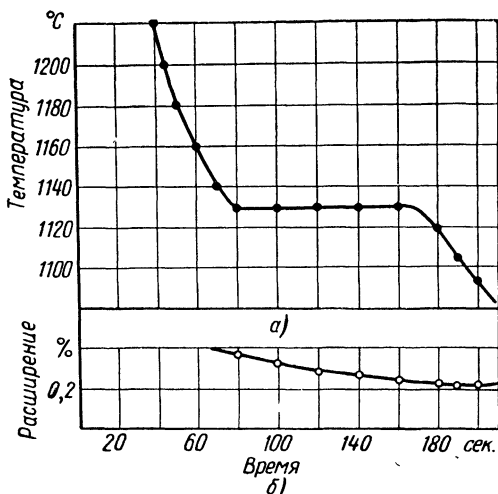


Фиг. 13. Схема прибора для определения величины и характера протекания линейной усадки: 1 — пластина с датчиками; 2 — индикатор; 3 — литейная форма; 4 — термопара; 5 — потенциометр для записи температуры; 6 — потенциометр для записи линейной усадки.



Фиг. 14. Кривые свободной линейной усадки:

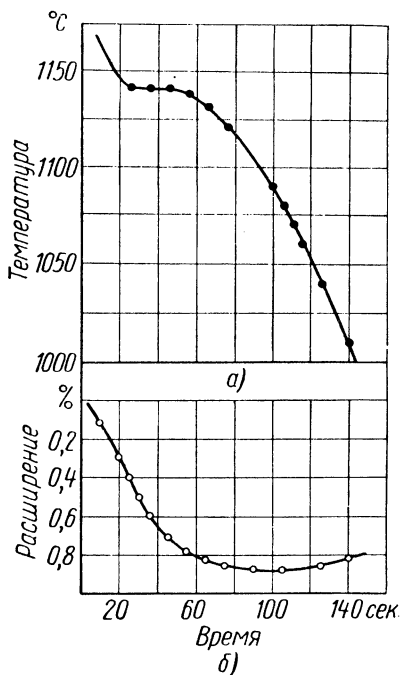
1 — чугун с шаровидным графитом; 2 — чугун с пластинчатым графитом; 3 — графитизированная сталь; 4 — белый чугун; 5 — углеродистая сталь.



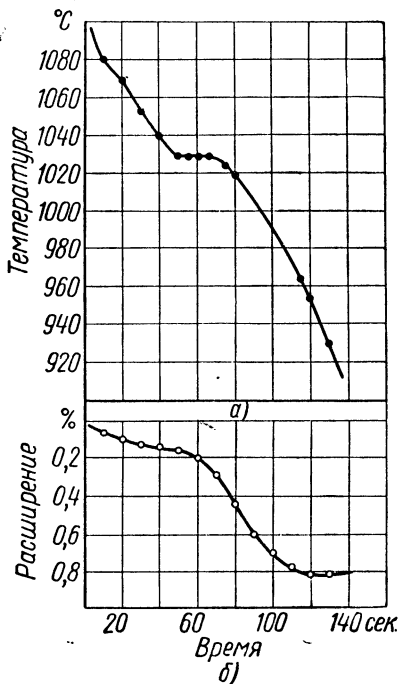
Фиг. 15. Кривые охлаждения (а) и пред-усадочного расширения (б) чугуна с пластинчатым графитом.

соответствует предусадочное расширение на кривой линейной усадки, а температурной остановке при эвтектоидном превращении соответствует вторичное расширение на кривой линейной усадки.

На фиг. 16 показаны кривые охлаждения и предусадочного расширения чугуна с шаровидным графитом следующего химического состава: 3,27% С; 2,43% Si; 0,65% Mn; 0,020% S; 0,086% P; 0,04% Mg (углеродный эквивалент 4,11).



Фиг. 16. Кривые охлаждения (а) и предусадочного расширения (б) чугуна с шаровидным графитом.



Фиг. 17. Кривые охлаждения (а) и предусадочного расширения (б) чугуна, обработанного магнием, имеющего белый излом.

Кривые показывают, что предусадочное расширение происходит до начала эвтектической кристаллизации, в процессе эвтектического превращения и частично в твердом состоянии. Общая величина расширения составляет 0,87%, т. е. примерно в 4 раза больше, чем в чугуне с пластинчатым графитом.

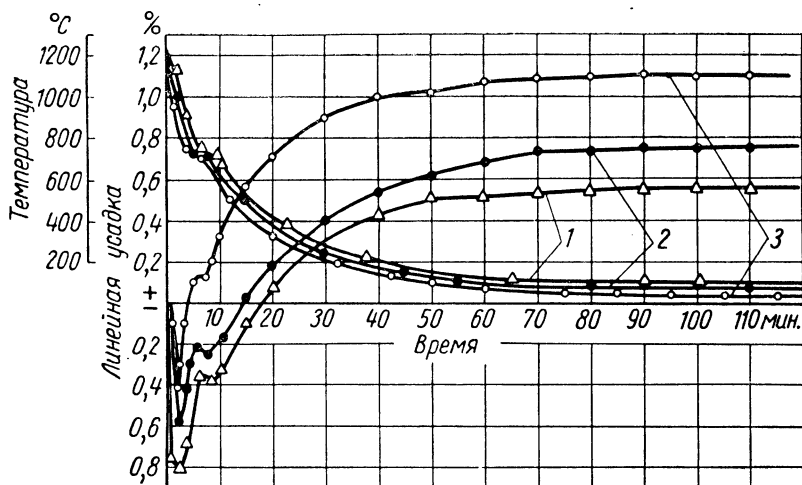
Длительность эвтектической остановки в данном случае составляет 30 сек., т. е. почти в 3 раза меньше, чем в сером чугуне.

В области эвтектоидного превращения на температурной кривой имеется горизонтальная площадка, которой соответствует вторичное расширение на кривой линейной усадки.

На фиг. 17 показаны кривые охлаждения и предусадочного расширения чугуна, обработанного магнием без введения ферросилиция, имеющего эвтектический состав.

Обращает на себя внимание значительное понижение температуры эвтектической кристаллизации до  $1030^{\circ}$ . Длительность эвтектической остановки в данном случае составляет всего 20 сек.

По сравнению с рассмотренным выше случаем здесь резко возросла величина расширения, происходящего в твердом состоянии. На кривой охлаждения горизонтальной площадки при эвтектоидном превращении не обнаружено, точно также не зафиксировано вторичного расширения, соответствующего эвтектоидному превращению.



Фиг. 18. Кривые охлаждения и линейной усадки чугуна с шаровидным графитом, имеющего различный углеродный эквивалент:

1 — 4,11%; 2 — 4,41%; 3 — 3,15%.

На фиг. 18 показаны кривые охлаждения и кривые линейной усадки чугуна с шаровидным графитом, имеющего различный углеродный эквивалент.

Величина доперлитной усадки больше всего у белого чугуна, в котором выделение графита отсутствует. В чугуне с шаровидным и с пластинчатым графитом, в которых происходит процесс выделения графита, величина доперлитной усадки имеет минимальное значение, так как часть ее погашается происходящим в это время расширением, связанным с выделением графита.

Величина доперлитной усадки составляет для белого чугуна 0,7—1,35, для серого чугуна — 0,0—0,4 и для чугуна с шаровидным графитом 0,3—0,6%.

Вторичная задержка линейной усадки происходит в области перлитного превращения. В большинстве случаев перлитное превращение сопровождается увеличением объема и линейных размеров, что наглядно видно из кривых протекания линейной усадки во времени.

Для серого чугуна это увеличение составляет около 0,1%. В белом чугуне при перлитном превращении наблюдается лишь замедление протекания доперлитной усадки.

Перлитное превращение в чугуне с шаровидным графитом сопровождается увеличением объема и линейных размеров.

Изменение объема при перлитном превращении связано с изменением коэффициента упаковки атомов в кристаллических решетках. Известно, что чем выше координационное число (число ближайших соседей атомов), тем больше коэффициент упаковки (который определяется отношением объема атомов, из которых построена кристаллическая решетка, к объему всего кристалла), тем меньше места в решетке приходится на междуатомные промежутки.

Таблица 5

Сплав	Послеперлитная усадка в %
Чугун с шаровидным графитом . . . . .	0,94—1,09
Серый чугун . . . . .	0,94—1,06
Белый » . . . . .	0,92—1,01

При охлаждении отливок ниже температуры солидуса происходит распад аустенита и образование феррита, перлита или феррита и перлита в зависимости от скорости охлаждения в интервале перлитного превращения. При распаде аустенита, имеющего гранецентрированную плотно упакованную пространственную решетку с координационным числом 12, и образовании, например, феррита, имеющего кубическую решетку с координационным числом 8 и коэффициентом упаковки 0,68, и графита, имеющего решетку с координационным числом 6, происходит увеличение объема, которое фиксируется на кривой «усадка — время».

Вслед за окончанием процесса перлитного превращения происходит дальнейшая линейная усадка, которая протекает до полного охлаждения отливки. Так как в этом температурном интервале не происходит аллотропических превращений и выделения графита, изменение линейных размеров отливки в результате понижения температуры определяется коэффициентом линейного расширения и разностью температур.

Сравнивая величину послеперлитной усадки чугуна с шаровидным графитом, серого чугуна и белого чугуна, можно убедиться, что она для всех перечисленных металлов почти одинакова (табл. 5).

Зависимость величины линейной усадки от углеродного эквивалента показана на фиг. 19.

В табл. 6 приведены некоторые данные о величине линейной усадки чугуна с шаровидным графитом, белого и серого чугуна.

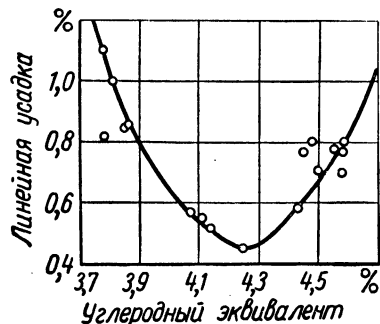
Существенное влияние на величину предусадочного расширения и величину доперлитной усадки оказывает механическое торможение линейной усадки, вызываемое литейной формой.

Уменьшение величины линейной усадки при наличии механического торможения объясняется тем, что в отливке возникают пла-

стические деформации, за счет которых длина образца увеличивается, а линейная усадка уменьшается.

При высоких температурах (от температуры солидуса до  $\sim 620^\circ$ ) в чугуне преобладают пластические деформации, а при более низких температурах преобладают упругие деформации. Если в начальный момент охлаждения отливки, т. е. во время расширения будут созданы условия, препятствующие свободному расширению, то величина последнего может быть резко сокращена или доведена до нуля.

Проведенные исследования показали, что от характера протекания линейной усадки: наличия расширения, скорости протекания и величины доперлитной части усадки, а также от степени торможения усадки зависит склонность железо-углеродистых сплавов к образованию горячих трещин. Сплавы, в которых при кристаллизации происходит расширение, менее склонны к образованию горячих трещин. В тех сплавах, в которых расширение отсутствует, склонность к образованию горячих трещин тем выше, чем больше скорость протекания усадки в начальный момент и чем больше величина доперлитной части усадки.



Фиг. 19. Зависимость величины линейной усадки чугуна с шаровидным графитом от углеродного эквивалента.

При наличии предусадочного расширения в отливке возникают преимущественно не растягивающие, а сжимающие усилия. Кроме того, собственно усадка отливки начинается в более поздний период времени, когда температура значительно понижается, сплав полностью затвердевает и приобретает

Таблица 6

Сплав	Химический состав в %					Линейная усадка в %				
	C	Si	Mn	S	P	Начальное расширение	Доперлитная усадка	Расширение при перлитном превращении	Послеперлитная усадка	Общая усадка
Чугун, модифицированный магнием и ферросилицием	3,05	2,16	0,58	0,002	0,046	0,650	0,55	0,030	0,950	0,82
Белый чугун	3,16	0,52	0,80	0,080	0,090	0,000	1,35	0,000	0,950	2,30
Серый »	3,21	1,87	0,65	0,080	0,190	0,125	0,40	0,075	1,060	1,26

значительную прочность и способность противостоять силам, возникающим при затрудненной усадке.

Результаты экспериментального исследования высокопрочного чугуна с шаровидным графитом показали, что при отсутствии цемента в структуре чугуна склонность его к образованию горячих трещин незначительна. С появлением в структуре чугуна структурно-свободного цемента склонность чугуна к образованию горячих трещин повышается.

### 3. ВНУТРЕННИЕ ЛИТЕЙНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Остывание отливок из чугуна с шаровидным графитом в литейной форме сопровождается изменением объемных и линейных размеров, которые, как правило, протекают неравномерно по сечению и в смежных частях отливки. Эта неравномерность вызывается различной скоростью охлаждения отдельных частей отливки, неодинаковой степенью торможения линейной усадки, фазовыми и структурными превращениями.

При охлаждении отливки усадке массивных частей, застывающих позднее, препятствуют более тонкие части, застывающие значительно ранее массивных, вследствие чего как в массивных, так и в тонких частях возникают напряжения, различные по знаку. В более массивных частях возникают, как правило, растягивающие напряжения, а в более тонких частях — сжимающие.

В отливках с одинаковым сечением внешняя поверхность отливки, соприкасающаяся с формой, охлаждается быстрее внутренней, вследствие чего усадка внутренних и внешних слоев протекает различно, происходит естественное торможение усадки, и в отливке возникают напряжения, причем на поверхности отливки образуются напряжения сжатия, а в центре отливки — напряжения растяжения.

В случае механического торможения усадки, оказываемого литейной формой, возникающие напряжения носят во многих случаях временный характер и почти полностью исчезают при выбивке отливки.

Наконец, напряжения в чугунных отливках возникают вследствие объемных изменений, происходящих при выделении графита и при перлитном превращении.

Для сплава данного химического состава величина напряжений зависит, главным образом, от градиента температур различных частей отливки или наружной и внутренней части одной отливки в момент перехода более массивной части или внутренней части отливки из области преобладающих пластических в область преобладающих упругих деформаций. Если при этих условиях градиент температур отсутствует, остаточных напряжений не возникнет.

Помимо разницы в толщине стенок градиент температур зависит от теплопроводности материала отливки и материала формы. Чем больше теплопроводность, тем меньше градиент температур, тем меньше напряжения.

В первый момент после заливки формы металлом разность температур между металлом и формой очень большая, вследствие чего части отливки, непосредственно соприкасающиеся с формой, будут охлаждаться быстрее, чем внутренние части отливки, не соприкасающиеся с формой.

При большой теплопроводности выравнивание температур между наружными и внутренними частями отливки идет значительно быстрее, градиент температур к моменту перехода отливки из области пластических в область упругих деформаций уменьшается, вследствие чего уменьшается и величина остаточных напряжений.

При малой теплопроводности процесс выравнивания температур происходит значительно медленнее, и величина напряжений в отливках получается больше.

Определение величины и распределение остаточных напряжений в чугунах с шаровидным графитом производилось по методу Закса [22]. Были определены деформации и рассчитаны напряжения для чугуна с шаровидным графитом, имеющим различную структуру металлической основы: перлитную, перлитно-ферритную и феррито-перлитную.

Для сравнения тем же методом были замерены деформации и определены напряжения для чугуна с пластинчатым графитом и для углеродистой стали.

Втулки и болванки для определения деформаций после расточки вырезались из средней части литой заготовки. С целью уменьшения влияния концевого эффекта длина втулки принималась равной пяти диаметрам.

**Размеры образцов были приняты для испытания в мм:**

Внутренний диаметр . . . . .	30
Наружный диаметр . . . . .	75
Длина . . . . .	190
Толщина снимаемого слоя после каждой расточки не более . . . . .	2

Измерение деформаций после каждой расточки производилось проволочными датчиками, наклеиваемыми на внешнюю поверхность втулки. Перед наклейкой датчиков с внешней поверхности образца снимался тонкий слой металла для получения ровной поверхности. Затем эта поверхность промывалась бензином и обезжиривалась ацетоном; после чего на нее наклеивались листки тонкой папиросной бумаги. После полного высыхания клея на бумагу наклеивались три проволочные датчика в продольном, а три — в поперечном направлении. Для компенсации температурных влияний на отдельную втулку наклеивались компенсационные датчики.

К рабочим и компенсационным датчикам припаивались медные провода, которые вторым концом присоединялись к зажимам прибора. Провода, припаянные к датчикам, закреплялись специальной пастой и изоляционной лентой.

При расточке образцы помещались в приспособление, предохраняющее датчики от повреждения.

Измерение деформаций в образце после каждой расточки производилось при помощи электро-тензометрической установки конструкции ЦНИИТМАШ.

Проволочный тензометр, состоящий из тонкой константановой проволоки диаметром 0,03 мм, специальным ацетоноцеллулоидным клеем наклеивался на полоски бумаги.

Полученные, таким образом, проволочные датчики наклеивались на образец.

При возникновении деформаций в образце изменяется сопротивление датчика и по величине сопротивления определяется величина возникшей деформации.

Для измерения деформаций применялся тензометр ПЭТ-30И (фиг. 20). В основу измерительной схемы прибора положен метод сопротивлений в схеме небалансового моста.

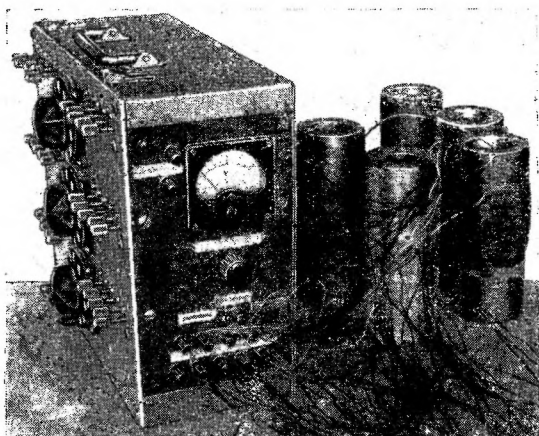
Прибор состоит из 30 переключаемых мостиковых схем. Переключение измерительных мостов (точек) производится тремя переключателями.

Питание прибора осуществлялось от щелочного аккумулятора напряжением 6 в, емкостью 100 а-ч. Прибор позволяет измерять деформации от  $3,5 \cdot 10^{-6}$  до  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Точность замера составляет 0,2%.

Чугун с шаровидным графитом с перлитно-ферритной и феррито-перлитной структурой исследовался в литом состоянии, без термической обработки. Для получения перлитной структуры чугун с шаровидным графитом подвергался нормализации по следующему режиму: нагрев до  $950^\circ$ , выдержка 3 часа, охлаждение на воздухе. Серый чугун и углеродистая сталь испытывались в литом состоянии.

Экспериментальные данные о величине напряжений приведены в табл. 7.

На основании полученных данных были построены эпюры распределения напряжений. Анализ полученных данных показывает, что осевые растягивающие напряжения в чугуне с шаровидным графитом выше напряжений в чугуне с пластинчатым графитом в 2,0—3,6 раза; осевые сжимающие напряжения в 1,4—2,2 раза; тангенциальные растягивающие напряжения в 2—3,2 раза; тангенциальные сжимающие в 2,8—3,6 раза.



Фиг. 20. Тензометр для определения величины деформаций.

№ образца	Состав в %						Микроструктура	Напряжения в кг/мм <sup>2</sup>			
	C	Si	Mn	P	S	Mg		Осевые		Тангенциальные	
								растягивающие	сжимающие	растягивающие	сжимающие
70-2	3,57	2,37	0,85	0,19	0,003	0,12	Перлитная (до 5% феррита)	6,0	7,0	6,5	8,5
110-1	2,60	3,14	0,69	0,12	0,005	0,089	Перлитно-ферритная (до 20% феррита)	5,0	11,0	2,8	10,0
87-1	2,98	3,49	0,84	0,15	0,006	0,122	Феррито-перлитовая (более 60% феррита)	9,0	10,0	4,0	11,0
60-1	3,32	1,87	0,67	0,34	0,058	0	Серый чугун	2,5	5,0	2,0	3,0
66-1	0,46	0,34	0,92	0,025	0,060	0	Углеродистая сталь	7,0	7,5	8,0	12,0

На фиг. 21 показаны эпюры распределения напряжений в чугуне с шаровидным графитом, а на фиг. 22 — в чугуне с пластинчатым графитом. Величины напряжений в чугуне с шаровидным графитом и углеродистой стали примерно одинаковы.

Характер распределения напряжений по сечению отливки в чугуне с шаровидным графитом, аналогичен серому чугуну.

Повышенная величина напряжений в отливках из высокопрочного чугуна объясняется тем, что этот чугун обладает значительно более высоким модулем упругости и меньшей теплопроводностью, чем серый чугун.

Величина напряжений пропорциональна также коэффициенту термического сжатия. Так как коэффициенты термического сжатия у высокопрочного чугуна и чугуна с пластинчатым графитом примерно одинаковы, то этот фактор на разницу величины напряжений высокопрочного и серого чугуна не оказывает существенного влияния.

Для того чтобы предупредить возникновение напряжений в отливках из чугуна с шаровидным графитом необходимо принять меры, обеспечивающие свободное протекание линейной усадки, равномерное охлаждение отдельных частей отливки и т. п., известные в практике производства отливок из белого чугуна, предназначенного для отжига на ковкий чугун.

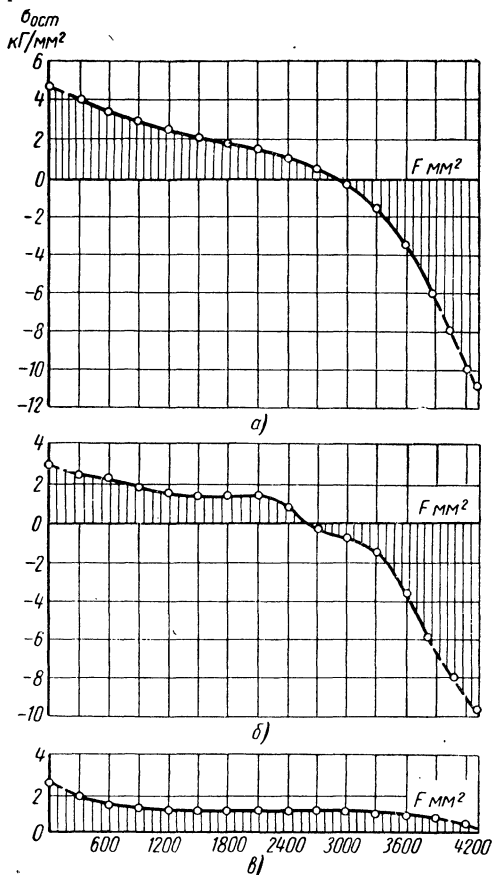
Однако, как показала практика, обеспечить получение отливок из высокопрочного чугуна без литейных напряжений или с практически неопасной величиной напряжений, в большинстве случаев не представляется возможным.

Это в особенности относится к отливкам сложной конфигурации, с большими габаритными размерами и резкими колебаниями в толщинах стенок. Поэтому возникает необходимость в снятии литейных напряжений термической обработкой отливок.

Термическая обработка отливок для снятия остаточных напряжений основана на том, что при нагреве их до высоких температур, при которых исчезают упругие и появляются пластические деформации, остаточные напряжения полностью исчезают. Если при последующем охлаждении все части отливки при переходе из области пластических в область упругих деформаций не будут иметь градиента температур, в отливке вновь не возникнет напряжений.

Однако полностью пластических или упругих состояний в чугунах не существует. Поэтому и после термической обработки часть напряжений в отливке остается. Величина этих остаточных напряжений зависит от физических свойств того или иного материала.

Было проведено сравнительное исследование релаксации напряжений высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Из высокопрочного чугуна, подлежащего исследованию, изготовлялось кольцо (фиг. 23) с прорезью, в которую вставлялся клин. В результате этого в кольце создаются напряжения заранее заданной величины. В таком состоянии кольцо, или группа колец, подвергаются нагреву до заданной температуры и выдержке в течение определенного времени при этой температуре. После термической обработки кольцо освобождается от клина и производится измерение раствора кольца. По разности двух замеров определяется величина деформации кольца, по которой вычисляется величина напряжений, оставшихся в кольце.

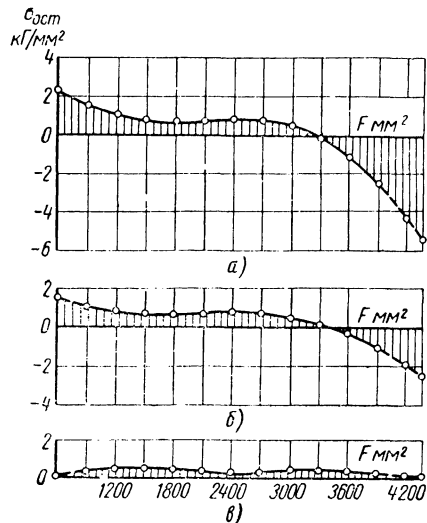


Фиг. 21. Эпюры распределения напряжений в высокопрочном чугуне с перлитной структурой:

а — осевые; б — тангенциальные; в — радиальные.

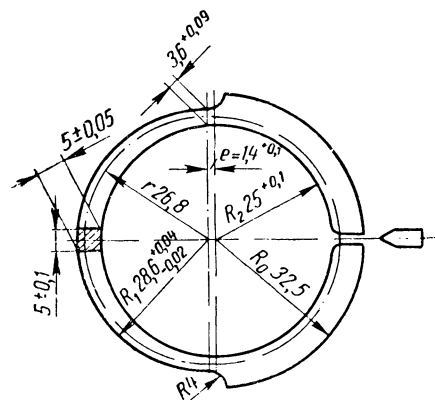
Состав и структура исследованных материалов приведены в табл. 8. Заготовки для релаксационных образцов вырезались из втулок диаметром 75 мм и длиной 190 мм. Из средней части литой заготовки вырезалось по 10 колец.

На нерабочую часть колец на расстоянии 3—5 мм от края прорезы приваривались тонкие пластинки из листовой жаростойкой стали. На каждую из этих пластинок наносились отпечатки прибором Виккерса. Эти отпечатки измерялись инструментальным микроскопом с точностью до 0,001 мм и определялась деформация кольца. Отпечатки хорошо сохраняются после воздействия высокой температуры.



Фиг. 22. Эпюры распределения напряжений в чугуне с пластинчатым графитом:

а — осевые; б — тангенциальные; в — радиальные.



Фиг. 23. Кольцо равного сопротивления изгибу для определения релаксации напряжений.

Испытание колец на релаксацию производилось при следующих температурах: 400, 450, 500, 550, 600°. Продолжительность выдержки

Таблица 8

№ образца	Химический состав в %						Состояние	Структура	Количество феррита в %
	C	Si	Mn	P	S	Mg			
40-1	2,74	2,80	0,57	0,17	0,006	0,05	Литое Нормализованное	Перлит	5
40-2	2,74	2,80	0,57	0,17	0,006	0,05			
40-3	2,74	2,80	0,57	0,17	0,006	0,05	Отожженное	Феррит	95
43-1	3,09	2,39	0,57	0,31	0,076	—	Литое	Перлитоферрит	Серый чугун
48-1	0,29	0,32	0,95	0,017	0,026	—			

в печи при заданной температуре составляла: 1, 3, 7, 15, 31, 63 час. Для каждой структуры и для каждой из принятых температур и времени выдержки испытывалось по два образца.

На фиг. 24 показаны кривые релаксации напряжений высокопрочного чугуна с перлитной структурой металлической основы.

Кривые показывают, что степень релаксации зависит как от температуры, так и от продолжительности выдержки образцов при данной температуре. Решающее влияние на снятие напряжений оказывает температура нагрева.

Максимальное падение напряжений при всех температурах происходит в первый час выдержки. В последующие часы выдержки напряжения падают значительно медленнее.

На фиг. 25 показаны кривые релаксации напряжений углеродистой стали, из которых видно, что полного снятия напряжений при выдержке в течение 63 час. и максимальной температуре  $600^{\circ}$  не произошло.

На фиг. 26 показаны кривые релаксации напряжений чугуна с пластинчатым графитом и перлитной структурой. Полное снятие напряжений в данном случае произошло при  $600^{\circ}$  и выдержке в течение 31 часа.

Сравнивая серый чугун с высокопрочным чугуном с перлитной структурой, можно отметить, что склонность к релаксации напряжений серого чугуна выше, чем высокопрочного.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом имеет различную склонность к релаксации напряжений в зависимости от структуры металлической основы: чугун, имеющий перлитную или ферритную структуру, в литом состоянии имеет меньшую склонность к релаксации напряжений по сравнению с высокопрочным чугуном, имеющим перлитно-ферритную структуру.

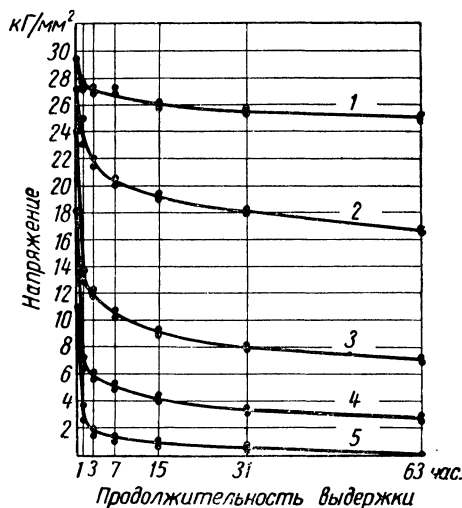
Высокопрочный чугун с шаровидным графитом имеет более высокую склонность к релаксации напряжений, чем углеродистая сталь.

Степень релаксации напряжений зависит от температуры и продолжительности выдержки, при этом решающее значение имеет температура термической обработки.

Рассмотрение литейных свойств чугуна с шаровидным графитом показывает, что, имея прочностные свойства, сходные со свойствами углеродистой стали, он обладает более благоприятными литейными свойствами, позволяющими получать весьма сложные отливки практически любого размера и веса, что выгодно отличает этот чугун от стали и ковкого чугуна.

Чугун с шаровидным графитом имеет более низкую температуру плавления в сравнении со сталью, что значительно упрощает плавку и разливку чугуна, а также снижает требования, предъявляемые к формовочным смесям с точки зрения их огнеупорности.

Величина линейной усадки чугуна с шаровидным графитом значительно меньше величины линейной усадки стали и ковкого чугуна, что снижает величину усадочных напряжений (при механическом торможении) в отливках.

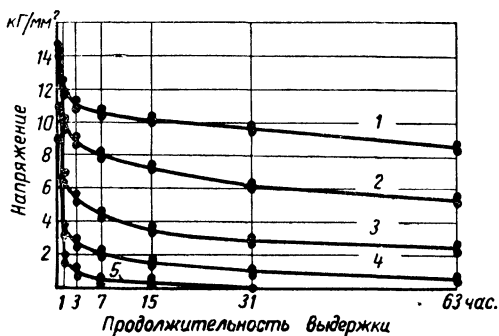


Фиг. 24. Кривые релаксации напряжений в высокопрочном чугуне с перлитной структурой:

1 — температура испытаний  $400^{\circ}$ , начальное напряжение  $29,5 \text{ кг/мм}^2$ ; 2 — температура испытаний  $450^{\circ}$ , начальное напряжение  $27,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 3 — температура испытаний  $500^{\circ}$ , начальное напряжение  $24,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 4 — температура испытаний  $550^{\circ}$ , начальное напряжение  $18,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 5 — температура испытаний  $600^{\circ}$ , начальное напряжение  $11,0 \text{ кг/мм}^2$ .

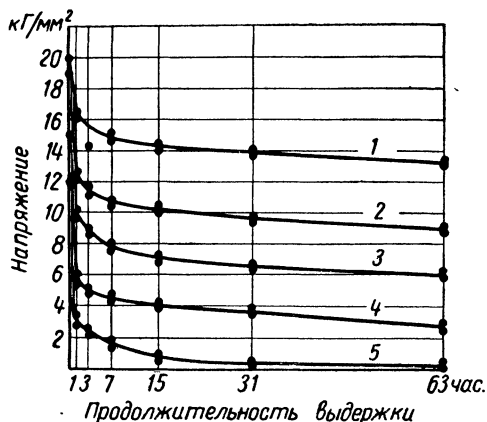
Фиг. 25. Кривые релаксации напряжений в углеродистой стали:

1 — температура испытаний  $400^{\circ}$ , начальное напряжение  $20,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 2 — температура испытаний  $450^{\circ}$ , начальное напряжение  $19,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 3 — температура испытаний  $500^{\circ}$ , начальное напряжение  $19,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 4 — температура испытаний  $550^{\circ}$ , начальное напряжение  $15,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 5 — температура испытаний  $600^{\circ}$ , начальное напряжение  $12,0 \text{ кг/мм}^2$ .



Фиг. 26. Кривые релаксации напряжений в чугуне с пластинчатым графитом:

1 — температура испытаний  $400^{\circ}$ , начальное напряжение  $14,4 \text{ кг/мм}^2$ ; 2 — температура испытаний  $450^{\circ}$ , начальное напряжение  $14,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 3 — температура испытаний  $500^{\circ}$ , начальное напряжение  $14,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 4 — температура испытаний  $550^{\circ}$ , начальное напряжение  $11,0 \text{ кг/мм}^2$ ; 5 — температура испытаний  $600^{\circ}$ , начальное напряжение  $9,0 \text{ кг/мм}^2$ .



Величина предусадочного расширения в чугунах с шаровидным графитом в 2—3 раза превышает величину предусадочного расширения чугуна с пластинчатым графитом. Это определяет малую склонность чугуна с шаровидным графитом к образованию горячих трещин и выгодно отличает этот чугун от стали.

Чугун с шаровидным графитом обладает большой склонностью к образованию усадочных раковин и усадочной пористости, что заставляет прибегать к установке прибылей и холодильников на отливках по аналогии со стальным литьем.

Величина литейных напряжений в отливках из чугуна с шаровидным графитом в 2—3 раза выше, чем в отливках из чугуна с пластинчатым графитом. В связи с этим, отливки из чугуна с шаровидным графитом должны проходить термическую обработку для снятия литейных напряжений.

---

## ПЛАВКА ЧУГУНА И ОБРАБОТКА ЕГО МАГНИЕМ

### 1. СОСТАВ ЧУГУНА

Выбор плавильного агрегата для плавки чугуна, предназначенного для последующей обработки его магнием, зависит главным образом от требований, предъявляемых к литью, от веса отливок, химического состава чугуна и некоторых других факторов.

В зависимости от технических требований, предъявляемых к отливкам, выбирается та или иная марка чугуна в соответствии с действующими стандартами.

Отечественным стандартом на отливки из высокопрочного чугуна (ГОСТ 7293-54) предусмотрен чугун следующих пяти марок (табл. 9).

Таблица 9

Марка чугуна	Механические свойства				
	Временное сопротивление в $\text{кг/мм}^2$	Условный предел текучести в $\text{кг/мм}^2$	Относительное удлинение в %	Ударная вязкость в $\text{кг}\cdot\text{м/см}^2$	Твердость по Бринеллю
ВЧ 45-0	45	36	—	—	187—255
ВЧ 50-1,5	50	38	1,5	1,5	187—255
ВЧ 60-2,0	60	42	2,0	1,5	197—269
ВЧ 45-5	45	33	5,0	2,0	170—207
ВЧ 40-10	40	30	10,0	3,0	156—197

Обязательными характеристиками по этому стандарту являются временное сопротивление и относительное удлинение. Другие показатели механических свойств определяются в соответствии со специальными требованиями, предъявляемыми к отливкам.

В отечественном, а также в зарубежных стандартах предусмотрены два основных типа чугуна с шаровидным графитом: перлитный и ферритный. Перлитному чугуну соответствуют марки ВЧ 60-2 и ВЧ 50-1,5 по ГОСТ 7293-54. Минимальная величина предела прочности при растяжении для чугуна с перлитной структурой составляет 50—60  $\text{кг/мм}^2$ , а величина относительного удлинения равна 1,5—2,0%.

Ферритному чугуну с шаровидным графитом соответствуют марки чугуна ВЧ 40-10 и ВЧ 45-5 отечественного стандарта. Минимальные значения величины предела прочности при растяжении для чугуна этих марок составляют 40—45 кг/мм<sup>2</sup>, а минимальная величина удлинения составляет 5—10%.

Для получения заданных механических свойств чугуна должен иметь надлежащую структуру и химический состав.

Следует отметить, что при отливке деталей из чугуна с шаровидным графитом содержание отдельных элементов чугуна оказывает значительно большее влияние на механические свойства, чем в чугуне с пластинчатым графитом.

Чугун, подлежащий обработке магнием, до введения последнего должен обязательно затвердевать, как обычный серый чугун с пластинчатым графитом.

Важнейшим элементом в высокопрочном чугуне с шаровидным графитом, определяющим высокие механические и пластические свойства, является магний или другой сфероидизирующий элемент. Магний, являясь химически активным элементом, будучи введен в жидкий чугун, вступает в химическое взаимодействие с отдельными элементами чугуна, вследствие чего изменяются его свойства и создаются необходимые условия для кристаллизации графита в шаровидной форме.

Как известно, свойства высокопрочного чугуна, обработанного магнием, зависят от остаточного содержания магния в чугуне. Установлено, что для образования шаровидной формы графита остаточное содержание магния должно быть не менее 0,03%. При меньшем остаточном содержании магния графит кристаллизуется в пластинчатой форме.

При очень низком содержании серы и большом раскислении чугуна шаровидный графит может быть получен и при меньшем содержании остаточного магния.

Для большинства деталей, отливаемых из чугуна с шаровидным графитом, остаточное содержание магния составляет 0,03—0,08%, хотя в отдельных случаях содержание магния достигает 0,12% и более. Однако в этих последних случаях в структуре чугуна, как правило, появляется цементит.

Магний является сильным десульфуратором. При вводе магния в чугун он прежде всего реагирует с серой, а оставшаяся часть его идет на образование шаровидного графита.

Магний влияет не только на форму графитовых включений, но изменяет и структуру металлической основы чугуна — измельчает структуру зерна и способствует получению соорбитообразного перлита. При высоком содержании магния в отливках из чугуна появляется отбел.

Одним из основных элементов чугуна является углерод, от содержания которого во многом зависит структура и свойства чугуна.

Как известно, при получении высококачественных отливок из чугуна с пластинчатым графитом стремятся получить более

низкое содержание углерода, при этом получают чугун с более высокими механическими свойствами.

При отливке деталей из чугуна с шаровидным графитом низкое содержание углерода не желательны, так как практика показала, что наиболее высокие показатели механических свойств получаются при высоком содержании углерода в пределах 3,3—3,8%.

Помимо высоких механических свойств при таком содержании углерода и соответствующем содержании кремния, чугун обладает наиболее благоприятными литейными свойствами, и таким чугуном можно заливать сравнительно тонкостенные детали без опасности получения отбела.

В отливках из чугуна с шаровидным графитом при высоком содержании углерода образуются преимущественно сосредоточенные усачные раковины, которые можно легко устранить установкой соответствующих прибылей или созданием направленного затвердевания отливки.

Шаровидная форма графита в чугуне, обработанном магнием, получается при содержании углерода от 2,5 до 4,0%. Однако выплавка чугуна в вагранке как с низким, так и с высоким содержанием углерода представляет значительные трудности, поэтому содержание углерода в реальных отливках колеблется от 3,2 до 3,6% в зависимости от заданной структуры чугуна и толщины стенки отливки.

При необходимости получения чугуна с перлитно-ферритной структурой в отливках с толщиной стенки до 60 мм, содержание углерода в исходном чугуне должно быть не ниже 3,2%; для отливок с толщиной стенки от 60 до 100 мм содержание углерода должно быть равно 3,0—3,3%, а в отливках с толщиной стенки выше 100 мм содержание углерода понижается до 2,7—3,2% [23].

Для чугуна с феррито-перлитной и ферритной структурой содержание углерода в исходном чугуне не должно быть ниже 3,3%.

Следующим важнейшим элементом чугуна с шаровидным графитом является кремний, который оказывает весьма существенное влияние на форму графитовых включений. В чугуне эвтектического и заэвтектического состава при высоком содержании кремния графит получается менее правильной шаровидной формы. Графитизирующая способность кремния в 1,5—2,0 раза ниже углерода. При увеличении скорости охлаждения графитизирующая способность кремния значительно снижается.

Содержание кремния в исходном чугуне определяется в зависимости от толщины стенки отливки и структуры чугуна. Для чугуна с перлитной и перлитно-ферритной структурой содержание кремния в исходном чугуне и после обработки чугуна ферросилицием определяется по табл. 10.

Содержание кремния в чугуне с шаровидным графитом не должно превышать 3,3%. При более высоком содержании кремния показатели по пределу прочности при растяжении, по удлинению и ударной

Толщина стенки отливки в мм	Содержание кремния в %	
	до присадки	после ввода присадки
До 10	2,4—2,7	2,8—3,3
10— 30	1,9—2,2	2,2—2,6
30— 60	1,6—1,9	1,9—2,3
60—100	1,3—1,7	1,6—2,0
Выше 100	0,8—1,5	1,1—1,8

вязкости значительно снижаются. Это относится к чугунам, полученным в литом состоянии и после термической обработки.

Для получения чугуна с полностью ферритной структурой содержание кремния должно быть около 3%.

Марганец в высокопрочном чугуне с шаровидным графитом оказывает существенное влияние на механические свойства и структуру чугуна. Для получения чугуна с высокими прочностными свойствами содержание марганца должно находиться в пределах 0,5—0,6%. При необходимости получения в чугуне высоких ударной вязкости и удлинения содержание марганца должно быть еще более низким (до 0,4%).

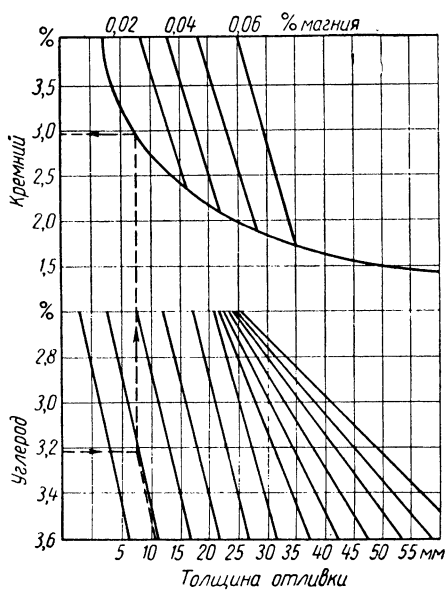
В большинстве случаев производственной практики содержание марганца колеблется в чугуне с преобладающей перлитной структурой в пределах 0,6—0,8%, а в чугуне с ферритной структурой в пределах 0,5—0,6%. При необходимости получения чугуна с шаровидным графитом и с чисто перлитной структурой, обладающей высокой износостойкостью, содержание марганца в чугуне должно быть повышенным (0,9—1,0%). В чугуне для коленчатых валов, от которых требуется высокая износостойкость, содержание марганца в чугуне доводят до 1,35%.

Фосфор в чугуне с шаровидным графитом оказывает весьма существенное влияние на показатели по удлинению и ударной вязкости. Чем ниже содержание фосфора в чугуне, тем выше показатели по удлинению. Максимальная величина удлинения в чугуне с шаровидным графитом достигается при содержании фосфора ниже 0,08—0,10%. Практически же для большинства отливок содержание фосфора в чугуне колеблется от 0,04 до 0,15%.

Как указывалось выше, при обработке чугуна магнием он прежде всего вступает в соединение с серой, вследствие чего происходит значительное обессеривание чугуна. Так, если обычный исходный чугун с пластинчатым графитом содержит 0,07—0,12% серы, то после обработки чугуна соответствующим количеством сфероидизирующей присадки содержание серы в чугуне понижается до 0,03% и более.

Если содержание серы в чугуне, обработанном магнием, превышает 0,03%, то получить полностью шаровидную форму графита не удастся.

Известно, что для поглощения одной десятой процента серы требуется 0,076 % магния. Поэтому чем меньше содержание серы в исходном чугуна, тем меньше количество магния потребуется ввести в чугун, тем меньше образуется сульфидов магния и тем меньше вероятность получения в отливках дефектов по неметаллическим включениям.



Фиг. 27. Структурная номограмма для определения химического состава чугуна.

При выборе химического состава чугуна с шаровидным графитом с учетом заданной структуры и толщины стенки отливки руководствуются структурной номограммой, представленной на фиг. 27 [24].

Если заданы содержание углерода и толщина тела отливки, то для определения содержания кремния, при котором в отливке не получится отбела, необходимо подняться вверх до пересечения с кривой в верхней части диаграммы. Горизонталь, проведенная влево из точки пересечения укажет минимальное содержание кремния в чугуна. По верхней горизонтальной шкале определяется остаточное содержание магния, необходимое для получения графита шаровидной формы.

## 2. ПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Плавка чугуна для последующей обработки его магнием может производиться в вагранках, в пламенных или электрических печах с кислой или основной футеровкой. Можно также применять дуплекс процесс: вагранка — электропечь или вагранка — пламенная печь.

При отливке весьма ответственных деталей, как, например, коленчатых валов из чугуна с шаровидным графитом содержание серы в исходном чугуна должно быть особенно низким. В этом случае удастся получить отливки без черных пятен.

Уменьшение содержания серы в чугуна благоприятно сказывается не только на механических свойствах чугуна, но и на литейных свойствах. При уменьшении содержания серы в чугуна, повышается жидкотекучесть, уменьшается горячеломкость и понижается газонасыщенность чугуна.

Низкое содержание серы в исходном чугуна может быть получено при выплавке чугуна в вагранке с основной футеровкой, либо в основной электропечи.

Выбор того или иного плавильного агрегата зависит от требований, предъявляемых к качеству отливок, от местных условий и от экономических соображений.

Плавильные агрегаты, в которых плавится чугун, предназначенный для последующей обработки его магнием или церием, желательны такие, чтобы в них можно было бы получать чугун с содержанием серы ниже 0,03% и температурой, равной 1400—1450°.

Плавка чугуна в обычных вагранках без специальных устройств для повышения температуры чугуна, обеспечивает выдачу чугуна с температурой 1370—1420° на желобе вагранки. Содержание серы в чугуне, выплавленном в обычных вагранках с шамотной футеровкой, обычно не ниже 0,08—0,12%.

При плавке чугуна в вагранке с кислой футеровкой следует учитывать возможное повышение содержания серы в чугуне, поглощаемой из кокса. Вследствие высокого содержания серы чугун после обработки его магнием содержит значительное количество неметаллических включений, которые, попадая в отливку, образуют дефекты, называемые черными пятнами. В связи с этим не рекомендуется заливать таким чугуном ответственные детали, подвергающиеся механической обработке (например; коленчатые валы).

Для получения чугуна с низким содержанием серы исходные шихтовые материалы и кокс также должны иметь низкое содержание серы. С этой целью используют лом и отходы чугуна с шаровидным графитом, в которых содержание серы обычно не превышает 0,03%. Кроме этого, производится обессеривание чугуна кальцинированной содой в ковше перед обработкой чугуна магнием.

Чугун с содержанием серы ниже 0,03% можно получить в вагранках с основной футеровкой.

Вагранки с основной футеровкой могут работать как на холодном, так и на горячем дутье с низким и высоким подогревом. В вагранках с высоким подогревом дутья не происходит большого угара кремния, как это имеет место в вагранках, работающих на холодном дутье.

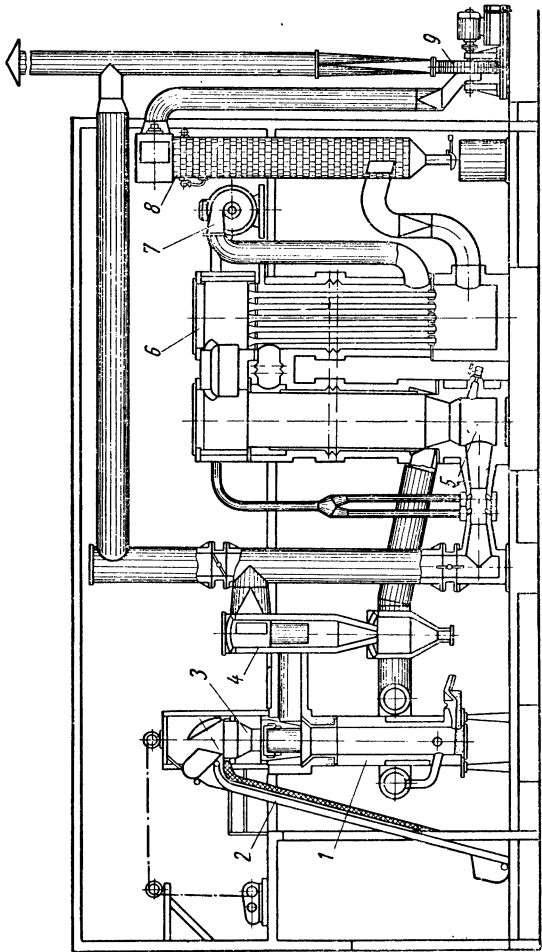
Такая вагранка, работающая с высоким подогревом дутья, была разработана и построена в ЦНИИТМАШе и в настоящее время находится в производственной эксплуатации [25].

Помимо получения чугуна с высокой температурой в этой вагранке предусмотрена полная очистка отходящих газов от пыли и вредных составляющих.

На фиг. 28 показана схема высокотемпературной вагранки с очисткой отходящих газов.

Вагранка 1 выполнена с закрытой шахтой и все отходящие газы отсасываются специальным дымососом 9 и направляются в циклон 4, камеру дожигания 5, радиационно-конвективный рекуператор 6 и аппарат для мокрой очистки газов 8. Подача воздуха в вагранку осуществляется воздуходувкой 7.

Воздух и горячие отходящие газы проходят через рекуператоры по принципу противотока.



Отходящие газы из верхней части закрытой шахты вагранки, пройдя предварительную очистку от пыли в циклоне, поступают в камеру дожигания.

При дожигании окиси углерода температура продуктов горения практически достигает  $900^{\circ}$ . С такой температурой газы поступают в радиационный рекуператор.

Радиационный рекуператор состоит из двух вертикальных цилиндров, вставленных с зазором один в другой, изготовленных из жаростойкой стали X25T.

По внутреннему цилиндру движутся горячие дымовые газы, поступающие из камеры дожигания.

Воздух в радиационном рекуператоре проходит в пространстве между цилиндрами снизу вверх.

Трубчатый рекуператор состоит из жаростойких трубок (151 шт.) диаметром 53 мм и длиной 4,6 м каждая, приваренных вверху к трубной доске.

Нижние концы трубок свободно перемещаются в нижней доске в индивидуальных асбестовых сальниках. Все трубки заключены в стальной цилиндрический кожух.

Дымовые газы проходят по трубкам сверху вниз, а воздух от воздуходувки проходит между трубками снизу вверх.

Система двухступенчатого рекуператора позволила наиболее полно использовать тепло отходящих ваграночных газов благодаря передаче ее стенкам рекуператорных устройств в области наиболее высоких температур (непосредственно после дожигания) — радиацией, а в области пониженных температур — за счет конвекции. Установка описанного рекуператора позволяет производить подогрев воздуха, подаваемого в вагранку, до  $550^{\circ}$ , что потребовало применения водяного охлаждения фурменных устройств.

Таблица 11

Расход кокса на рабочую топливную колошу, в % к весу загружаемой шихты	Температура чугуна в $^{\circ}\text{C}$ (на желобе по замерам термомпарой погружения)	Расход дутья в $\text{м}^3/\text{м}^2 \text{ мин}$
8	1400	110
10	1450	110
12	1470	110
16	1520	110

Тепловая изоляция рекуператоров и трубопроводов горячего воздуха выполнена из соединенных в блоки матов минеральной ваты.

Вследствие высокого подогрева воздуха, подаваемого в вагранку, значительно повышается температура чугуна, выпускаемого из вагранки, которая зависит от количества кокса (см. табл. 11).

Очистка отходящих газов от пыли производится в циклоне и скруббере.

Попавшая в циклон, расположенный перед рекуператорами, отходящие газы приобретают винтообразное движение вследствие тангенциального расположения входного патрубка цилиндра циклона, благодаря чему взвешенные частицы отбрасываются к стенкам циклона и уходят в бункер, где поток газа меняет свое направление и теряет скорость; в результате чего частицы пыли падают вниз, в то время как газы поступают в улитку, где винтовое движение газа вновь преобразуется в прямолинейное.

Вторая, мокрая очистка газа от мелкой пыли производится в скруббере, расположенном после рекуператора. Ваграночные газы поступают в нижнюю часть скруббера тангенциально к внутренней поверхности и приходят во вращательное движение, которое по мере подъема газа вверх постепенно затухает. Содержащаяся в газе пыль отжимается к внутренней стенке скруббера и улавливается стекающей по стенкам водой, поступающей через оросительные сопла.

Охлажденные до температуры 80—100° и очищенные от пыли газы выбрасываются в атмосферу посредством дымососа, создающего разрежение до 450 мм вод. ст.

Проведенные исследования показали, что ваграночные газы уходят в атмосферу очищенные от пыли на 90%, а содержание окиси углерода в них составляет в среднем 0,1%.

Важной особенностью вагранки конструкции ЦНИИТМАШа является возможность контролировать основные процессы, определяющие тепловой режим плавки. Контроль осуществляется при помощи специальных приборов, часть из которых работает автоматически. Так, например, предусмотрено автоматическое регулирование температуры ваграночных газов, перед поступлением их в скруббер; автоматическое регулирование степени разрежения ваграночных газов на выходе из вагранки и автоматическое регулирование количества воздуха, поступающего в рекуператоры.

В процессе работы вагранки с помощью установленной аппаратуры производится контроль температуры воздуха до и после поступления в рекуператоры, контроль температуры ваграночных газов при выходе из вагранки, по выходе из циклона, по выходе из камеры дожига, в рекуператорах, перед поступлением в скруббер и перед поступлением в дымосос; контроль температуры воды, выходящей из вагранки после охлаждения плавильного пояса; контроль давления воздуха за вентилятором, по выходе из рекуператора и перед поступлением в вагранку; контроль разрежения ваграночных газов на выходе из вагранки в трубчатом рекуператоре и перед дымососом; контроль количества воздуха, поступающего в рекуператоры, по выходе из рекуператоров и перед поступлением в камеру дожига; контроль содержания двуокиси углерода в ваграночных газах, выходящих из циклона; контроль количества охлаждающей воды перед плавильным поясом вагранки и перед скруббером.

В связи с тем, что в описываемой вагранке производится полный отбор отходящих газов, появилась необходимость в создании соответствующей герметизации загрузочного устройства вагранки и блокировки операций подъема загрузочной бадьи, открывания и закрывания шибера промежуточного бункера, лотка и открывающейся части боковой стенки вагранки.

Загрузка шихты в вагранку осуществляется наклонным скиповым подъемником с автоматическим управлением.

При откидывании бадьи скипового подъемника шихта попадает в приемную воронку, днище которой открывается при помощи пневматического цилиндра в тот момент, когда пустая бадьа начнет опускаться вниз. Возврат короба в исходное положение производится автоматически. Подача очередной колоши в вагранку производится только при определенном уровне шихты в вагранке, фиксируемом уровнемером.

Проведенные исследования показали, что плавка в вагранке конструкции ЦНИИТМАШа значительно повышает качество чугуна. При работе на горячем дутье угар кремния снижается в 2—3 раза, угар марганца в 1,5—2 раза, а содержание серы снижается до 0,05—0,07%.

Экономическая эффективность вагранки конструкции ЦНИИТМАШа определяется снижением расхода кокса, повышением температуры и качества чугуна и снижением брака литья.

Создаются благоприятные условия для получения модифицированного, высокопрочного и специальных чугунов.

Подсчитано, что условная годовая экономия, получаемая при двухсменной работе только одной вагранки производительностью 10 т/час, составляет около 80 тыс. руб.

На основании проведенных исследований можно заключить, что созданный тип вагранок позволяет в чугуно-литейных цехах получать чугун с высокой температурой, достигающей 1500°, снизить расход кокса примерно на 35% за счет дожигания окиси углерода, повысить стабильность свойств чугуна и улучшить его качество, значительно улучшить санитарно-гигиенические условия работы в цехах и оздоровить атмосферу районов, прилегающих к литейным цехам.

К числу недостатков вагранки конструкции ЦНИИТМАШа следует отнести сложность ее устройства, необходимость значительно больших площадей для ее установки и сравнительно высокие капитальные затраты на ее сооружение. Однако проведенные расчеты показали, что эти первоначальные затраты окупаются в течение 1—1,5 года эксплуатации вагранок за счет снижения расхода кокса и снижения процента брака литья в связи с получением более горячего чугуна.

Плавка чугуна, предназначенного для последующей обработки магнием, может производиться и в вагранках иных конструкций и, в частности, вагранках, установленных в настоящее время на большинстве заводов. Для обеспечения получения чугуна с высокой тем-

пературой в этих случаях используют кислород, вводимый в копильник или на желоб вагранки, при этом достигается повышение температуры чугуна на 50—70°.

Для понижения содержания серы в чугуне, выплавленном в вагранках с кислой футеровкой, предварительно чугун обессеривают. В тех же случаях, когда не удается понизить содержание серы в исходном чугуне, увеличивают дозировку магния с таким расчетом, чтобы его количество было достаточно и для понижения серы до 0,03% и для обеспечения сфероидизации графита.

При производстве весьма ответственных деталей, в которых по техническим условиям не допускается наличия литейных дефектов на обработанных поверхностях (например коленчатые валы), плавка чугуна производится либо в высокотемпературных вагранках, либо в электрических печах.

Плавка чугуна в электрических печах имеет то преимущество, что в них можно получить чугун с любой практически необходимой температурой, с низким содержанием серы и пониженным содержанием фосфора. Однако стоимость чугуна, выплавленного в электропечах, была выше стоимости чугуна, выплавленного в вагранках.

Для снижения стоимости жидкого чугуна применяют плавку чугуна дуплекс-процессом: вагранка—электропечь или вагранка—пламенная печь.

В первом случае, выплавленный в вагранке чугун переливается в электропечь, в которой производится соответствующий перегрев и рафинирование чугуна.

Преимуществом плавки чугуна в пламенной печи (на твердой завалке) является возможность получения чугуна с высокой температурой и возможность получения больших масс металла.

В связи с тем, что за последние годы в Советском Союзе значительно увеличилась выработка электроэнергии и значительно снизилась ее стоимость, вопрос о более широком использовании электропечей при плавке чугуна и особенно при плавке чугуна для последующей обработки его магнием приобретает исключительно важное значение. Широкое применение электропечей дало бы возможность значительно увеличить объем производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, и тем самым значительно понизить дефицит стали в стране.

В настоящее время на многих заводах Советского Союза, при производстве наиболее ответственных отливок из высокопрочного чугуна плавка чугуна производится в электрических печах, при этом себестоимость чугуниного литья оказывается ниже себестоимости стального.

При серийном производстве автомобильных коленчатых валов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом чугун плавится в дуговой электропечи с основной футеровкой с целью проведения глубокого обессеривания чугуна и получения чугуна с высокой температурой во избежание образования в отливках черных пятен и окисных плен. Работа печи происходит на твердой завалке [26].

После расплавления чугуна с зеркала металла тщательно счищается первый шлак. Для максимального снижения содержания серы наводится новый шлак, состоящий из восьми частей негашеной извести и двух частей плавикового шпата (5—6% от металлозавалки).

Через 20—30 мин. после наведения шлака на зеркало ванны загружается карбидная смесь, состоящая из трех частей извести, одной части древесного угля и одной части плавикового шпата, в количестве 0,7—1,0%.

В результате ведения такого процесса плавки содержание серы в чугуне снижается до 0,002—0,004%, а чугун, выдаваемый из печи, имеет температуру 1520—1540°.

При серийном производстве тракторных коленчатых валов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом плавка чугуна производится также в дуговой электропечи с основной футеровкой, работающей на твердой завалке. Плавка чугуна ведется под основным известковым и карбидным шлаком. Исходное содержание серы в чугуне до модифицирования не превышает 0,04%. Содержание серы в чугуне после наводки карбидного шлака составляет 0,006—0,008% [27]. Выпуск металла из печи производится при температуре 1560—1580°.

При серийном производстве коленчатых валов из высокопрочного чугуна для тепловозов выплавка чугуна производится в дуговой печи с кислой футеровкой. При этом содержание серы в чугуне после выпуска из печи составляет менее 0,03% [28], [29].

### 3. ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИСАДКИ

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом получается в результате обработки жидкого чугуна небольшими количествами магния или некоторых других элементов (церия, кальция и др.). Наиболее широкое применение в промышленности в качестве сфероидизирующей присадки в настоящее время получил чистый магний. Ведутся работы по применению церия и солей магния с восстановителями для получения чугуна с шаровидным графитом.

а) **Магний.** Магний, будучи введен в жидкий чугун, расплавляется, а затем испаряется. Образующиеся пары магния, обладая значительной упругостью, проходят сквозь толщу жидкого чугуна и создают необходимые условия для кристаллизации графита в шаровидной форме. Установлено, что полностью шаровидная форма графита в чугуне получается только в том случае, если остаточное содержание магния не ниже 0,03—0,04%.

Обработка чугуна чистым магнием или высокопроцентными магниевыми лигатурами связана с выделением большого количества дыма, с большим световым эффектом и сильным разбрызгиванием чугуна. Если чистый магний бросать на поверхность расплавленного чугуна или класть в ковш, а затем наполнять его жидким чугуном, то почти весь магний сгорает на поверхности расплавленного чугуна и не оказывает на графит сфероидизирующего действия. Бурная

реакция взаимодействия магния с чугуном сопровождается, как правило, выбросами чугуна из ковша, а усвоение магния чугуном при этом составляет всего 5,0—8,0%.

Пары магния, образующиеся в результате взаимодействия магния с чугуном, обладают высокой упругостью, которая сильно изменяется с изменением температуры.

Зависимость между упругостью насыщенных паров магния и их температурой представляется следующим уравнением:

$$\lg p = 9,52 - \frac{7840}{T^{\circ}} - 1,22 \lg T^{\circ}.$$

Давление паров магния при различной температуре, вычисленное по этой формуле получается следующее:

Давление в кг/см <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура в °С	1107	1192	1242	1290	1327	1367	1382	1402	1425	1442

Высокое давление паров магния значительно затрудняет применение чистого магния для обработки жидкого чугуна.

Одним из способов снижения упругости паров магния является применение лигатур. Наиболее пригодной лигатурой с точки зрения снижения упругости паров магния оказалась никелевая лигатура. Содержание никеля в такой лигатуре обычно не превышает 15%. Такая лигатура (85% Mg и 15% Ni) имеет значительный удельный вес и высокую температуру плавления (1082°), ее вводят в ковш с жидким чугуном без особых предосторожностей. Ввод такой лигатуры в ковш сопровождается ослепительным пламенем и образованием облака дыма.

Практика показала, что при вводе никелевой лигатуры при температуре чугуна 1450° около 50% магния сторае непроизводительно; часть магния реагирует с серой и всплывает в шлак, а часть магния остается в чугуне.

Вместо никелевой лигатуры можно применять медную лигатуру. Однако чугун, полученный в результате обработки такой лигатурой, имеет более низкие свойства в сравнении с чугуном, обработанным никелевой лигатурой. При использовании медной лигатуры чугун постепенно насыщается медью и теряет свои основные свойства. При содержании магния в медной лигатуре в количестве 10—15% ее можно вводить в ковш во время его наполнения жидким чугуном. При этом вначале происходит сильная вспышка, которая, однако, не опасна. Ковш должен наполняться чугуном равномерно и не слишком быстро.

Большее распространение получила лигатура, состоящая из магния и ферросилиция. Эта лигатура имеет сравнительно небольшой удельный вес и ее надо вводить в чугун принудительно, погружая

на дно ковша, заполненного чугуном. Реакция взаимодействия чугуна с кремниевой лигатурой протекает относительно спокойно с небольшой вспышкой и слабым выбросом искр, которые можно почти полностью устранить при закрывании ковша.

Преимуществом такой лигатуры является более спокойная реакция, а также то, что во многих случаях при ее применении не требуется дополнительная обработка чугуна ферросилицием (в особенности при большой толщине тела отливки), вследствие чего не происходит дополнительного понижения температуры чугуна.

Количество магния, вводимого в чугун для получения графита шаровидной формы, зависит от степени его усвоения, от количества, идущего на поглощение серы, и количества сгорающего магния, которое зависит от способа ввода в жидкий чугун.

Количество магния, потребное для поглощения серы и образования сульфида  $MgS$ , может быть подсчитано, исходя из следующих соображений.

При вводе присадки в чугун происходит следующая реакция между магнием и серой:



В соответствии с атомными весами магния (24,32) и серы (32,06) для связывания 0,1% серы потребуется 0,076% магния.

$$24,32 \cdot 0,1 : 32,06 = 0,076.$$

Количество магния, потребное для компенсации потерь при сгорании, зависит от температуры чугуна, способа ввода (в открытый ковш, в копильник вагранки, в герметизированный ковш или автоклав) и длительности нахождения чугуна в жидком состоянии и т. п.

С учетом сказанного, количество магния, необходимое для получения чугуна с шаровидным графитом, можно определить по следующей формуле:

$$Mg_{нзобх} = Mg_{ост} + 0,76 \Delta S + k + aM + bt + c\Delta T,$$

где  $Mg_{ост}$  — содержание остаточного магния, необходимое для полной сфероидизации графита в %;

$0,76 \Delta S$  — количество магния, необходимое для поглощения серы в %;

$k$  — количество магния, вступающего в соединение с другими элементами в %;

$M$  — толщина стенки в мм;

$a$  — постоянный множитель;

$t$  — время выдержки в мин.;

$b$  — константа (0,001—0,002);

$T$  — разность между температурой чугуна при обработке магнием и температурой ликвидуса в град.;

$c$  — константа.

Потери магния при длительной выдержке чугуна после обработки составляют [30]:

Время выдержки после реакции в мин.	12	22	34	43	53	63	76
Потери магния в %	0,001	0,003	0,025	0,037	0,045	0,048	0,050

Вопрос об эффективном и надежном способе ввода магния в жидкий чугун до сих пор привлекает внимание литейщиков. В настоящее время в СССР и за границей применяют несколько различных способов ввода магния, при этом он вводится в чистом виде или в виде магниевых лигатур. В самое последнее время найдены способы обработки чугуна солями магния, вводимыми совместно с восстановителями, а также магнием совместно с церием или с кальцием.

Чистый магний при вводе его в жидкий чугун в открытых ковшах вызывает бурную реакцию, которая сопровождается выделением большого количества дыма, ярким светом и сильным разбрызгиванием чугуна, малым усвоением магния и значительным понижением температуры чугуна.

В настоящее время имеются такие способы ввода магния, которые в значительной мере устраняют указанные недостатки. Открытый ковш, наполненный жидким чугуном на  $\frac{2}{3}$  его высоты, устанавливается на тележку и подается в камеру. При помощи специального механизма колокол с магнием опускается в жидкий чугун. После окончания реакции тем же механизмом колокол извлекается из ковша, и тележка выкатывается из камеры. С металла счищается шлак, засыпается ферросилиций и после тщательного перемешивания чугун подается на заливку.

Основным недостатком этого способа является то, что ввод магния в чугун в открытом ковше связан с развитием высокого давления паров магния. При температуре 1380—1450°, при которых практически происходит обработка чугуна магнием, давление паров магния достигает 7—10 кг/см<sup>2</sup>, вследствие чего происходит бурная реакция чугуна с магнием, сопровождающаяся выплесками чугуна из ковша.

При таком способе ввода магния большая часть его сгорает на поверхности расплава, вследствие чего усвоение магния чугуном оказывается крайне незначительным. Такой способ ввода магния связан со значительным понижением температуры чугуна.

При обработке больших масс чугуна набирается в крановый ковш емкостью до 30 т, закрываемый специальной крышкой. Магний вводится в этом случае несколькими колоколами при помощи мостового крана. Образующиеся газы отводятся через борозы и трубу в атмосферу. Этому способу свойственны те же недостатки, что и способу обработки чугуна в ковшах, помещенных в камерах, хотя отсутствие камеры в данном случае является одним из преимуществ данного способа.

Ввод магния может производиться непосредственно в копильник вагранки. Как и в предыдущих случаях в этом случае магнием вводится в колоколах, опускаемых при помощи специальных приспособлений в копильник вагранки, наполненный чугуном. Копильник имеет крышку с отверстием для прохождения колокола. При нормальной работе вагранки это отверстие закрыто съемной крышкой. При необходимости ввода магния в чугун крышка снимается, и в отверстие опускается колокол с магнием, при этом, как только колокол с магнием дойдет до дна копильника, отверстие в копильнике закрывается.

После окончания взаимодействия чугуна с магнием, колокол извлекается из копильника, отверстие в копильнике закрывается, и производится выпуск чугуна из копильника. При этом чугун может быть выпущен сразу в большой ковш или по частям — в малые ковши, из которых производится заливка форм.

Способ ввода магния в копильник вагранки имеет следующие преимущества перед вводом магния в открытые ковши: значительно меньше понижается температура чугуна (не более чем на  $50^{\circ}$ ); устраняются выплески; уменьшается световой эффект; улучшается качество чугуна в связи с тем, что выпуск обработанного магнием чугуна производится из нижней части копильника и весь шлак остается в копильнике, не попадая в ковш и отливку; отпадает надобность в постройке специальной камеры.

Основным недостатком этого способа является необходимость применения колоколов, а при неплотном закрывании крышки из-под нее вылетают брызги во время реакции. Кроме этого, во время обработки чугуна магнием прерывается работа вагранки. Дозировка магния в данном случае затруднена.

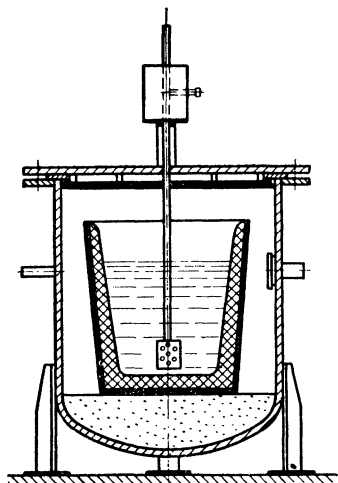
При вводе магния в закрытые ковши предварительно создается искусственное давление, в результате чего упругость паров магния значительно снижается и реакция проходит совершенно спокойно без светового эффекта и выделения дыма.

В Чехословакии был изготовлен специальный автоклав (фиг. 29), в который устанавливается ковш с чугуном, и перед вводом магния в автоклаве создается искусственное давление, равное  $5,0-5,5 \text{ кг/см}^2$ . После этого в чугун вводится магнием. По окончании реакции давление снимается и ковш с чугуном поступает на заливку форм [31].

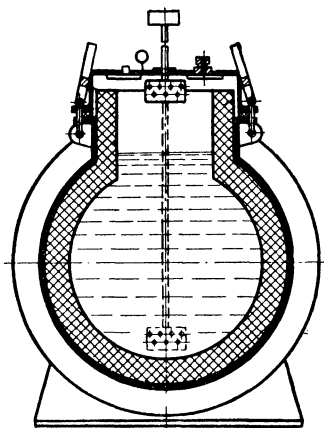
Вследствие того, что реакция происходит спокойно, резко сокращается расход магния, а усвоение его чугуном повышается. Количество магния, вводимого в чугун в данном случае, составляет около  $0,2\%$ , температура чугуна снижается незначительно. Однако ввод магния при этом способе осуществляется также при помощи колоколов со всеми вытекающими отсюда недостатками.

Ввод магния этим способом может производиться в ковшах (фиг. 30). По наполнении ковша чугуном и закрытия крышки, внутри ковша создается давление, после чего производится опускание в чугун колокола с магнием. Метод обработки чугуна в автоклавах получил развитие и усовершенствование в Советском Союзе в Институте стали, на Горьковском автозаводе, в ЦКТБ и др.

Построенная на этом принципе автоматизированная установка для введения магния в жидкий чугун показана на фиг. 31 и 32 [32]. Установка, предназначенная для обработки чугуна чистым магнием в ковшах емкостью 0,5—1,5 т, состоит из нижней 1 и верхней 2 части фиг. 31, которые соединяются между собой при помощи венца с 24 зубьями, и байонетного механизма, работающего от двух гидравлических цилиндров. Создание необходимой герметичности осуществляется П-образным резиновым уплотнительным кольцом, внутрь которого подается сжатый воздух.



Фиг. 29. Схема автоклава для обработки чугуна магнием.



Фиг. 30. Схема закрытого ковша для обработки чугуна магнием.

Перед опусканием ковша 4 в автоклав и перед его выемом верхняя часть автоклава поворачивается на шарнире 3 при помощи гидравлического цилиндра в положение, показанное на фиг. 32.

Установка ковша в автоклав и выемка его из автоклава производится при помощи разливочного крана. Опускание и подъем колокола производится при помощи гидравлического цилиндра 5 (фиг. 31). Перед опусканием колокола с магнием в автоклаве создается давление до  $6 \text{ кг/см}^2$  от воздушной сети.

Внутренняя часть автоклава покрыта огнеупорной обмазкой, а дно автоклава выложено шамотным кирпичом.

На фиг. 32 приведена схема размещения вспомогательных агрегатов установки: блок управления с гидравлическими насосами 1, шкаф автоматики 2, клапан, регулирующий давление в автоклаве 3, пульт управления 4, циклон 5, для очистки окислов магния, предохранительный клапан 6, влагоотделитель 7.

Процесс обработки чугуна магнием в описанной установке производится автоматически, при этом предусмотрена необходимая блокировка механизмов. Колокол с магнием может быть опущен

в чугун только после того, как в автоклаве будет создано заданное давление. Открывать крышку автоклава можно только после понижения давления внутри автоклава до атмосферного.

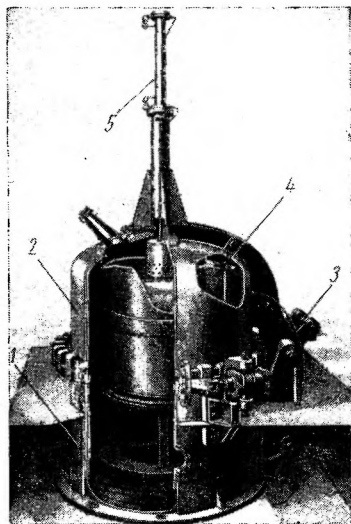
Давление в автоклаве и длительность выдержки колокола с магнием в чугуне устанавливаются в зависимости от температуры чугуна по табл. 12.

В Советском Союзе разработан оригинальный способ обработки чугуна магнием в герметизированных поворотных ковшах барабанного или конвертерного типов. Сущность этого способа заключается в том, что обработка чугуна магнием производится в герметически закрытых ковшах под давлением паров магния, развиваемом в свободном от металла объеме ковша в результате взаимодействия чугуна с магнием [33].

На фиг. 33 показана схема обработки чугуна магнием в герметизированном ковше барабанного типа, а на фиг. 34 — схема обработки чугуна магнием в ковше конвертерного типа. На

Таблица 12 [32]

Температура чугуна в °С	Давление в автоклаве в кг/см <sup>2</sup>	Выдержка колокола в чугуне в сек.
1300	2,0—2,5	120—150
1350	3,0—3,5	90—120
1400	3,5—4,0	60—90



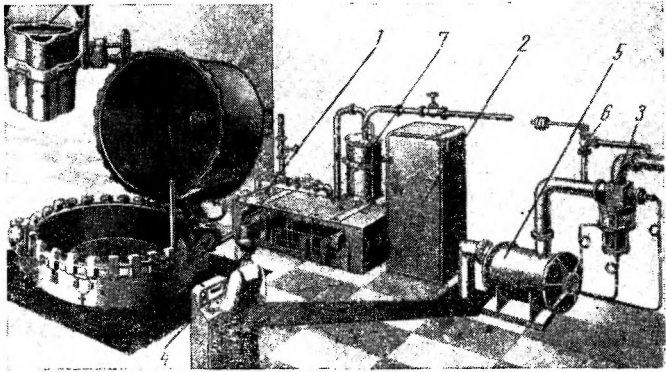
Фиг. 31. Автоматизированная установка для обработки чугуна магнием.

обеих схемах слева показано положение ковша перед обработкой чугуна, а справа — положение ковша в момент обработки чугуна магнием.

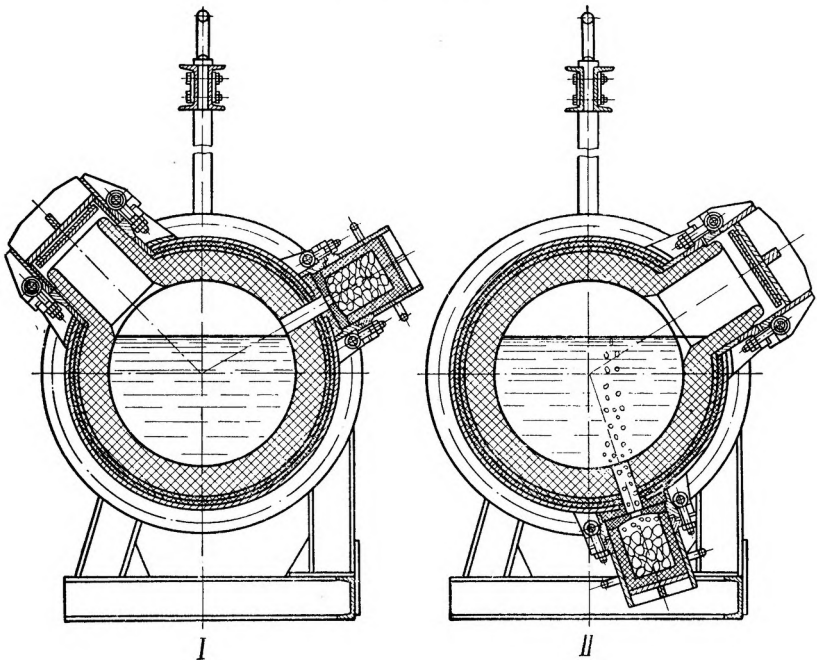
Давление паров магния, образующихся в начале взаимодействия магния с чугуном, на поверхность жидкого чугуна повышает температуру кипения магния, в результате чего понижается упругость паров магния и процесс обработки проходит спокойно.

Повышенное давление паров магния увеличивает усвоение магния чугуном, так как концентрация растворенного газа пропорциональна парциальному давлению этого же газа над раствором.

Это позволяет значительно (в 2—3 раза) уменьшить количество магния, вводимого в чугун, по сравнению с вводом магния в открытые ковши, и снизить расход тепла, идущего на расплавление и испарение магния, и тем самым уменьшить понижение температуры чугуна, вызванное введением магния в чугун.



Фиг. 32. Автоматизированная установка для обработки чугуна магнием.

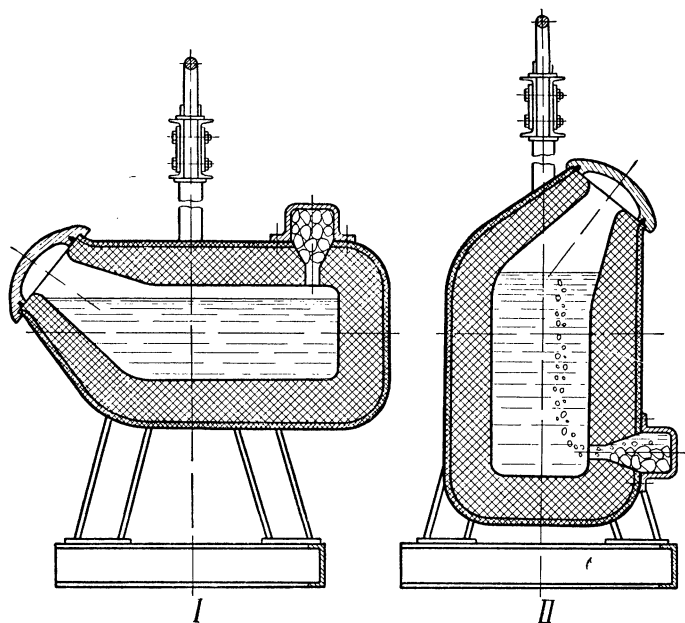


Фиг. 33. Схема обработки чугуна магнием в герметизированном ковше барабанного типа конструкции ЦНИИТМАШа:

*I* — положение ковша перед обработкой чугуна магнием; *II* — положение ковша при обработке чугуна магнием.

Если при вводе магния в открытые ковши расход его составляет 0,5—0,7%, при вводе магния в копыльник вагранок 0,3—0,5%, то при обработке чугуна магнием в герметизированных ковшах расход магния составляет 0,25—0,35% от веса обрабатываемого ваграночного чугуна.

При вводе магния в открытые ковши температура чугуна понижается на 60—150°, а при вводе магния в герметизированные ковши только на 30—60°.



Фиг. 34. Схема обработки чугуна магнием в герметизированном ковше конвертерного типа конструкции ЦНИИТМАШа:

*I* — положение ковша перед обработкой чугуна магнием; *II* — положение ковша при обработке чугуна магнием.

При обработке чугуна магнием в герметизированных ковшах образующаяся окись магния успевает всплыть в шлак, и количество газов, выходящих из ковша при открытии крышки, оказывается совершенно незначительным, вследствие чего не требуется специальных устройств для отвода газов.

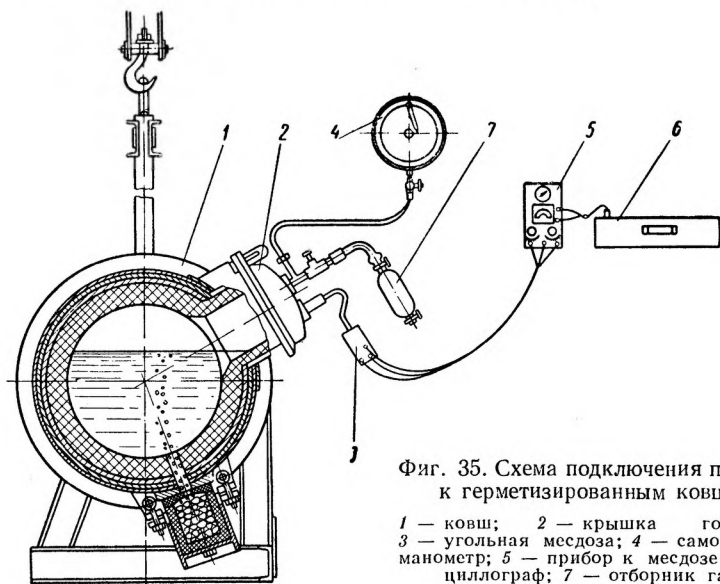
Уменьшение количества расходуемого магния снижает себестоимость литья на 7—10 руб. на 1 т жидкого чугуна.

Таким образом, при обработке чугуна магнием в герметизированных ковшах повышается стабильность процесса, увеличивается усвоение магния, снижается его расход, устраняются выбросы чугуна, световой эффект и выделение дыма<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Исследования проведены аспирантом В. Т. Лисицыным.

При обработке чугуна магнием в герметически закрытых ковшах под влиянием высокой температуры чугуна магний испаряется, пары его проходят через толщу жидкого чугуна и создают в свободном от металла объеме ковша избыточное давление, являющееся необходимым условием для более спокойного процесса и повышения усвоения магния жидким чугуном.

Давление, развиваемое в полости герметического ковша при обработке чугуна магнием, замерялось с помощью угольной месдозы с записью кривых давления на осциллографе.



Фиг. 35. Схема подключения приборов к герметизированным ковшам:

1 — ковш; 2 — крышка горловины; 3 — угольная месдоза; 4 — самонипущий манометр; 5 — прибор к месдозе; 6 — осциллограф; 7 — отборник газов.

Схемы подключения приборов для измерения и записи изменения давления в ковше показаны на фиг. 35. Тарировка показаний месдозы производилась газовым манометром, при этом полностью собиралась система, и тарировочная шкала записывалась на пленке осциллографа.

Полученные непосредственным измерением наиболее характерные кривые изменения давления в процессе обработки чугуна в герметизированных ковшах барабанного и конвертерного типов показаны на фиг. 36.

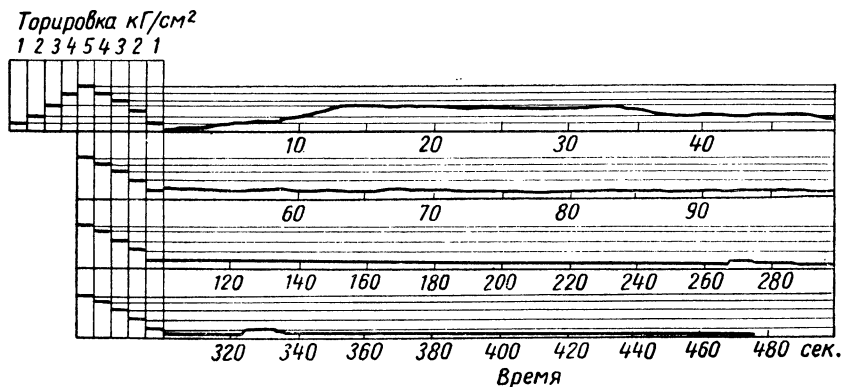
Анализ полученных диаграмм изменения давления показывает, что в интервале температур от 1300 до 1450°, замеряемых термопарами погружения, максимальная величина развиваемого давления в ковшах емкостью от 250 кг до 10 т изменяется в пределах от 1,5 до 6,0 кг/см<sup>2</sup>, чем выше температура чугуна, тем больше величина давления.

В герметизированном ковше конвертерного типа емкостью 1000—1500 кг величина максимального давления при тех же коли-

Чества вводимого магния несколько выше. Увеличение давления в этом случае можно объяснить, по-видимому, большим коэффициентом заполнения объема ковша металлом и большей общей емкостью ковша.

В конструктивном отношении герметизированные ковши выполняются барабанного и конвертерного типов. Преимущества ковшей конвертерного типа состоят в том, что увеличивается использование внутреннего объема ковша, улучшаются условия очистки металла от шлака, упрощается ремонт ковша.

Техническая характеристика герметизированных ковшей конструкции ЦНИИТМАШа приведена в табл. 13.

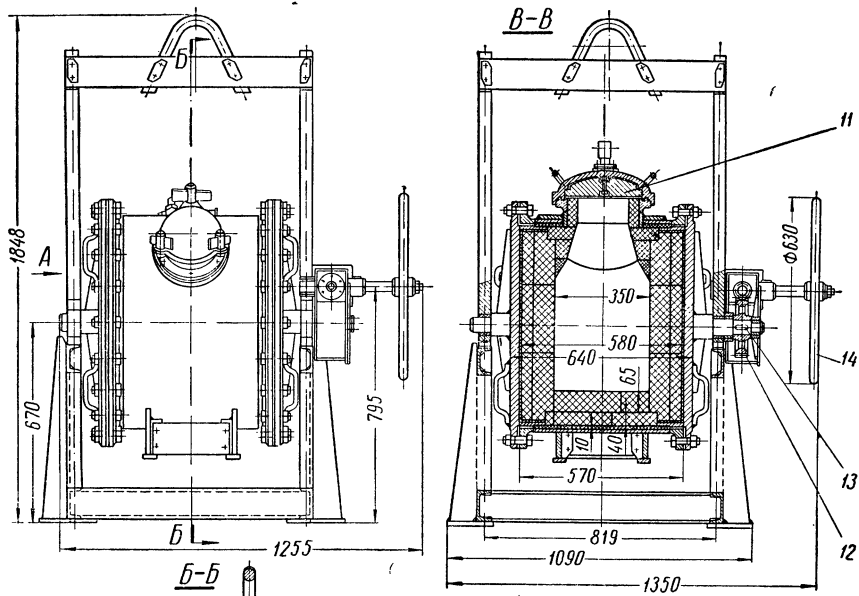


Фиг. 36. Осциллограмма давления паров магния в герметизированном ковше.

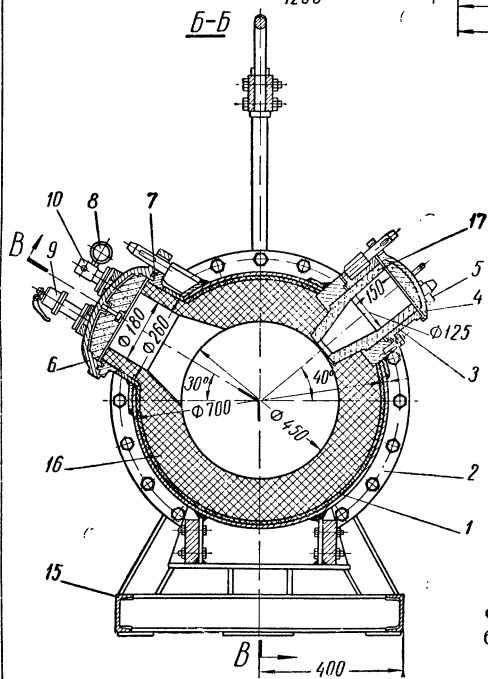
Герметизированный ковш барабанного типа емкостью 250 кг (фиг. 37) состоит из обечайки 1, изготовленной из стального листа толщиной 12 мм, и двух днищ 2, изготовленных из листа толщиной 30 мм, скрепленных с обечайкой болтами. Для закладки магния предусмотрен один металлический стакан 3, прикрепленный к обечайке. Крышка стакана 4 крепится при помощи трех клиньев 5. Горловина ковша закрывается крышкой 6, крепление которой производится тремя клиньями.

Для создания герметичности ковша в крышке сделана выточка, в которую закладывается асбест или клиновидный ремень 7. Крышка горловины снабжена манометром 8 для измерения давления, развиваемого в полости ковша, предохранительным клапаном 9, отрегулированным на давление 6 ат, и краном 10, для снижения давления в ковше перед открыванием крышки. С внутренней стороны крышки горловины крепится песчаный стержень 11, предохраняющий ее и соединительные каналы от засорения в процессе взаимодействия чугуна с магнием.

Поворотный механизм ковша 12 состоит из редуктора с двумя передачами, конической и червячной пар. Поворот ковша осуществляется на цапфах 13, вваренных в днища, вручную, при помощи



B-B



Фиг. 37. Герметизированный ковш барабанного типа емкостью 250 кг.

Наименование	Типоразмеры ковшей						
	Б0,25	Б1,0	К1,5	Б2,0	К5,0	Б10,0	Б30
Тип ковша . . . . .	Б0,25	Б1,0	К1,5	Б2,0	К5,0	Б10,0	Б30
Емкость ковша в <i>т</i> . . . . .	0,25	1,0	1,5	2,0	5,0	10,0	30,0
Количество стаканов для магния в шт. . . . .	1	1	1	2	1	2	2
Емкость стакана в <i>л</i> . . . . .	5,6	5,6	12,6	18,0	42,0	92,0	193,0
Расчетное давление внутри ковша в $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ . . . . .	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Количество вводимого магния в % . . . . .	0,25—0,35						
Температура обрабатываемого чугуна в $^{\circ}\text{C}$ . . . . .	1350—1450						
Длительность реакции в мин.	1— 1,5	1— 1,5	1,5— 2,5	1— 1,5	1,5— 2,5	3—4	
Мощность электродвигателя в <i>квт</i> . . . . .	—	—	—	—	1,7	5,1	5,1
Число оборотов электродвигателя в мин. . . . .	—	—	—	—	930	1025	1025
Габаритные размеры в <i>мм</i> :							
длина . . . . .	1350	1700	1670	2350	2500	2940	4650
ширина . . . . .	900	1400	1700	1400	2000	3000	3400
высота . . . . .	1850	2590	2730	2720	3260	4335	4350
Вес ковша с футеровкой в <i>т</i>	1,3	2,5	2,8	3,3	7,3	16,5	40
Вес футеровки в <i>кг</i> . . . . .	140	370	440	820	1300	3440	8350

штурвала 14. Во избежание самопроизвольного поворота ковша червячная пара является самотормозящей.

Для случая разливки металла малыми ручными ковшами предусмотрена опорная рама 15, на которую устанавливается ковш.

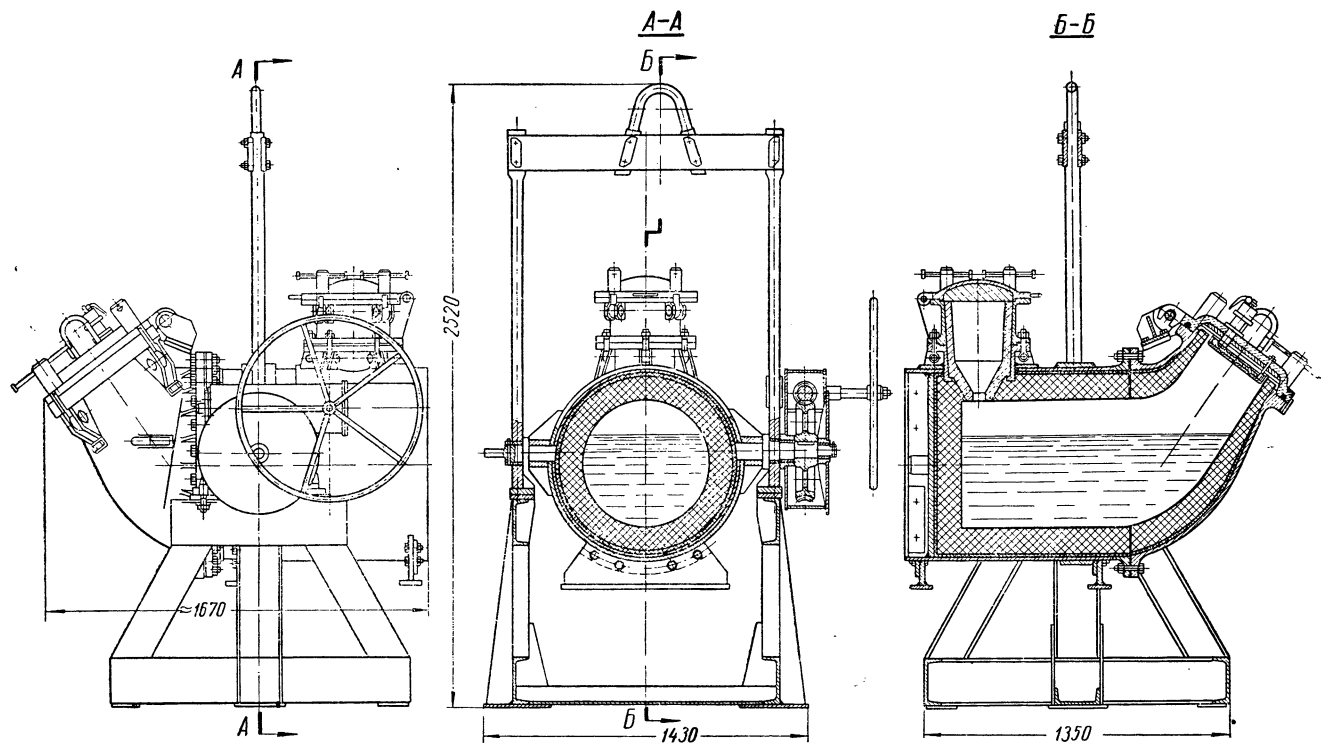
Внутренняя часть ковша футеруется огнеупорным кирпичом 16 толщиной 125 мм с обязательной прокладкой между футеровкой обечайкой ковша асбеста толщиной 10 мм.

Внутрь стакана устанавливается песчаный стержень 17.

Герметизированный ковш конвертерного типа емкостью 1,5 т (фиг. 38) состоит из стального сварного корпуса толщиной 15 мм и горловины, отлитой из стали 25Л, прикрепленной к корпусу 24 болтами М30. Днище корпуса изготовлено из стального листа толщиной 30 мм. Стакан для укладки магния размещен вблизи днища и крепится к корпусу ковша откидными болтами; крышка стакана крепится откидными болтами со специальными гайками. Аналогичным способом крепится точеная крышка горловины ковша.

На крышке горловины смонтированы предохранительный клапан, манометр и кран.

Поворотный механизм ковша состоит из двух конических шестерен и червячной пары с общим передаточным числом  $i = 114$ . Поворот ковша производится вручную при помощи штурвала диаметром 800 мм.



Фиг. 38. Герметизированный ковш конвертерного типа емкостью 1500 кг.

На фиг. 39 показан общий вид герметизированного ковша конвертерного типа <sup>1</sup>.

Положительные результаты, полученные при эксплуатации в производственных условиях герметизированных ковшей малой емкости, позволили спроектировать и построить герметизированные ковши больших емкостей. Так, на Горьковском заводе «Двигатель Революции» по чертежам ЦНИИТМАШа изготовлен и опробован герметизированный ковш конвертерного типа емкостью 5 т. На фиг. 40 показана конструкция такого ковша. В отличие от ковша конвертерного типа емкостью 1—1,5 т, поворот ковша емкостью 5 т производится при помощи двигателя, установленного на самом ковше. Поворот ковша во время обработки чугуна магнием предусмотрен с дистанционным управлением и может производиться из различных мест цеха.

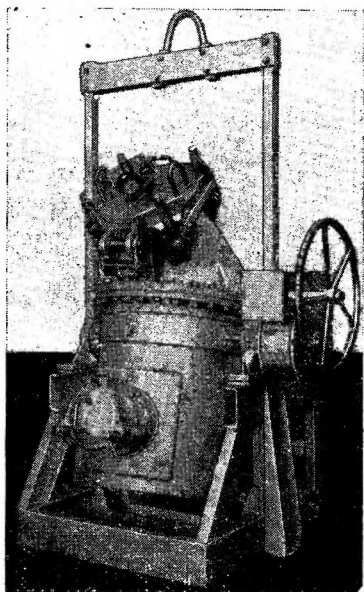
На Ново-Краматорском заводе изготовлен и успешно эксплуатируется в производственных условиях герметизированный ковш барабанного типа емкостью 10 т. Общий вид этого ковша показан на фиг. 41. Поворот ковша, как и в предыдущем случае, производится электродвигателем, установленным на ковше.

К числу недостатков герметизированных ковшей конструкции ЦНИИТМАШ следует отнести неудачное решение конструкции крепления крышек горловины и стаканов, в которые укладывается магний, повышенное ошлакование ковшей, особенно ковшей барабанного типа и т. п.

В настоящее время на заводах проведены работы по усовершенствованию конструкции герметизированных ковшей. Так, например, на Ново-Краматорском заводе тяжелого машиностроения вместо клинового крепления крышек горловины ковша предложен и применяется на практике специальный затвор, с помощью которого легче закрывать и открывать крышку.

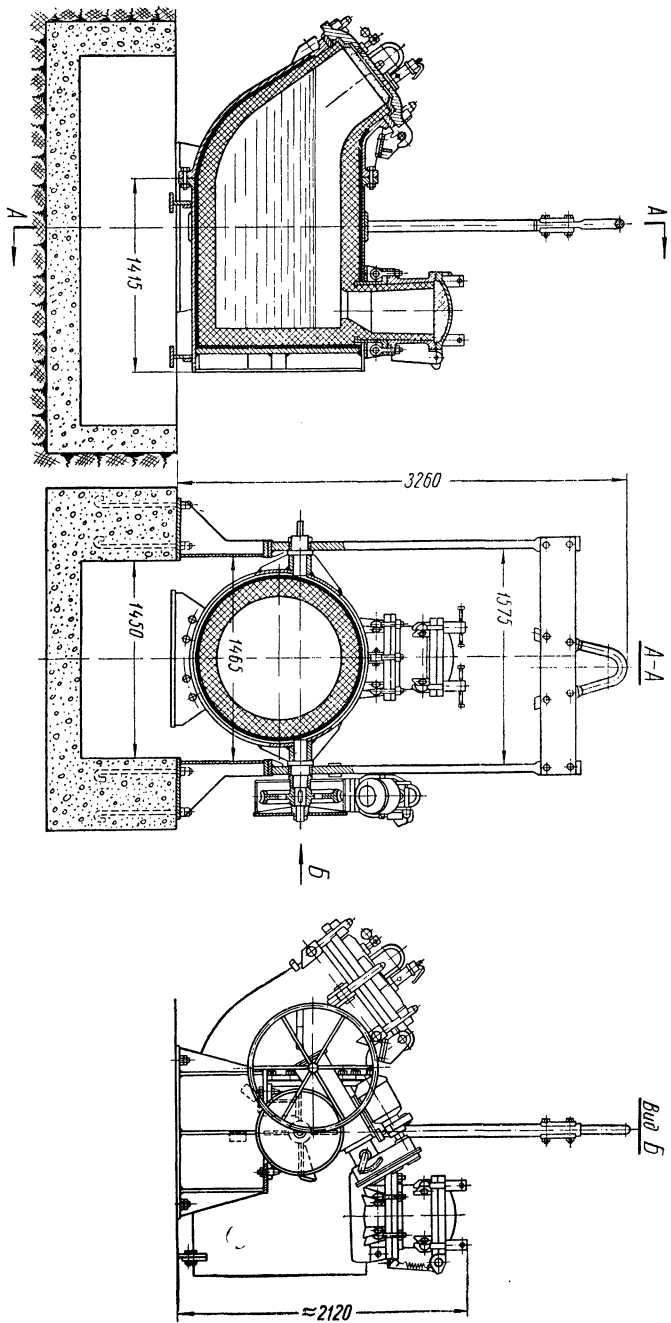
**б) Церий.** Церий принадлежит к числу редкоземельных элементов и обладает рядом специфических физико-химических свойств.

Все редкоземельные металлы проявляют исключительно большое химическое сродство к тем металлоидам, которые обычно присутствуют в черных металлах (O, S, N, C, P и H), и, взаимодействуя



Фиг. 39. Общий вид герметизированного ковша конвертерного типа емкостью 1500 кг.

<sup>1</sup> Конструкция ковша разработана В. Т. Лисицыным и М. М. Шинкиным.



Фиг. 40. Герметизированный ковш конвертерного типа емкостью 5 м.

с ними в нагретом состоянии, служат их эффективными поглотителями.

Все металлы цериевой группы легко окисляются на воздухе и сравнительно легко воспламеняются. При 150° химическая активность церия сильно возрастает, а при 160° он загорается на воздухе.

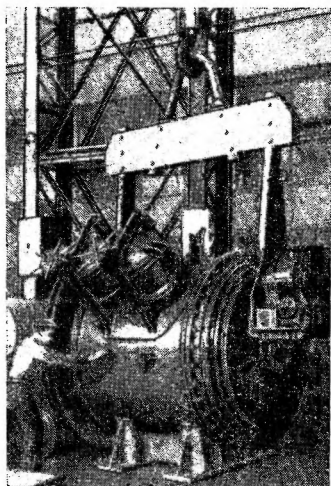
Церий при прямом взаимодействии соединяется с азотом, серой и другими элементами. Имеет большое химическое сродство к кислороду и сере, но в значительно меньшей степени, чем магний.

Оксиды и сульфиды церия обладают высокой тугоплавкостью. Так, например, температура плавления  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  1690°;  $\text{Ce}_3\text{O}_4$  2450°;  $\text{CeO}_2$  1930°;  $\text{Ce}_2\text{S}_3$  2000—2200° и  $\text{CeS}$  2450°.

В табл. 14 приведены некоторые физико-химические свойства церия и магния.

Обработка чугуна церием прежде всего изменяет структуру графита. В зависимости от состава исходного чугуна, количества введенного и усвоенного церия и скорости охлаждения, структура графита может быть пластинчатой, смешанной или полностью шаровидной. Точно также в результате обработки чугуна церием изменяется структура металлической основы чугуна. Чугун, обработанный церием, может иметь перлитную, перлитоферритную, ферритную, мартенситную и другие структуры как в литом, так и в термообработанном состоянии.

Следует отметить, что возможности изменения структуры металлической основы путем применения термической обработки для чугуна, обработанного магнием или церием, имеющего графит



Фиг. 41. Общий вид герметизированного ковша барабанного типа емкостью 10 т.

Таблица 14

Наименование	Элементы	
	Ce	Mg
Атомный вес . . . . .	140,13	24,32
Атомный радиус, А° . . . . .	1,81	1,60
Кристаллическая решетка . . . . .	K12, Г12	Г12
Температура плавления в °С . . . . .	815	650
Температура кипения в °С . . . . .	3 600	1 107
Теплота образования окислов в ккал/моль . . . . .	234 250	145 900
Теплота образования сульфидов в ккал/моль . . . . .	138 500	84 250
Удельный вес в г/см <sup>3</sup> . . . . .	6,8	1,738
Твердость по Бринелю . . . . .	21	

шаровидной формы, значительно большие, чем для исходного чугуна с пластинчатым графитом.

Процесс получения чугуна с шаровидным графитом включает растворение соответствующего количества церия в расплавленном чугуне, вводимого в чугун незадолго до заливки литейных форм.

Чугун может быть эффективно обработан церием, если будут соблюдены следующие условия [34]:

1. Состав исходного чугуна должен быть таким, чтобы до обработки церием он затвердевал серым.

2. Состав исходного чугуна должен быть заэвтектическим, т. е. чтобы сумма углерода и  $\frac{1}{3}$  суммы кремния и фосфора была равна или более 4,3; содержание углерода должно быть около 3,8%.

3. Содержание кремния может быть любым, но в пределах 2,3—7,0%.

4. Содержание серы в исходном чугуне должно быть как можно более низким (не выше 0,04%); после обработки чугуна церием содержание серы в чугуне не должно превышать 0,02%.

5. Содержание фосфора не должно превышать 0,6%; желательно, чтобы содержание фосфора было ниже 0,1%.

6. Содержание марганца, меди, никеля, хрома и молибдена может быть в любых количествах отдельно каждого элемента или в комбинациях одного с другим при условии, что при этом соблюдается условие, сформулированное в пункте 1.

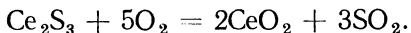
Наиболее важным является условие 2.

Высокое содержание углерода в чугуне создает некоторые трудности при получении отливок из такого чугуна. Еще более трудной задачей является получение исходного чугуна с низким содержанием серы.

Церий является весьма эффективным десульфуратором; при введении его в чугун он прежде всего соединяется с серой по реакции:



и



До тех пор, пока содержание серы в чугуне после введения церия не понизится до 0,02%, церий не будет растворяться в чугуне.

Если церий присаживается к чугуну с большим содержанием серы, он сразу же соединяется с избытком серы и в виде сульфида церия ( $\text{CeS}$ ) всплывает на поверхность расплава. Реакция десульфурации происходит в течение нескольких секунд.

Когда в чугун вводят избыточное количество церия с целью понижения содержания S ниже 0,02%, или когда исходное содержание серы ниже этой величины, избыток церия растворяется в чугуне и стабилизирует карбиды.

Необходимо отметить, что стабилизация карбидов усиливается от воздействия церия, растворенного в металле, а не от церия, соединенного с серой.

При введении в расплавленный чугун заэвтектического состава оптимального количества церия, достаточного для понижения содержания серы до 0,02%, и при остаточном содержании церия, равном не ниже 0,02%, графит кристаллизуется в шаровидной форме.

Металлическая основа чугуна, обработанного церием, как правило затвердевает с белым изломом, и в структуре чугуна содержится значительное количество цементита.

При плавке чугуна, предназначенного для последующей обработки церием, необходимо получить чугун высокой температуры, с высоким содержанием углерода и низким содержанием серы.

Опыт показал, что эти условия могут быть выполнены при плавке чугуна в электрических дуговых печах, печах сопротивления и высокочастотных индукционных печах. При плавке чугуна в электрических печах можно ограничить выгорание углерода и предотвратить насыщение его серой, так как в электрических печах чугун серой не насыщается.

В вагранках трудно получить чугун с высоким содержанием углерода (для получения чугуна заэвтектического состава) и невозможно избавиться от поглощения чугуном серы. Даже в том случае, если содержание серы в исходных шихтовых материалах незначительно, содержание серы в чугуне, выпускаемом из вагранки, будет очень высоким, что не позволяет производить экономично обработку такого чугуна церием, так как известно, что чем выше содержание серы в обрабатываемом чугуне, тем большее количество церия необходимо вводить в чугун для получения шаровидного графита. Так, например, при содержании серы в исходном чугуне, равном 0,1%, количество мишметалла, вводимого в чугун, составляет около 0,6%. При этом конечное содержание серы в чугуне понижается до 0,02%, а остаточное содержание церия составляет около 0,05%. Если же содержание серы в исходном чугуне понизить до 0,02%, то для получения того же остаточного содержания церия потребуется всего лишь около 0,1—0,2% мишметалла.

Если содержание серы в выпущенном из вагранки чугуне находится в пределах 0,05—0,08%, можно частично обессерить металл обработкой его кальцинированной содой в ковше с основной футеровкой. В этом случае металл из вагранки выпускается в ковш с основной футеровкой, в который засыпана кальцинированная сода.

Весьма перспективным является выплавка малосернистого чугуна, предназначенного для обработки церием или магнием в основных вагранках, так как в них можно получать чугун с низким содержанием серы, практически ниже 0,03%, что позволяет снизить количество вводимого церия и тем самым снизить стоимость литья.

Следует, однако, заметить, что такие вагранки еще не получили широкого распространения.

Обработка жидкого чугуна с целью получения шаровидного графита может производиться чистым церием, ферроцерием и мишметаллом,

Чистый церий легко и быстро растворяется в чугуна без бурной реакции, если только он не всплывает на поверхность чугуна.

При всплывании церия на поверхность расплавленного чугуна, он мгновенно сгорает, не производя надлежащего воздействия на чугун.

Однако чистый металлический церий является очень дорогим материалом, поэтому его удобнее и дешевле вводить в чугун в виде ферроцерия или мишметалла. Ферроцерий состоит из 90—96% церия и лантана и 4—6% железа.

Мишметалл состоит из 40—50% церия, 22—25% лантана, 15—17% неодима и 8—10% других редкоземельных элементов.

В последние годы в Советском Союзе разработан специальный цериевый сплав ФЦМ5. Этот сплав содержит 40—50% церия, 4—7% магния и до 10% железа. Остальное — другие редкоземельные элементы.

При обработке чугуна мишметаллом, ферроцерием, или сплавом ФЦМ5 присадка в виде кусков помещается на дно ковша, перед наполнением его расплавленным металлом. Количество вводимого церия для получения шаровидного графита зависит от содержания серы в исходном чугуна, от толщины отливки и ее веса. Чем крупнее отливка, тем больше нужно ввести церия. Так, например, для отливки толщиной 20 мм было достаточно ввести 0,22% мишметалла, в то время, как при отливке толщиной 50 мм и более даже при введении 0,44% мишметалла не удавалось получить полностью шаровидный графит. При содержании церия в чугуна выше 0,07% в тонких частях (менее 12 мм) чугун получается белый, несмотря на высокое содержание углерода 3,5—4,0% при содержании кремния 2,3—3,3%.

Минимальное остаточное содержание церия в отливках, обеспечивающее получение графита шаровидной формы составляет 0,02%.

Для получения графита полностью шаровидной формы чугуна, помимо обработки церием, обрабатывается дополнительно графитизирующим модификатором, в качестве которого чаще всего применяется ферросилиций Si75. Ферросилиций желателен вводить в чугун после введения церия. Однако можно их вводить и одновременно.

Путем такой двойной обработки в чугуна заэвтектического состава можно получить полностью шаровидный графит и высокие механические свойства чугуна.

В табл. 15 приведены состав и механические свойства чугуна двух различных составов, из которых были отлиты образцы диаметром 30 мм в сырых песчаных формах, при этом образец № 1 был залит чугуном, обработанным только одним церием, а образец № 2 — церием и ферросилицием.

В обоих случаях в чугун вводилось 0,14% церия. Во втором случае, кроме церия, было введено 0,2% кремния в виде 80%-ного ферросилиция.

№ образца	Химический состав в %						Механические свойства			
	C	Si	Mn	S	P	Ce	$\sigma_{цзг}$ в кг/мм <sup>2</sup>	Стрела прогиба в мм	$\sigma_b$ в кг/мм <sup>2</sup>	НВ
1	3,67	2,67	0,86	0,005	0,051	0,040	91,0	15,0	41,0	221
2	3,49	2,89	0,88	0,008	0,055	0,058	100,0	15,0	53,0	238

Как видно из данных таблицы, чугун, обработанный церием и ферросилицием, имеет более высокие механические свойства, чем чугун, обработанный только церием.

Чугун заэвтектического состава, содержащий 3,74% С; 2,65 Si; 0,53% Mn; 0,006% S; 0,024% Р и 0,053% Се, после обработки одним церием имел белый излом в образцах диаметром 22 и 15 мм.

Чугун заэвтектического состава, содержащий 3,76% С; 2,48% Si; 0,85% Mn, 0,012% S, 0,051% Р и меньшее содержание остаточного церия 0,029% имел белый излом только в образцах диаметром 15 мм.

Обработанный церием малосернистый чугун, выплавленный в высокочастотной печи, имел прочность на растяжение около 55 кг/мм<sup>2</sup> (в пробном бруске диаметром 22 мм).

В пробном бруске, имеющем большую толщину, прочность на растяжение составила около 44 кг/мм<sup>2</sup>.

Рассмотрение микроструктуры чугуна заэвтектического состава, обработанного одним церием, показало, что в этом случае наряду с графитом шаровидной формы имеется большое количество пластинчатого графита. Когда же был получен весь графит шаровидной формы, механические свойства чугуна еще более возросли, что видно из следующих данных.

В табл. 16 приведены состав и механические свойства чугуна, полученные при испытании образцов диаметром 30 мм.

Таблица 16 [34]

№ образца	Химический состав в %						Механические свойства			
	C	Si	Mn	S	P	Ce	$\sigma_{цзг}$ в кг/мм <sup>2</sup>	Прогиб в мм	$\sigma_b$ в кг/мм <sup>2</sup>	НВ
1	3,67	2,67	0,86	0,005	0,051	0,040	91,0	15,0	41,0	221
2	3,49	2,89	0,88	0,008	0,055	0,058	100,0	15,0	53,0	238

Образцы № 1 были залиты чугуном после обработки только одним церием, а образцы № 2 после обработки чугуна церием (0,14%) и ферросилицием.

Как видно из табл. 16, чугун заэвтектического состава, обработанный после церия еще ферросилицием, имеет более высокие показатели механических свойств. Графит в этом случае имеет почти полностью шаровидную форму.

То же самое наблюдалось при еще более высоком содержании углерода и кремния.

В табл. 17 приведено сравнение механических свойств сплава, содержащего около 3,8% С; 3,0% Si; 0,7% Mn и 0,04% P до и после присадки церия в чугун.

Таблица 17 [34]

Обработка	Предел прочности при растяжении в кг/мм <sup>2</sup>	Предел прочности при изгибе в кг/мм <sup>2</sup>	Прогиб в мм	Твердость по Бринеллю НВ
Необработанный . . . . .	21,0	44,5	5,0	98
После присадки церия . .	40,0	88,5	15,0	221
После присадки церия и ферросилиция . . . . .	52,5	97,0	15,0	238

Морроу и Грантом были проведены систематические исследования механических свойств заэвтектического чугуна, обработанного церием и ферросилицием [34].

Церий вводился в виде мишметалла. Образцы заливались в песчаные формы. Состав исходных чугунов приведен в табл. 18.

Таблица 18

Наименование элементов	Содержание элементов в %			Наименование элементов	Содержание элементов в %		
	А	В	С		А	В	С
Углерод . . . . .	3,94	4,05	3,99	Фосфор . . . . .	0,029	0,038	0,048
Кремний . . . . .	2,78	2,58	1,95	Титан . . . . .	—	0,08	0,12
Марганец . . . . .	0,57	0,96	0,88	Ванадий . . . . .	—	0,01	0,02
Сера . . . . .	0,017	0,011	0,028	Хром . . . . .	—	0,02	0,02

Чугуны таких составов расплавлялись в тигельной печи, работавшей на жидком топливе. Полученными чугунами заливались образцы диаметром 40, 30, 22, 15 мм. Химический состав чугуна в отливках приведен в табл. 19.

Исследования показали, что чугун 1 был белым в образцах диаметром 22 и 15 мм.

Чугун 2 с меньшей присадкой мишметалла был белым только в образце диаметром 15 мм. Оба эти чугуна обрабатывались только церием и имели включения шаровидного и пластинчатого графита,

№ образца	Химический состав в %					
	C	Si	Mn	S	P	Ce
1	3,74	2,65	0,53	0,006	0,024	0,053
2	3,76	2,48	0,85	0,012	0,051	0,029
3	3,55	3,01	0,89	0,004	0,044	0,053

Металлическая основа чугуна состояла из 60% феррита и 40% перлита (образец 30 мм).

Чугун 3 был подвергнут обработке церием и ферросилицием и имел перлитно-ферритную структуру и шаровидную форму графита.

Результаты испытаний на прочность при изгибе приведены в табл. 20.

Таблица 20

№ образца	Диаметр образца в мм	$\sigma_{изг}$ в кг/мм <sup>2</sup>	Прогиб в мм	Примечание
1	40	65	8,6	Чугун, обработанный церием
	30	78	13,7	
	22	—	—	
	15	—	—	
2	40	77	11,9	То же
	30	77	12,0	
	22	103	12,0	
	15	—	9,6	
3	40	99	13,2	Чугун, обработанный церием с ферросилицием
	30	112	26,0	
	22	117	11,2	
	15	124	9,2	

В чугуне, подвергнутом обработке только церием, величина предела прочности при изгибе колебалась от 65 на образцах диаметром 40 мм до 103 кг/мм<sup>2</sup> на образцах диаметром 22 мм.

Прочность была выше в чугуне 3, подвергнутом обработке магнием и ферросилицием.

Образец чугуна 3 диаметром 30 мм дал прогиб более 25 мм.

Чугун с шаровидным графитом имеет примерно вдвое большую прочность на растяжение, чем соответствующий чугун с пластинчатым графитом.

Прочность чугуна с шаровидным графитом при испытании на растяжение в литом состоянии достигает 65 кг/мм<sup>2</sup>, а после отжига снижается до 40—50 кг/мм<sup>2</sup>.

Результаты испытаний на растяжение приведены в табл. 21. В чугунах, обработанных церием без последующей обработки ферросилицием (чугун 1 и 2), предел прочности при растяжении возрастает до 36  $\text{кг/мм}^2$  при испытаниях на образцах, вырезанных из заготовок диаметром 40 мм, до 40  $\text{кг/мм}^2$  при испытаниях на образцах из заготовок диаметром 22 мм.

В чугунах, обработанных церием и ферросилицием (чугун 3), предел прочности при растяжении возрастает с 41  $\text{кг/мм}^2$  при испытаниях образцов из заготовок диаметром 40 мм, до 54  $\text{кг/мм}^2$  при испытаниях образцов из заготовок диаметром 15 мм. Если в чугуне с пластинчатым графитом удлинение практически отсутствует, то чугун с шаровидным графитом имеет значительное удлинение. В большинстве случаев величина относительного удлинения в литом состоянии составляет 1—3%.

Величину удлинения можно значительно повысить применением термической обработки. Так, подвергая отливки из чугуна с шаровидным графитом термической обработке — отжигу, можно получить величину удлинения выше 10%.

Отношение предела прочности при изгибе к пределу прочности при растяжении для чугуна с шаровидным графитом составляет 1,8—2,6. Средние величины твердости по Бринеллю чугуна с шаровидным графитом приведены в табл. 22.

Таблица 21

№ образца	Диаметр заготовок в мм	$\sigma_b$ в $\text{кг/мм}^2$	Отношение $\frac{\sigma_{изг}}{\sigma_b}$
1	40	36,0	1,8
	30	40,0	1,9
	22	—	—
	15	—	—
2	40	35,0	2,2
	30	37	2,0
	22	40	2,5
	15	—	—
3	40	41,0	2,1
	30	47,0	2,3
	22	54,0	2,1
	15	54,0	2,2

Таблица 22

№ образца	Диаметр заготовок в мм	Твердость НВ	Примечание
1	40	178	Чугун обработан церием
	30	187	
	22	—	
	15	—	
2	40	178	То же
	30	184	
	22	204	
	15	—	
3	40	213	Чугун обработан церием и ферросилицием
	30	230	
	22	249	
	15	272	

Величины твердости чугуна с шаровидным графитом несколько выше (на 30—50 единиц) твердости обычного серого чугуна с пластинчатым графитом сходного химического состава.

Для определения влияния остаточного содержания церия на механические свойства чугуна был изучен чугун, состав которого приведен в табл. 23.

Таблица 23 [35]

№ образца	Химический состав в %					
	C	Si	Mn	S	P	Ce
1	3,90	2,96	0,51	0,006	0,024	0,016
2	3,76	3,09	0,51	0,008	0,024	0,021
3	3,90	3,10	0,51	0,007	0,024	0,031
4	3,91	3,08	0,51	0,003	0,024	0,036
5	3,75	3,11	0,51	0,004	0,024	0,063

Как видно из табл. 24 с повышением содержания остаточного церия повышаются и механические свойства. Однако при содержании церия 0,063% замечается уже снижение механических свойств.

Таблица 24 [34]

Диаметр заготовки в мм	$\sigma_{изг}$ в кг/мм <sup>2</sup>	Стрела прогиба в мм	$\sigma_b$ в кг/мм <sup>2</sup>	Твердость НВ	$a_K$ в кг/см <sup>2</sup>
40	70	12,9	38,0	179	4,34
30	80	17,3	42,0	189	6,25
22	85	9,9	43,0	213	10,3
15	98	8,9	52,0	239	—
40	77	13,9	40,0	187	5,0
30	90	21,6	48,0	191	8,7
22	100	13,2	50,0	224	15,1
15	96	8,0	56	255	—
40	92	22,9	50	190	12,1
30	98	25,9	51	199	16,3
22	108	16,7	53	231	16,3
15	113	10,9	68	252	—
40	82	13,9	51	194	16,3
30	96	26,0	51	209	16,3
22	108	16,7	53	236	16,3
15	120	11,0	55	257	—
40	92	13,9	48	204	7,2
30	98	22,9	45	225	8,2
22	110	12,7	54	236	7,9
15	118	8,9	60	257	—

При производстве отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом основным сфероидизирующим элементом в настоящее время является магний, хотя впервые шаровидный графит был получен при обработке чугуна церием.

Однако, как указывалось выше, процесс обработки чугуна церием не получил широкого распространения вследствие присущих ему существенных недостатков.

В связи с тем, что в настоящее время в Советском Союзе вновь поднят вопрос о необходимости применения церия, рассмотрим преимущества и недостатки способов обработки чугуна церием и магнием.

Как видно из приведенных выше данных, обработка жидкого чугуна только церием, ферроцерием или мишметаллом без графитизирующих элементов неприменима.

Но даже двойная обработка чугуна церием и ферросилицием применима не во всех случаях, так как и при этом не устраняются все недостатки, присущие этому процессу.

Что же касается магния, то он может применяться один в чистом виде и в виде лигатур (для отливок с большими толщинами стенок), а также вместе с ферросилицием для сравнительно тонкостенных деталей.

Церий и магний, применяемые для обработки чугуна, имеют много общих характеристик, однако имеют и существенные различия.

Различная степень сфероидизации графита, вызываемая этими элементами, может быть объяснена неодинаковыми соотношениями между десульфурационной способностью и стабилизирующим эффектом. У магния, например, десульфуррующий эффект сильнее выражен, чем у церия, а стабилизирующее влияние магния слабее церия. Поэтому при обработке чугуна магнием содержание серы в чугуне не имеет принципиального значения; в случае же обработки церием этот вопрос приобретает решающее значение.

Основными преимуществами церия, как сфероидизирующего элемента, перед магнием является то, что при вводе его в чугун не происходит бурной реакции взаимодействия чугуна с церием, процесс проходит спокойно, без выплесков чугуна из ковша, вследствие чего отпадает надобность в постройке специальных защитных камер или специальных герметических ковшей или автоклавов, которые применяются при обработке чугуна магнием.

К числу недостатков цериевого процесса обработки чугуна необходимо отнести следующие.

1. Исходный чугун должен иметь низкое содержание серы. В чугуне доэвтектического состава даже с низким содержанием серы, после обработки его церием, наряду с шаровидным графитом имеются в большем или меньшем количестве включения пластинчатого графита, что ведет к соответствующему снижению механических свойств чугуна.

2. Обработанный церием чугун обладает очень высокой чувствительностью к скорости охлаждения, причем, чем большее количество церия вводится в чугун, тем эта чувствительность больше. Получить

тонкостенные детали из чугуна, обработанного церием без отбела, практически невозможно.

Снижать количество вводимого церия для устранения отбела в тонких сечениях нельзя, так как в этом случае в массивных сечениях шаровидный графит образуется только на периферии, а в центре графит кристаллизуется в пластинчатой форме. Для получения шаровидного графита в отливках, имеющих толстые стенки, необходимо вводить сравнительно большое количество церия. Поэтому если отливка имеет разные толщины стенок, то в тонких частях чугун получается белый. Это приводит к появлению трещин вследствие различной величины усадки белого чугуна, получающегося в тонких частях отливки и серого чугуна — в массивных частях.

3. Необходимость получения исходного чугуна с высокой температурой. Из обыкновенной вагранки с кислой футеровкой получить горячий чугун с низким содержанием серы (менее 0,04%) трудно.

Попытки проводить предварительное обессеривание чугуна были неэффективными и помимо того, что не удавалось получить чугун с низким содержанием серы, процесс обессеривания сопровождался таким большим понижением температуры чугуна, что становилось невозможным получать годные отливки.

4. Помимо технологических недостатков цериевого модификатора существенным недостатком является его высокая стоимость (церий примерно в 5 раз дороже магния).

При потреблении большого количества церия стоимость его должна значительно понизиться. Однако даже при налаженном производстве ферроцерия или мишметалла стоимость цериевого сплава останется значительно выше стоимости магния.

Если же учесть, что количество церия, вводимого в чугун, превышает количество вводимого магния, то преимущества магния в этом отношении будут еще более очевидными.

Разница в количестве вводимого магния и церия в чугун становится особенно заметной при обработке чугуна в герметизированных ковшах или автоклавах. В этих случаях количество вводимого магния удается сократить до 0,2% от веса обрабатываемого чугуна, в связи с более высоким усвоением магния, вводимого в чугун под давлением воздуха или паров самого магния.

Чугун, подвергающийся обработке магнием, может выплавляться в любом плавильном агрегате, в том числе в вагранке с шамотной футеровкой. Состав чугуна при обработке магнием может быть доэвтектический, эвтектический и заэвтектический. Низкое содержание серы в исходном чугуне является желательным, но и при высоком содержании серы можно получить графит шаровидной формы при некотором увеличении количества вводимого магния.

Из чугуна, обработанного магнием, можно отливать как тонкостенные детали (до 10 мм), так и детали с толщиной стенки до 1000 мм и более.

Хотя магний имеет много общих характеристик с церием (оба они легко соединяются с серой и кислородом и способствуют обра-

зованию карбидов), магний оказывает на чугун более сильное воздействие, чем церий. Поэтому магнием можно обрабатывать чугун с обычным содержанием серы и получать полностью сфероидальный графит.

В противоположность церию магний мало растворяется в чугуне, имеет низкую температуру плавления и кипения и малый удельный вес.

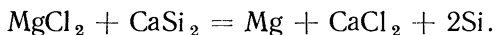
Существенным недостатком магния является бурная реакция при введении его в жидкий чугун, при этом выделяются пары магния, которые сгорают на поверхности чугуна с выделением тепла и света и процесс сопровождается выбрасыванием большого количества металла из открытого ковша.

При обработке чугуна магнием на поверхность чугуна поднимается довольно большое количество неметаллических включений, богатых сульфидами магния и окисных плен. Этот шлак надо тщательно удалять, чтобы поверхность металла была чистой, в противном случае отливки бывают сильно поражены черными пятнами.

в) **Магниевые соли.** Неудобства, связанные с применением магния и церия для обработки чугуна, заставили искать более совершенные сфероидизирующие присадки. При обработке чугуна солями магния последний выделяется из магниевых солей в атомарном состоянии, вследствие чего исключается его кипение и связанное с этим образование паров магния, обладающих высокой упругостью.

Наиболее приемлемыми солями оказались безводный хлористый ( $MgCl_2$ ) и фтористый магний ( $MgF_2$ ).

В качестве восстановителя применяется силикокальций ( $CaSi_2$ ). При обработке чугуна хлористым магнием с силикокальцием реакция восстановления магния из хлористого магния происходит по следующему уравнению:



В результате протекания этой реакции магний выделяется в атомарном состоянии и способствует образованию шаровидного графита; выделяющийся кальций также действует как сфероидизатор, вследствие чего уменьшается количество остаточного магния, необходимого для сфероидизации графита, а выделившийся кремний выполняет роль графитизатора, вследствие чего отпадает надобность в дополнительной обработке чугуна ферросилицием.

Обработке хлористыми солями может подвергаться чугун обычного химического состава. Содержание серы в исходном чугуне должно быть не выше 0,05—0,06%. При таком содержании серы и при температуре чугуна 1360—1380° количество вводимых солей составляет около 1% от веса обрабатываемого чугуна. Количество вводимого силикокальция также составляет 1% [36].

При более высоком содержании серы в исходном чугуне и при более высокой температуре чугуна количество вводимой соли и восстановителя соответственно увеличивается.

При обработке чугуна хлористым магнием шаровидная форма графита получается при остаточном содержании магния, равном 0,01%. Остаточное содержание кальция при этом составляет 0,04% [36].

Процесс обработки чугуна хлористым магнием значительно обессеривает чугун (до 0,007%) и понижает содержание кислорода до 0,001%. В отливках отсутствуют черные пятна, свойственные чугуну, обработанному магнием и церием. Полученный чугун с шаровидной формой графита приобретает весьма высокие механические свойства. Так величина предела прочности при растяжении достигает 65 кг/мм<sup>2</sup>, а величина относительного удлинения в литом состоянии 6%.

Следует отметить, что шаровидная форма графита в чугуне, обработанном хлористыми солями, магния, получается в отливках независимо от сечения отливки.

По Американским данным положительные результаты были получены при обработке чугуна смесью солей, состоящей из: 0,8% хлористого магния (MgCl<sub>2</sub>); 0,4% хлористого натрия (NaCl); 1,8% силикокальция (CaSi<sub>2</sub>).

Исходный чугун при обработке его указанной смесью солей с восстановителем должен содержать не более 0,03% серы. После обработки чугуна указанной смесью производится дополнительная обработка чугуна ферросилицием в количестве 0,25% [37].

Химический состав чугуна и полученные механические свойства приведены в табл. 25.

Таблица 25

Чугун до обработки и после обработки солями магния	Химический состав в %						Механические свойства			
	C	Si	Mn	S	P	Mg	$\sigma_b^B$ кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_s^B$ кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ в %	НВ
До обработки	4,61	1,22	0,42	0,017	0,05	—	9,25	—	—	121
После обработки	3,34	2,90	0,44	0,009	0,05	0,023	55,9	42,2	19,5	187
До обработки	4,10	1,22	0,58	0,03	0,05	—	11,5	—	1,0	137
После обработки	3,39	2,97	0,58	0,09	0,05	0,026	59,3	45,0	12,5	197

По Чехословацким данным [38] чугун с шаровидным графитом был получен при обработке хлористыми солями следующего состава: 0,8% NaCl; 1,6% MgCl<sub>2</sub>; 3,6% CaSi<sub>2</sub>.

При этом содержание серы в исходном чугуне составляло 0,038%. К недостаткам процесса обработки чугуна хлористыми солями магния следует отнести высокую его гигроскопичность. Соль перед

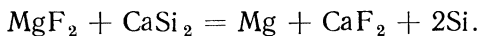
ее употреблением необходимо просушивать и хранить в герметической таре. В связи с высокой гигроскопичностью хлористого магния при его введении в чугун образуется большое количество дыма. Поэтому в местах обработки чугуна хлористыми солями необходима искусственная вентиляция.

Порядок обработки чугуна смесью хлористого магния и силикокальция следующий: перед выпуском металла из печи на дно ковша засыпается смесь хлористого магния и силикокальция. Затем на  $\frac{2}{3}$  объема ковш заполняется чугуном. Металл в ковше тщательно перемешивается, счищается шлак и наводится новый шлак из сухого кварцевого песка, после чего чугун подается на разливку.

Второй магниевой солью, применяемой для обработки чугуна, является фтористый магний. При обработке чугуна смесью фтористого магния и силикокальция (2% фтористого магния и 2% бисилицида кальция в одном случае и 4% во втором), графитизирующей присадки в чугун не вводилось.

Остаточное содержание магния в этом случае выше (0,05 и 0,06%), чем при обработке чугуна хлористыми солями. Количество дыма в этом случае также значительно меньше.

Реакция восстановления магния из фтористых солей магния протекает аналогично реакции восстановления магния из хлористых солей магния



Преимущества фтористых солей перед хлористыми заключаются в том, что они не гигроскопичны.

К недостаткам фтористых солей следует отнести их высокую стоимость, которая значительно выше стоимости хлористых солей.

г) **Комплексные присадки.** В настоящее время проводятся исследовательские работы по применению комплексных сфероидизаторов, состоящих из церия и кальция [36]. Проведенные опыты показали, что при обработке чугуна силикокальцием в количестве 0,4% и мишметаллом в количестве 0,1% в чугуне получается полностью шаровидная форма графита. Функции сфероидизатора в данном случае выполняет главным образом кальций. Так как церий вводится в незначительном количестве, в отливках, как правило, не образуется цементита, что позволяет полностью исключить термическую обработку, обычно применяемую для разложения структурно-свободного цементита.

Вследствие наличия значительного количества феррита в структуре металлической основы чугуна, показатели пластических свойств при обработке комплексными сфероидизаторами получаются выше, чем при обработке чугуна магнием.

При таком способе обработки чугуна количество неметаллических включений в отливках (черных пятен и окисных плен) резко сокращается. Содержание серы в исходном чугуне в данном случае должно быть не выше 0,03%.

Механические свойства чугуна, обработанного комплексной присадкой, получаются следующие:  $\sigma_b = 50 \div 55 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_s = 40 \div 42 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\delta = 3 \div 4 \%$ .

К недостаткам комплексной присадки следует отнести то, что шаровидная форма графита получается только в отливках диаметром до 50 мм и при низком содержании серы в чугуне. Это обстоятельство не позволяет применять вагранки с шамотной футеровкой для выплавки чугуна. Рассмотрение присадок, применяемых для получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, позволяет сделать вывод, что в настоящее время наиболее перспективной присадкой является магний.

Магний предпочтительнее всего вводить в чистом виде или в виде магниевых лигатур.

Что же касается способов ввода магния в чугун, то из всех существующих способов в настоящее время наиболее перспективными являются способы ввода магния под давлением в автоклавах или герметизированных ковшах.

Применение цериевых лигатур может быть рекомендовано для отливок с небольшой и равномерной толщиной стенок и в тех случаях, если этому не препятствуют экономические соображения. Высокая стоимость церия и необходимость ведения плавки чугуна в электрических печах для получения соответствующей температуры чугуна и низкого содержания серы, по-видимому, будут служить серьезным препятствием широкого применения цериевых лигатур.

Применение солей магния и комплексных добавок является весьма перспективным, однако исследования в этой области еще не вышли из стадии лабораторных экспериментов.

## ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

При отливке деталей из чугуна, обработанного магнием (или другими сфероидизирующими присадками), следует учитывать специфические особенности его литейных свойств, процесс кристаллизации этого чугуна и процесс охлаждения отливок в литейной форме. Без достаточного учета указанных особенностей не удастся получить качественные отливки и избежать большого количества брака литья.

### 1. ВЫБОР ПЛОСКОСТИ РАЗЪЕМА И ПОЛОЖЕНИЯ ОТЛИВКИ В ФОРМЕ

При разработке технологического процесса получения отливок из чугуна с шаровидным графитом большое значение имеет правильный выбор плоскости разъема формы, так как от этого в значительной мере зависит получение отливок без литейных дефектов.

Выбирая плоскость разъема и положение отливки в форме необходимо стремиться к тому, чтобы в форме было как можно меньше горизонтальных поверхностей большой протяженности. Это требование вызвано тем, что в чугуне, обработанном магнием, образуется большое количество неметаллических включений, которые вследствие небольшого удельного веса всплывают вверх и, соприкасаясь с горизонтальными поверхностями формы или стержней, задерживаются на этих поверхностях или внутри отливки и образуют дефекты, получившие название «черных пятен», которые значительно снижают качество отливок.

Практика показала, что с точки зрения уменьшения количества черных пятен наилучшие результаты получаются при вертикальном положении отливки в форме. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для всплывания неметаллических включений в прибыль, устанавливаемую в верхней части отливки. С этой же целью рекомендуется устанавливать литейные формы на заливку под наклоном, если конфигурация отливки не позволяет производить заливку форм в вертикальном положении.

Имея в виду, что чугун с шаровидным графитом весьма склонен к образованию усадочных раковин, при выборе плоскости разъема и положения отливки в форме необходимо учитывать желательность создания направленного затвердевания отливки. С этой целью

наиболее массивные части прибыли и отливки располагаются с таким расчетом, чтобы процесс затвердевания отливки начинался с более тонких частей, расположенных внизу, и заканчивался в более массивных частях, как это делается при стальном литье.

В остальном же, при определении плоскости разъема формы следует руководствоваться положениями, разработанными для отливок из чугуна с пластинчатым графитом и стали.

## 2. ВЫБОР УСАДОЧНОГО МАСШТАБА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОДЕЛЕЙ

При отливке деталей со сложной конфигурацией литейная форма, в большинстве случаев, состоит из многих стержней, имеет различные выступающие части, которые вместе со стержнями создают определенное торможение усадки в процессе остывания отливки, вследствие чего конечная величина линейной усадки становится меньше, чем при свободном ее протекании.

Уменьшение величины линейной усадки при наличии механического торможения ее объясняется тем, что в этом случае в отливке возникают пластические деформации, за счет которых увеличивается длина отливки, а линейная усадка соответственно уменьшается.

Знание величины затрудненной усадки крайне важно, так как размеры отливок после полного их охлаждения находятся в прямой зависимости от величины затрудненной усадки.

Исследования свободной линейной усадки чугуна с шаровидным графитом показали, что ее величина меньше, чем у стали и чугуна с пластинчатым графитом. Это объясняется тем, что чугун с шаровидным графитом имеет большое предусадочное расширение.

Что же касается величины затрудненной линейной усадки, то она практически одинакова с затрудненной линейной усадкой серого чугуна, так как в условиях торможения начального расширения и доперлитной усадки их величины становятся практически одинаковы, как в сером чугуне, так и в чугуне с шаровидным графитом, а величина расширения при перлитном превращении и величина послеperlитной усадки одинаковы как при свободном протекании усадки, так и в условиях торможения.

Практически модели и стержневые ящики, имеющие сложную конфигурацию, следует изготавливать по усадочному метру 0,5—0,8%. Модели для отливок простейшей конфигурации изготавливают по усадочному метру 0,8—1,0%.

Как известно, модели для сложного стального литья изготавливают по усадочному метру 1,5—1,8%, а для простых деталей по усадочному метру 1,8—2,0%.

В табл. 26 приведены величины свободной и затрудненной линейной усадки для различных чугунов и углеродистой стали.

Если отливки подвергаются термической обработке — отжигу, в результате которого происходит выделение графита, сопровождающееся увеличением объема, а следовательно, и линейных размеров

Материал	Величина линейной усадки в %		
	свободной	при слабом торможении	при сильном торможении
Серый чугун . . . . .	1,0—1,3	1,0	0,8
Ковкий чугун . . . . .	1,5—1,8	1,5	1,3
Углеродистая сталь . . . . .	2,0—2,5	2,0	1,8
Чугун с шаровидным графитом . . . .	0,5—1,2	1,0	0,8

отливки, то при назначении усадочного масштаба следует учитывать это увеличение и соответственно уменьшать величину усадки, принимаемую при изготовлении моделей и стержневых ящиков. Практически увеличение линейных размеров при термической обработке отливок из высокопрочного чугуна при литье в песчаные формы составляет 0,4—0,5%.

### 3. ЛИТНИКОВАЯ СИСТЕМА

При выборе типа литниковой системы и расчете сечений ее элементов для отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом следует учитывать специфические особенности этого чугуна, как литейного материала.

Таблица 27

Металл	Коэффициент расхода металла
Чугун, обработанный магнием . . . . .	0,47—0,50
Сталь 35Л . . . . .	0,46—0,56
Серый чугун . . . . .	0,50—0,53

Изучение процесса течения металла в вертикальных цилиндрических каналах показало, что коэффициент расхода чугуна, обработанного магнием, несколько ниже коэффициента расхода углеродистой стали и серого чугуна, что видно из табл. 27 [39].

Пониженный коэффициент расхода у чугуна, обработанного магнием, объясняется, по-видимому, наличием сульфидов и других неметаллических включений, находящихся в чугуне во взвешенном состоянии.

Учитывая пониженный коэффициент расхода чугуна, обработанного магнием, при расчете элементов литниковой системы необходимо принимать более высокую скорость заливки в сравнении с чугуном с пластинчатым графитом.

Необходимость повышенной скорости заливки форм вызывается еще тем, что чугун, обработанный магнием, поступает на заливку форм, как правило, с пониженной температурой в сравнении с серым чугуном. Кроме этого, более длительное заполнение форм приводит к образованию плен, вследствие окисления жидкого чугуна.

Сокращение продолжительности времени заливки форм может быть достигнуто за счет увеличения площади сечения подводющих каналов, определяемой при расчете элементов литниковой системы, а следовательно, и соответствующего увеличения площади сечения шлакоуловителей и стояка.

Для более эффективного улавливания неметаллических включений перед поступлением металла в форму рекомендуется применять более развитые шлакоуловители по сравнению с серым чугуном.

В общем случае, литниковая система при отливке деталей из чугуна с шаровидным графитом состоит из стояка, шлакоуловителя, подводющих каналов. Однако в некоторых случаях можно обойтись без какого-либо одного или нескольких перечисленных элементов. Так, например, при заливке формы в прибыль надобность в стояке, шлакоуловителе и подводющих каналах полностью отпадает.

Практически на многих деталях оправдали себя так называемые центробежные шлакоуловители с соответствующим выпором. В таких шлакоуловителях отделение шлака от металла производится наиболее эффективно, и выделяющийся шлак поднимается в выпор, не попадая в отливку.

Расчет сечений элементов литниковой системы для отливок из чугуна с шаровидным графитом может производиться по аналогии с расчетом элементов литниковой системы для отливок из серого чугуна по следующей формуле:

$$F = \frac{Q}{\tau k} \text{ см}^2,$$

где  $F$  — суммарная площадь сечения питателей в  $\text{см}^2$ ;

$Q$  — вес жидкого металла в  $\text{кг}$ ;

$\tau$  — продолжительность заливки, сек.  $\tau = 1,1\sqrt{Q}$ ;

$k$  — удельная скорость заливки в  $\text{кг/сек}$  на  $1 \text{ см}^2$  сечения питателей.

Удельная скорость заливки определяется в зависимости от веса  $Q$  отливки и объемного коэффициента  $k_v$

$$k_v = \frac{Q}{V} \text{ кг/дм}^3,$$

где  $Q$  — вес жидкого металла;

$V$  — объем отливки в  $\text{куб. дм}$ , определяемый по максимальным габаритам отливок.

Величина « $k$ » определяется по табл. 28.

Подсчитанное по этой формуле сечение подводющих каналов увеличивается на 30—50%. Сечения остальных элементов литниковой системы подсчитываются по соотношению

$$F_{нк} : F_{шл} : F_{ст} = 1 : 1,2 : 1,4 [40] \text{ или}$$

$$1 : 1,2 : 1,1 [39]$$

Вес отливки в кг	Объемный коэффициент $k_v$													
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
	Удельная скорость заливки $k$													
До 100	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
500	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
1 000	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
5 000	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2
50 000	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3

#### 4. ПИТАНИЕ ОТЛИВОК

Усадка чугуна, обработанного магнием, происходящая в жидком состоянии, и в процессе кристаллизации сопровождается появлением в отливках дефектов усадочного происхождения в виде усадочных раковин или усадочной пористости.

Как указывалось ранее, характер усадочных дефектов в отливках из чугуна с шаровидным графитом зависит от состава чугуна. В чугуне эвтектического и близкого к эвтектическому составу образуются преимущественно сосредоточенные усадочные раковины, а в чугуне доэвтектического состава образуется преимущественно усадочная пористость.

Установленные закономерности образования усадочных дефектов в отливках из чугуна с шаровидным графитом значительно облегчают борьбу с ними. Для питания отливок, заливаемых чугуном эвтектического состава, при разработке технологического процесса предусматривается установка прибылей сравнительно небольших размеров, так как в этом случае условия пополнения усадки являются наиболее благоприятными. Для питания отливок из чугуна с шаровидным графитом доэвтектического состава предусматривается установка значительно больших прибылей, так как в этом случае условия пополнения усадки вследствие происходящей усадки значительно затруднены из-за образования сильно разветвленных дендритов аустенита, и чем меньше углеродный эквивалент, тем труднее пропитать отливку.

Отливки, залитые чугуном доэвтектического состава с малым углеродным эквивалентом часто пропитать надлежащим образом совсем не удается, несмотря на установку больших по размеру прибылей.

Большой объем прибылей, устанавливаемых на отливках из чугуна с шаровидным графитом доэвтектического состава объясняется тем, что в этом случае прибыль должна не только пополнить усадку чугуна, но и создать необходимый гидростатический напор, обеспечивающий продвижение жидкого чугуна по каналам между ветвями дендритов, так как одной силы тяжести в данном случае оказывается недостаточно.

Наиболее эффективным средством предотвращения усадочной пористости является установка холодильников, которые повышают скорость кристаллизации чугуна и тем самым устраняют или значительно уменьшают усадочную пористость.

Для устранения усадочных раковин и усадочной пористости при конструировании отливок соблюдается так называемый принцип направленного затвердевания отливок, при котором создаются такие условия, когда затвердевание начинается в частях отливки, наиболее удаленных от источника питания. Прибыль в этом случае остается наиболее горячей и затвердевает последней.

Таблица 29

Установка прибылей с целью получения отливок без усадочных раковин резко снижает выход годного. Так, при отливке деталей из чугуна с шаровидным графитом выход годного по практическим данным, как правило, не превышает 70%, снижаясь в отдельных случаях до 40—50%, в зависи-

Наименование	Выход годного в %
Серый чугун . . . . .	65—75
Чугун с шаровидным графитом . . . . .	60—70
Углеродистая сталь . . . . .	55—60
Ковкий чугун . . . . .	45—55

мости от конструкции отливки, химического состава чугуна и условий охлаждения отливки в форме. Поэтому определение оптимального количества и соответствующих размеров прибылей приобретает большое значение, так как приводит к повышению выхода годного.

В табл. 29 приведены практические данные о выходе годного для различных видов чугуна и углеродистой стали.

Для определения размеров прибылей, устанавливаемых на отливках, пользуются в большинстве случаев эмпирическими формулами или графиками. В 1956 г. были опубликованы результаты исследований по питанию отливок из чугуна с шаровидным графитом при установке верхних открытых прибылей [41]. Авторами была выведена зависимость объема прибылей от «коэффициента формы»  $t$ , представляющего собой сумму длины и ширины простой отливки (или части ее), деленную на толщину стенки

$$t = \frac{L + w}{T},$$

где  $L$  — длина отливки;  
 $w$  — ширина отливки;  
 $T$  — толщина отливки.

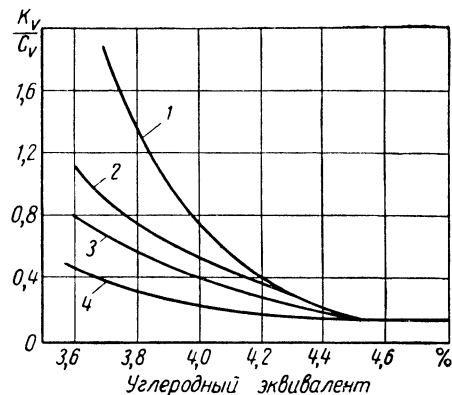
Относительный объем прибыли представляет собой отношение

$$\frac{k_v}{c_v},$$

где  $k_v$  — объем прибыли;  
 $c_v$  — объем отливки.

Зная эти величины, можно определить размеры прибылей в зависимости от химического состава чугуна, определяемого углеродным эквивалентом по фиг. 42.

Авторы показали, что для чугуна доэвтектического состава объем прибылей, имеющих форму цилиндра, плиты или куба зависит от углеродного эквивалента: чем меньше углеродный эквивалент, тем больше размеры прибылей, необходимых для питания отливок. Эта зависимость показана на фиг. 43.



Фиг. 42. Диаграмма для определения относительного объема прибыли в зависимости от углеродного эквивалента:

1 —  $t = 2 \div 4$ ; 2 —  $t = 6 \div 8$ ; 3 —  $t = 10 \div 16$ ;  
4 —  $t = 20 \div 28$ .

Для отливок, имеющих стенки различной толщины, объем прибылей определяется по формуле:

$$V_{np} = V_1 + aV_2,$$

где  $V_{np}$  — объем прибыли;

$V_1$  — объем наиболее толстой части отливки;

$V_2$  — объем наиболее тонкой части отливки;

$a$  — коэффициент, зависящий от отношения толщин частей отливки и конфигурации отливки.

Величина коэффициента  $a$  определяется по графику, приведенному на фиг. 44.

Диаметр прибыли определяется по следующей формуле:

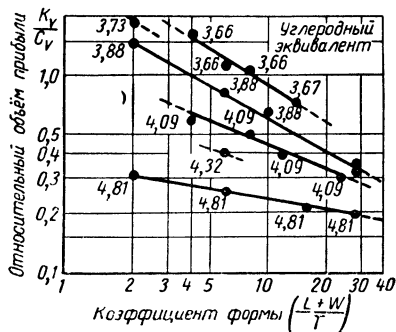
$$d_{np} = \sqrt{\frac{4}{\pi k} V_{np}},$$

где  $d_{np}$  — диаметр прибыли;

$V_{np}$  — объем прибыли;

$k$  — коэффициент, равный 0,5—1,0.

Для чугуна доэвтектического состава берутся меньшие значения коэффициента  $k$ .



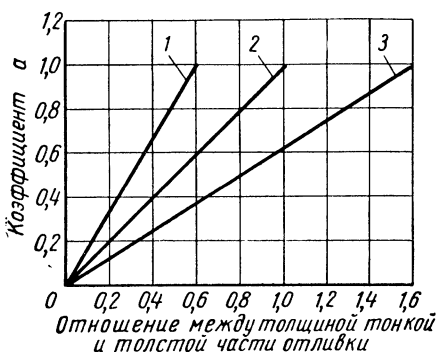
Фиг. 43. Зависимость объема прибылей от углеродного эквивалента.

Высота прибыли определяется по следующей формуле:

$$h_{np} = kd_{np}$$

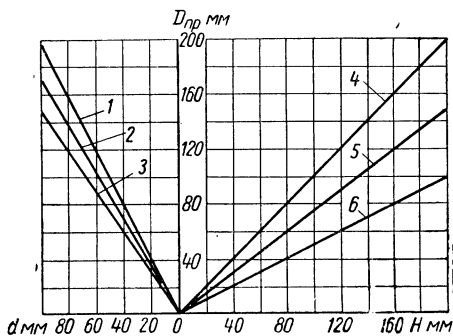
Для определения размеров боковых прибылей, питающих отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, предложена номограмма, показанная на фиг. 45 [42].

Определяется диаметр  $d$  вписанной окружности в утолщенной части отливки; восстанавливается перпендикуляр до пересечения с соответствующей кривой в левой части графика. Из точки пересечения проводится горизонталь, которая и укажет искомый диаметр



Фиг. 44. График для определения величины коэффициента  $a$ :

1 — цилиндр—плита; 2 — цилиндр — цилиндр или плита—плита; 3 — плита—цилиндр.



Фиг. 45. Номограмма для определения размеров боковых прибылей:

1 — нижние боковые прибыли; 2 — прибыли с подачей в них металла через отливку; 3 — прибыли с подачей в них металла из литников; 4 — прямые, закрытые прибыли; 5 — верхние боковые прибыли; 6 — нижние боковые прибыли.

прибыли. Продолжив горизонталь до пересечения с соответствующей кривой в правой части графика и опустив из точки пересечения перпендикуляр на ось абсцисс, найдем высоту прибыли  $H$ .

Одним из эффективных мероприятий по повышению выхода годного является применение экзотермических смесей для обогрева прибылей.

Экзотермические смеси, будучи применены в виде вставок в прибылях, после сгорания их от соприкосновения с жидким металлом, значительно повышают температуру металла в прибыли и тем самым улучшают условия питания отливок из прибылей.

Кроме этого, образующийся от сгорания экзотермических смесей теплоизоляционный шлак значительно понижает потери тепла металлом в атмосферу.

Опытным путем были подобраны составы экзотермических смесей применительно к отливкам из высокопрочного чугуна, так как составы экзотермических смесей, применяемые для стального литья, оказались непригодными для литья из высокопрочного чугуна, вследствие высокой температуры воспламенения.

Разработанные составы смесей опробовались при различных температурах заливки в пределах от 1200 до 1330° [43].

В результате практического опробования лучшими оказались следующие составы экзотермических смесей.

1. 55—60% железо-алюминиевого термита, 7% селитры калиевой или натриевой, 3% алюминиевого порошка, 25—30% кварцевого песка, 4% жидкого стекла, 1% воды.

2. 45% железной руды или железной окалины, 7% селитры, 18% алюминиевого порошка, 25% кварцевого песка, 4% жидкого стекла, 1% воды;

3. 54% железо-алюминиевого термита, 17% марганцевой руды, 6% алюминиевого порошка, 18% кварцевого песка, 4% жидкого стекла, 1% воды;

4. 42% железной руды или железной окалины, 15% марганцевой руды, 20% алюминиевого порошка, 18% кварцевого песка, 4% жидкого стекла, 1% воды.

Экзотермические смеси должны иметь предел прочности при растяжении 0,15—0,45 кг/см<sup>2</sup>, газопроницаемость 167—173, влажность 5%.

Компоненты, входящие в состав экзотермической смеси, загружаются в смешивающие бегуны, интенсивно перемешиваются, добавляется вода и после дополнительного перемешивания в течение 3—5 мин. добавляется жидкое стекло. Общая продолжительность перемешивания составляет 8—15 мин.

При формовке вставок из экзотермических смесей, уплотнение смеси должно быть очень слабым для обеспечения достаточной проницаемости, в связи с образованием значительного количества газов при горении экзотермических смесей. С этой же целью на вставках делаются наклоны душиком диаметром 4 мм.

Изготовленные втулки подвергаются сушке при температуре 150—200° в течение 2—3 час. Высушенные вставки хранятся в сухом месте, в связи с их большой гигроскопичностью.

Вставки из экзотермических смесей изготавливаются по форме прибыли, устанавливаемой на отливке. Для цилиндрических прибылей форма вставок показана на фиг. 46.

Толщина вставок определяется в зависимости от диаметра прибыли, на которую они установлены:

Диаметр прибыли в мм . . . . .	50—70	71—80	81—100	101—150	151—250
Толщина вставки » » . . . . .	20—25	25—30	30—35	35—40	40—45

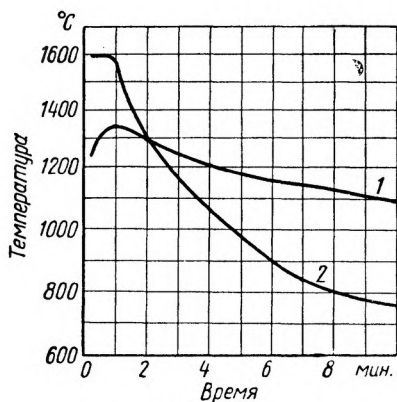
В результате горения экзотермической смеси температура чугуна в прибыли резко повышается (фиг. 47).

На фиг. 48 показаны общие виды, а на фиг. 49 разрезы отливок, залитые без применения экзотермических смесей (слева) и с применением экзотермических смесей (справа). На фиг. 50 показана отливка, залитая с применением экзотермической смеси при установке закрытой прибыли.

Исследование микроструктуры чугуна показало, что в верхней части прибыли (фиг. 51), где развивается максимальная температура,

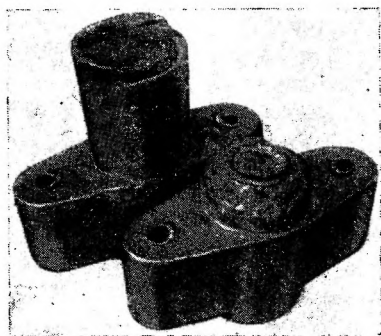


Фиг. 46. Форма вставки, изготовленной из экзотермической смеси, для прибылей цилиндрической формы.

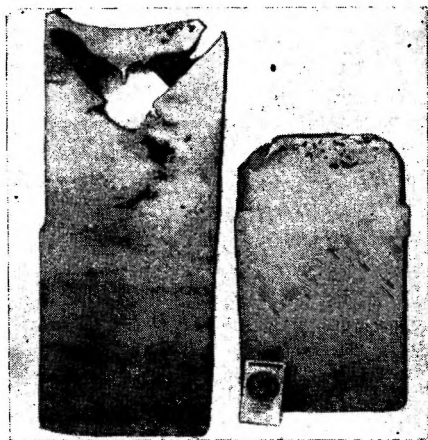


Фиг. 47. Изменение температуры при горении вставок, изготовленных из экзотермических смесей:

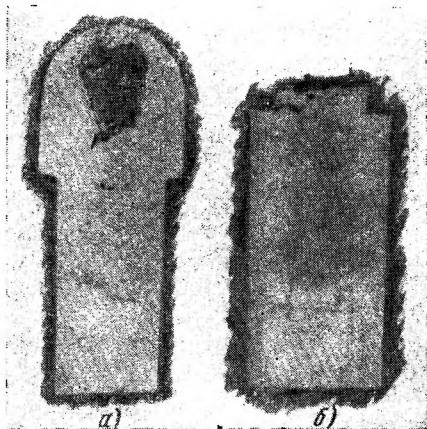
1 — термопара установлена у основания прибыли; 2 — термопара установлена в центре прибыли.



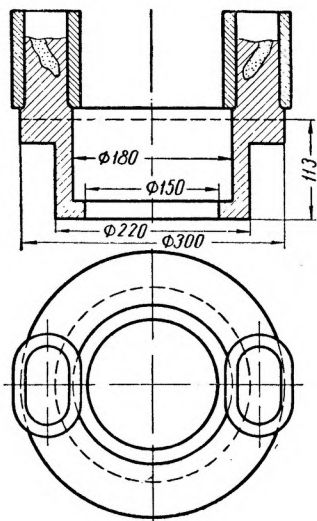
Фиг. 48. Отливки, залитые без применения экзотермических смесей (слева) и с экзотермическими смесями (справа).



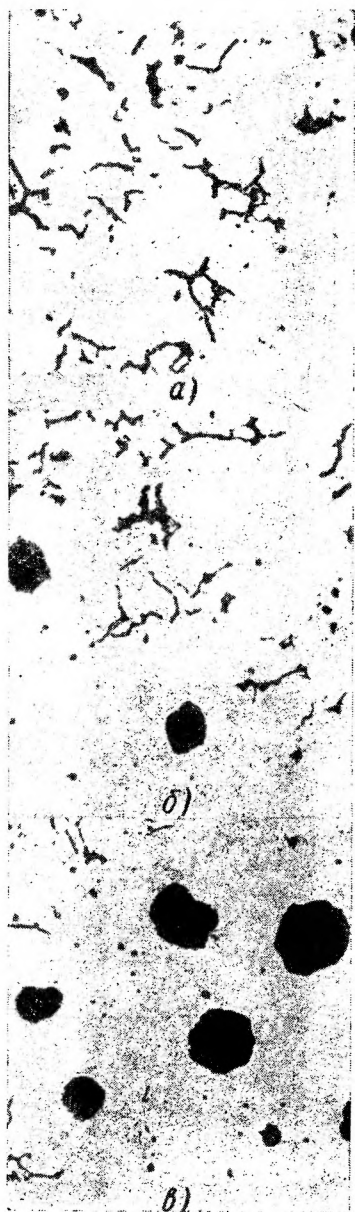
Фиг. 49. Разрезы отливок, показанных на фиг. 48.



Фиг. 50. Разрезы отливок, отлитых без экзотермических вставок (а) и с экзотермическими вставками (б).



Фиг. 51. Отливка с экзотермической приблелью.



Фиг. 52. Форма графита в отливке, залитой чугуном с применением вставок из экзотермических смесей.

графит имеет пластинчатую форму (фиг. 52, а) в нижней части прибыли графит имеет смешанную структуру (фиг. 52, б), а непосредственно в отливке графит имеет шаровидную форму (фиг. 52, в) [44].

Применение экзотермических смесей позволяет повысить выход годного до 80—85% и значительно снизить себестоимость литья.

На фиг. 53 показана разрезанная отливка, питание которой производилось из прибыли с экзотермической вставкой.

Как видно из фотографии, отливка имеет очень небольшой остаток прибыли и совершенно плотный металл во всей отливке без усадочных раковин и усадочной пористости.

Вверху показан шлак, образовавшийся в результате сгорания вставки, изготовленной из экзотермической смеси.

### 5. ПОДВОД МЕТАЛЛА К ОТЛИВКЕ

Место подвода металла к отливке определяется размерами и конфигурацией отливаемой детали, а также положением отливки в форме. При отливке деталей, в которых необходимо выдержать принцип направленного затвердевания и для питания которых устанавливаются прибыли, металл подводится в наиболее массивные части отливки или непосредственно в прибыль (в нижнюю ее часть). При наличии открытых прибылей металл можно заливать непосредственно в прибыль сверху. При закрытых прибылях металл целесообразнее подводить в нижнюю боковую часть прибыли.

При отливке деталей, склонных к появлению литейных напряжений и имеющих сравнительно равномерную толщину стенок, металл следует подводить в наиболее тонкие части отливки с целью их разогрева и выравнивания скорости охлаждения во всей отливке в целом.

При отливке высоких деталей рекомендуется подводить металл к отливке сифоном, либо комбинированным способом — сифоном и дождевым литником.

Исключительно большое значение имеет положение отливки в форме в момент заливки чугуна в форму и последующей кристаллизации чугуна. В соответствии с выбранным положением отливки определяется и место подвода металла к отливке.

В практике литейных цехов, при отливке деталей из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом применяются вертикальная, горизонтальная и наклонная заливка форм, а также горизонтальная формовка, наклонная заливка с последующим поворотом

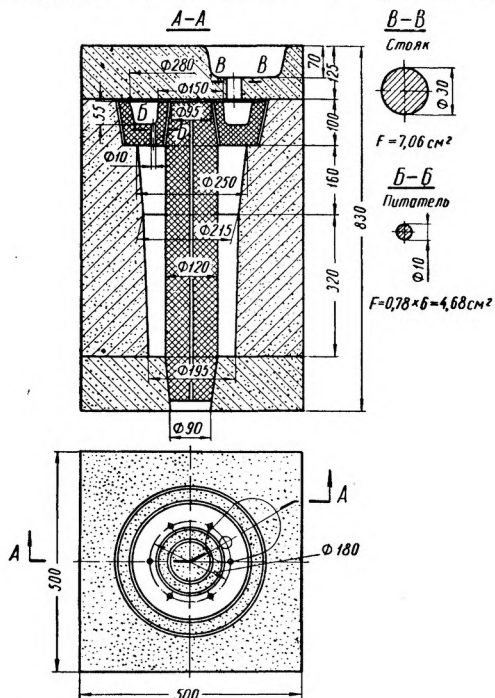


Фиг. 53. Разрезанная отливка, питание которой производилось из прибыли с экзотермической смесью.

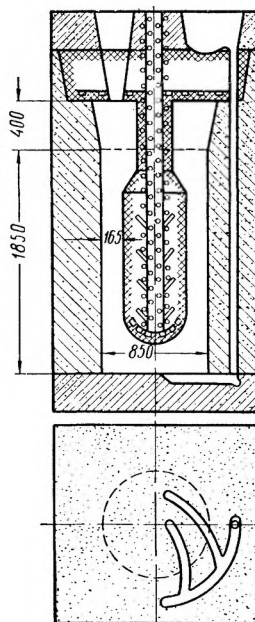
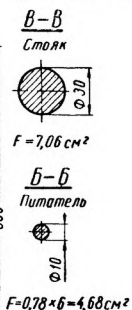
формы в вертикальное положение, в котором происходит кристаллизация чугуна и питание отливки.

Рассмотрим характерные примеры различных способов заливки форм при производстве отливок из чугуна с шаровидным графитом.

а) **Вертикальная заливка форм.** Цилиндрические детали, имеющие форму труб, втулок и т. п. рекомендуется заливать вертикально с установкой прибылей в верхней части отливки.



Фиг. 54. Схема формовки втулки гидравлического пресса.



Фиг. 55. Схема формовки плунжера.

В зависимости от высоты отливки подвод металла может осуществляться сверху дождевым литником, снизу сифоном, а также комбинированным способом: сифоном и дождевым литником.

На фиг. 54 показана схема формовки втулки гидравлического пресса весом 50 кг. Заливка формы производится в вертикальном положении. Для питания отливки установлена верхняя кольцевая прибыль. Подвод металла осуществляется непосредственно в прибыль дождевым литником, выполненным в стержне. Этот же стержень осуществляет центрирование и закрепление внутреннего стержня.

На фиг. 55 показана схема формовки плунжера с подводом металла к отливке сифоном. Литниковая система состоит из стояка, шлакоуловителя и двух подводящих каналов. Для питания отливки в верхней ее части установлена кольцевая прибыль, являющаяся продолжением тела отливки. Для вывода воздуха из формы, а также обра-

зующихся в процессе заливки формы газов, в верхней части отливки установлен выпор [45].

Более высокие детали, имеющие сравнительно небольшие толщины стенок, заливаются вертикально с комбинированным подводом металла к отливке.

На фиг. 56 показана схема формовки бочки ролика рольганга блюминга весом 1600 кг. Форма собирается из пяти опок. Питание отливки, как и в предыдущих случаях, осуществляется через верхнюю прибыль. Подвод металла к отливке производится сифоном и дождевым литником. В начале металл поступает в стояк и заполняет форму снизу. После заполнения нижней части формы примерно на 25% открывается пробка и металл поступает в верхний дождевой литник. Такая система заливки предохраняет отливку от образования корольков и улучшает условия питания отливки, так как в прибыль поступает наиболее горячий металл вплоть до окончания заливки.

В качестве примера вертикальной заливки, показывающего одновременно, что чугун с шаровидным графитом имеет хорошую жидкотекучесть и хорошо заполняет литейную форму, на фиг. 57 показана схема отливки сварочных прутков из чугуна с шаровидным графитом толщиной 6 мм при длине около 400 мм.

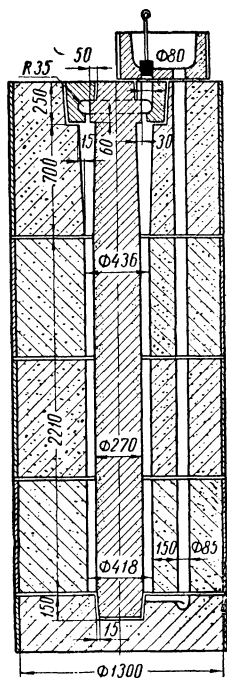
Преимущества вертикальной заливки, выявленные при отливке цилиндрических деталей, сохраняются во многих случаях и при отливке некоторых фасонных деталей.

На фиг. 58 показана отливка заготовки червячной шестерни диаметром 800 мм и весом 134 кг. Как видно из рисунка, шестерня заливается в вертикальном положении; подвод металла осуществляется через стояк и два подводящих канала, расположенные на разной высоте. Для питания отливки установлена одна верхняя прямоугольная прибыль [45].

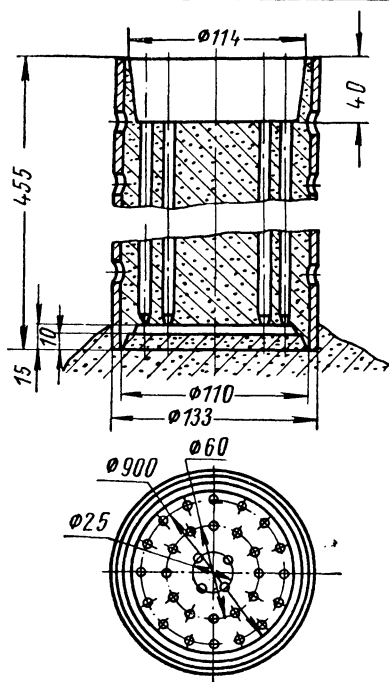
Даже весьма сложные детали из чугуна с шаровидным графитом отливаются вертикально. На фиг. 59 показана отливка корпуса весом 123 кг, имеющего сравнительно большую высоту и малую толщину стенки. Подвод металла осуществлен через стояк и подводящие каналы, расположенные в три яруса. Питание отливки осуществляется двумя верхними прибылями [45].

Характерным примером, показывающим преимущества вертикальной заливки, является лопатка направляющего аппарата гидротурбин весом 1800 кг, чертеж отливки которой показан на фиг. 60. Первоначально такие лопатки заливались горизонтально, однако впоследствии завод был вынужден перейти на вертикальную заливку. На фиг. 61 показана литейная форма лопатки, установленная для вертикальной заливки. Во избежание образования усадочных раковин в нижней массивной цапфе на ней установлены чугунные холодильники для увеличения скорости охлаждения цапфы. На верхней короткой цапфе установлена прибыль для питания отливки.

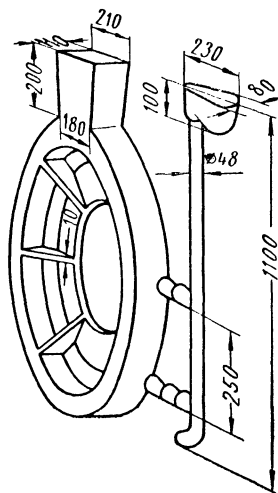
Как уже указывалось ранее, чугун с шаровидным графитом широко применение получил для отливки коленчатых валов. В этом случае наиболее полно выявляются преимущества чугуна с шаро-



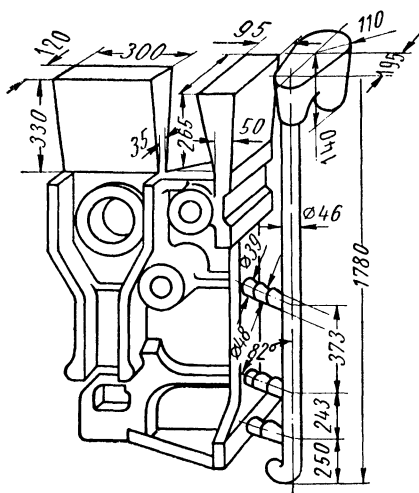
Фиг. 56. Схема формовки бочки ролика рольганга.



Фиг. 57. Схема формовки сварочных прутков.



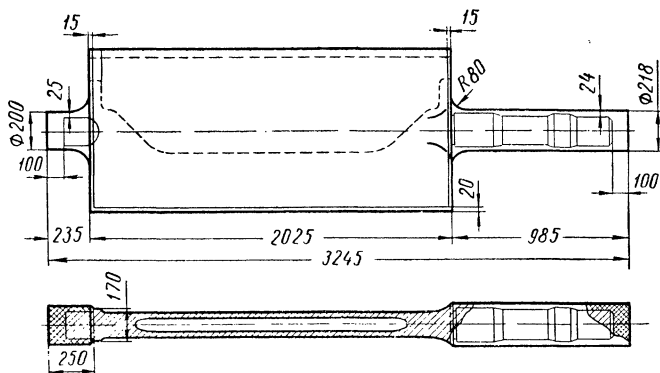
Фиг. 58. Отливка заготовки червячной шестерни.



Фиг. 59. Отливка корпуса.

видным графитом перед сталью. Вследствие большого разнообразия коленчатых валов, отливаемых из чугуна с шаровидным графитом, технология отливки их также различна. Во многих случаях коленчатые валы заливаются вертикально.

На фиг. 62 показана отливка небольшого коленчатого вала весом 47 кг, заливаемого вертикально. В одной форме располагается по два вала. Формовка таких коленчатых валов производится горизонтально; подвод металла осуществляется через один стояк и четыре подводящих канала, расположенные в два яруса. На одном валу установлена открытая прибыль, а на другом валу прибыль с экзотермической вставкой [45].



Фиг. 60. Чертеж отливки лопатки направляющего аппарата гидротурбины.

Коленчатые валы трактора ДТ-54 (опытные) заливались вертикально, при этом для каждого вала применена отдельная литниковая система и отдельные прибыли. Подвод металла к отливке осуществлен в три яруса.

б) **Горизонтальная заливка форм.** В тех случаях, когда при отливке тех или иных деталей нельзя полностью использовать преимущества вертикальной заливки, или когда вертикальная заливка сильно усложняет технологический процесс получения отливки, в этих случаях заливка форм производится горизонтально. Для питания отливки в этом случае могут устанавливаться прямые открытые прибыли, прямые или боковые закрытые прибыли или одновременно открытые и закрытые, прямые и боковые.

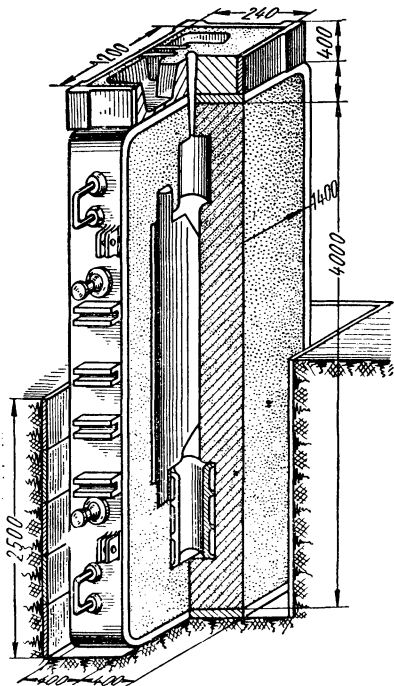
В соответствии с выбранным типом прибылей и характером отливки определяется и место подвода металла к отливке.

На фиг. 63 показана схема формовки детали крестовины для варваринской гидротурбины. Для питания отливки установлена прямая закрытая прибыль и металл подводится к отливке через прибыль.

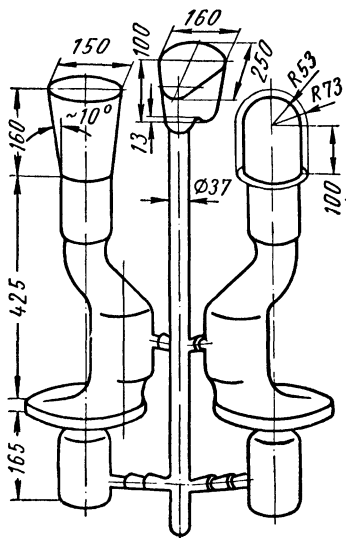
При отливке мелких деталей в одной опоке располагается по несколько отливок. В таких случаях одна прибыль может питать

несколько отливок. На фиг. 64 показана схема формовки детали топливного сектора. Для питания двух отливок установлена одна боковая прибыль. Подвод металла к отливкам осуществляется через прибыль. На фиг. 65 показана схема формовки детали стопорного рычага. В данном случае питание двух отливок производится двумя прибылями, но каждая прибыль питает две отливки.

Во всех рассмотренных случаях при установке закрытых прибылей подвод металла к отливке производился через прибыль. Такая система подвода



Фиг. 61. Схема формовки лопатки направляющего аппарата.



Фиг. 62. Отливка коленчатого вала.

металла обеспечивает подачу более горячего металла в прибыль, вследствие чего осуществляется наиболее эффективное питание отливок.

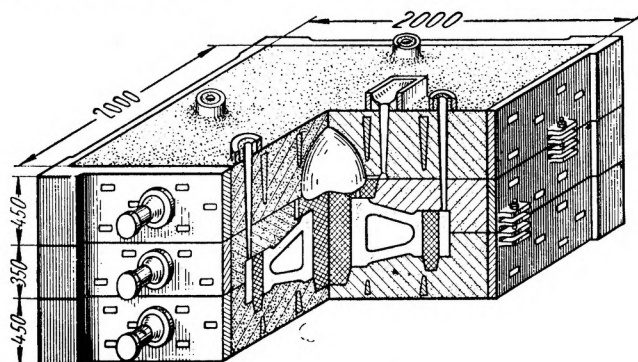
В некоторых случаях для питания одной отливки устанавливается по несколько прибылей, часть из которых может выполняться прямыми открытыми, а другая часть — боковыми закрытыми.

На фиг. 66 показана схема формовки детали основания разрывной машины. Подвод металла к отливке осуществляется двумя стояками, двумя шлакоуловителями и четырьмя подводящими каналами, направляющими металл вдоль двух продольных стенок отливки.

Питание отливки производится двумя прибылями, одна из которых прямая открытая, а вторая — боковая закрытая.

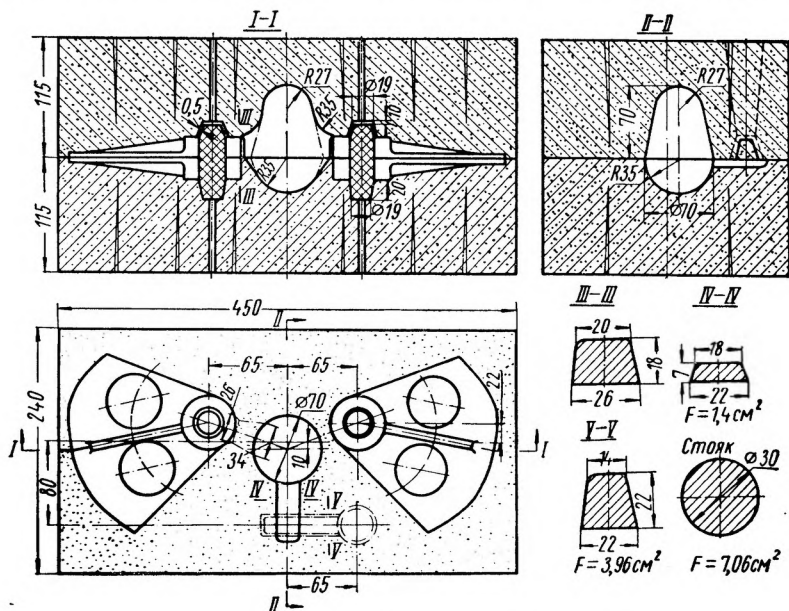
в) **Наклонная заливка форм.** Практика производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом показала, что

При наличии в отливке горизонтальных поверхностей большой протяженности на этих поверхностях, как правило, образуется большое скопление неметаллических включений в виде окисных плен и черных



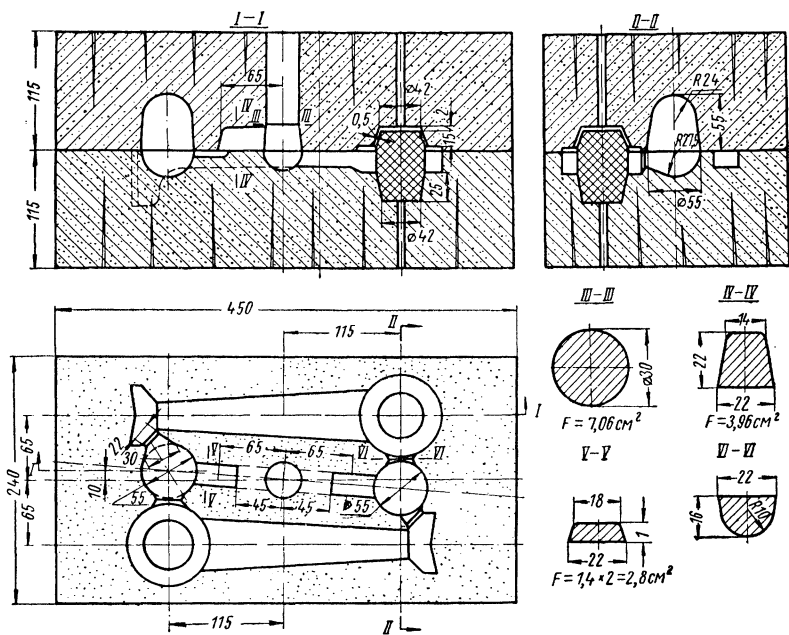
Фиг. 63. Схема формовки крестовины гидротурбины.

пятен. Появление таких дефектов в литье объясняется тем, что чугун, содержащий магний, подвергается сильному окислению, при этом,

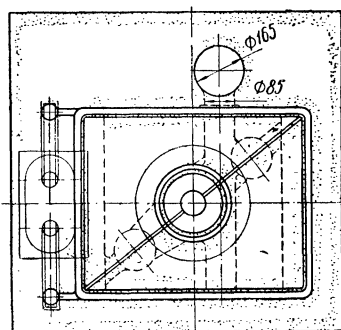
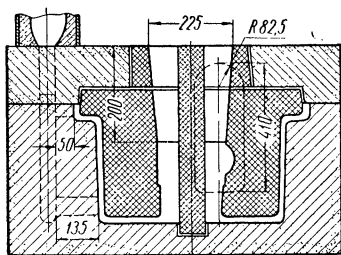


Фиг. 64. Схема формовки топливного сектора.

чем больше магния содержится в чугуне, тем больше окисление. При большой поверхности жидкого чугуна процесс окисления происходит наиболее интенсивно, вследствие чего образуется большое



Фиг. 65. Схема формовки стопорного рычага.

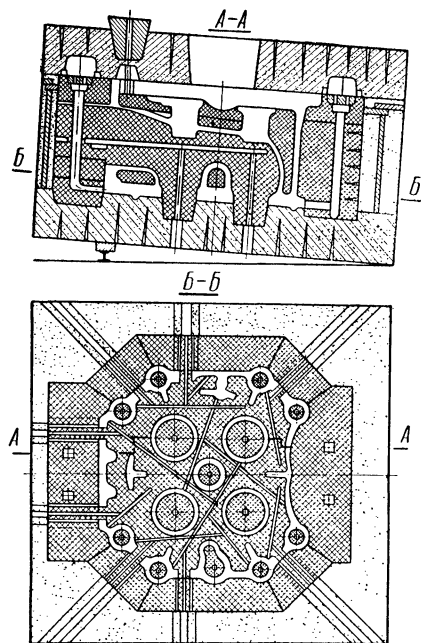


Фиг. 66. Схема формовки основания разрывной машины.

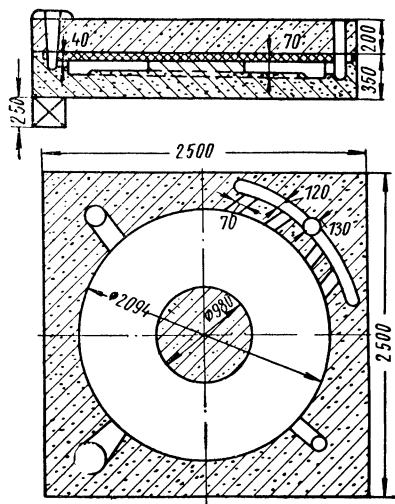
количество окисных плен, которые попадают в отливку, что служит причиной забракования отливки.

Для получения отливок без указанных выше дефектов установка собранных форм под заливку производится под некоторым наклоном. Угол наклона обычно составляет 5—15° к горизонту.

При таком способе заливки форм зеркало металла имеет значительно меньшую поверхность, подвергающуюся окислению, по сравнению с горизонтальным расположением форм, вследствие чего в отливке образуется меньше окисных плен. Неметаллические вклю-



Фиг. 67. Схема формовки крышки.



Фиг. 68. Схема формовки ведущего диска ковочной машины.

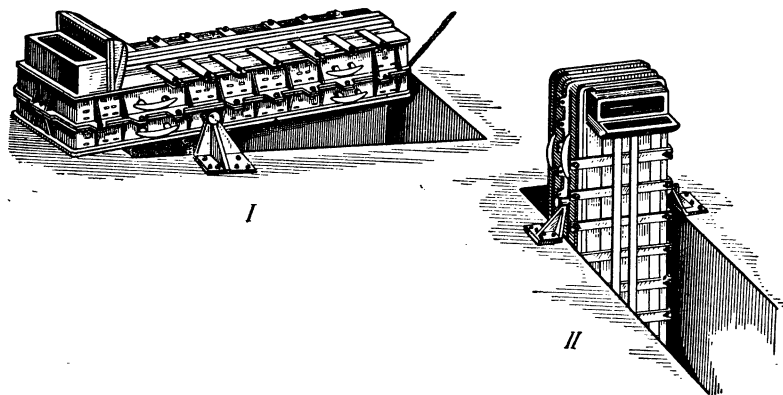
чения, при наклонном расположении форм, имеют возможность концентрироваться в наиболее высоко расположенных частях отливки, а основная часть поверхности отливки оказывается свободной от неметаллических включений.

Подвод металла к отливке при наклонном расположении форм должен производиться с нижней стороны формы с целью более спокойного ее заполнения.

В качестве примеров наклонной заливки форм можно привести заливку детали крышки цилиндров тепловозного двигателя. Эта деталь является наиболее сложной деталью; пересечение газовых и водяных полостей создали сложную многотельную конструкцию. Литейная форма для отливки такой крышки состоит из 37 стержней. Формовка крышек производится в трех опоках (фиг. 67), собранная форма устанавливается под заливку с наклоном около 10°.

На фиг. 68 показана схема формовки ведущего диска ковочной машины диаметром 2070 мм и весом 1700 кг. При горизонтальной заливке таких дисков получался значительный брак по неметаллическим включениям, располагавшимся в верхней части отливки. Увеличенная величина припуска на механическую обработку в верхней части диска не давала положительных результатов.

Во избежание образования окисных плен на поверхности дисков была изменена технология их отливки. По новой технологии формы



Фиг. 69. Установка формы коленчатого вала под заливку:

*I* — положение при заливке; *II* — положение при кристаллизации.

под заливку устанавливались под наклоном около  $10^\circ$ . Диски, отлитые в формы, установленные наклонно, не имели пороков, связанных с неметаллическими включениями, и имели высокие механические свойства.

$$\sigma_b = 55 \div 57 \text{ кг/мм}^2; \delta = 4,2 \div 5\%; \alpha_k = 3,3 \div 3,4 \text{ кг/см}^2.$$

г) **Горизонтальная формовка, наклонная заливка с последующим поворотом формы в вертикальное положение.** При отливке деталей особо ответственного назначения, к числу которых относятся коленчатые валы тепловозных двигателей, на обработанных поверхностях, а также внутри отливок такие дефекты как усадочные раковины, усадочная пористость, неметаллические включения по техническим условиям не допускаются. В этих случаях технология заливки форм приобретает особо важное значение.

Производственный опыт показал, что наилучшей технологией отливки таких деталей является горизонтальная формовка, наклонная заливка с последующим поворотом формы в вертикальное положение.

Подвод металла к отливке производится в прибыль, установленную в верхней части отливки. Поворот формы из наклонного положения в вертикальное производится в особом приспособлении — кантователе.

На фиг. 69 показана собранная форма коленчатого вала теплового двигателя перед ее заливкой (фиг. 69, I) и залитая форма, повернутая в вертикальное положение (фиг. 69, II).

Процесс затвердевания отливки и питание ее из прибыли происходят тогда, когда прибыль находится вверху.

Такая технология заливки форм обеспечивает устранение в отливках усадочных раковин, усадочной пористости, а также минимальное количество черных пятен, так как большая часть неметаллических включений всплывает в прибыль [28], [29].

---

## ОСОБЕННОСТИ ЛИТЬЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Литье деталей из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в настоящее время производится в песчаные и оболочковые формы, в кокили и центробежным способом.

### 1. ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ

Основными вопросами, которые приходится решать при литье деталей в песчаные формы являются: выбор и приготовление исходных формовочных материалов, приготовление формовочных и стержневых смесей, изготовление форм и стержней, заливка форм, остывание отливок в формах и удаление прибылей литников от отливок.

При литье деталей из высокопрочного чугуна применяются те же исходные формовочные материалы, а также формовочные и стержневые смеси, что и при литье из серого чугуна. Процесс изготовления форм и стержней, предназначенных для чугуна с шаровидным графитом, также не отличается от процесса изготовления форм и стержней для отливок из чугуна с пластинчатым графитом. Поэтому эти вопросы здесь не рассматриваются.

Исключительно большое значение при производстве отливок из чугуна с шаровидным графитом имеют вопросы разливки металла в формы после обработки чугуна магнием. Дело в том, что при выдержке чугуна после обработки его магнием в жидком состоянии происходит непрерывное испарение магния и чем длительнее выдержка, тем больше теряется магния непроизводительно. При очень длительной выдержке чугуна в ковше остаточное содержание магния может уменьшиться настолько, что вместо шаровидного графита образуется графит пластинчатой формы, и чугун в этом случае будет иметь низкие механические свойства. Длительная выдержка чугуна после обработки его магнием приводит к понижению температуры чугуна, что связано с понижением жидкотекучести чугуна и с образованием значительного количества усадочных раковин, спаев и других литейных дефектов.

Исходя из этого, необходимо по возможности сокращать время выдержки чугуна в ковше после ввода магния. Точно так же должно

быть минимальным время заливки литейной формы, во избежание повышенного окисления металла, что связано с возможностью попадания окисных плен в отливку.

Процесс разливки чугуна зависит от способа обработки чугуна магнием. При обработке чугуна магнием в открытых ковшах разливка чугуна производится из тех же ковшей, в которых производилась обработка его магнием. При обработке чугуна магнием в копыльниках вагранок разливка чугуна производится либо мелкими ковшами, наполняемыми из вагранки, либо из ковшей большой емкости, равной емкости копыльника. Разливка чугуна после обработки его магнием в герметизированных ковшах или автоклавах может производиться непосредственно из тех же ковшей, в которых производилась обработка чугуна магнием. При необходимости доливки чугуна с целью его разбавления чугун переливается в ковш большей емкости, в него добавляется чугун из вагранки и после этого производится заливка форм.

Практика работы с герметизированными ковшами показала, что при вводе 0,7% магния в чугун последний можно вдвое разбавить и при этом остаточное содержание магния в отливках составляет 0,04—0,05%.

При отливке крупных деталей с большими прибылями после заливки форм рекомендуется производить доливку прибылей горячим металлом. При невозможности доливки металла в прибыли открытые поверхности последних присыпаются сухим песком или экзотермической смесью.

Охлаждение отливок в формах, залитых чугуном, обработанным магнием, должно производиться медленно. Температура по всему сечению отливки выравняется и не будет возникать остаточных литейных напряжений. Преждевременная выбивка отливок может привести к короблению их, а при неблагоприятных условиях даже к полному разрушению.

При выбивке отливок из форм следует учитывать, что в отливках из чугуна и шаровидным графитом возникают повышенные напряжения, и при неосторожной выбивке тонкостенных отливок могут образоваться в отливках трещины. Вследствие того, что чугун с шаровидным графитом имеет большую прочность и значительное удлинение в литом состоянии, не рекомендуется отбивать прибыли и литниковую систему молотком, так как даже при достаточно тонких сечениях литников они отламываются вместе с частью отливки. Поэтому, прежде чем удалять прибыли и литниковую систему, необходимо сделать надрез на них зубилом или фасонным отрезным кругом. В крупных отливках прибыли лучше всего отрезать автогеном, как это делается на стальных отливках.

В большинстве случаев прибыли удаляются до термической обработки отливок огневой резкой, которую производят в несколько приемов с перерывами, чтобы не допускать перегрева металла и возникновения напряжений. Исключение составляют некоторые детали сложной конфигурации, склонные к образованию трещин при

огневой резке. Такие детали подвергаются термической обработке вместе с прибылями.

Благодаря предварительной обрезке литников и прибылей детали можно укладывать в печь плотно, без больших зазоров, а следовательно, можно в значительной степени предотвратить коробление отливок в процессе термической обработки.

При обрезке прибылей оставляют припуски на механическую обработку до 12 мм, которые удаляют после термической обработки механическим путем.

Обрезку прибылей у крупных отливок, не подвергающихся термической обработке, а также заварку литейных дефектов производят после предварительного отпуска по следующему режиму: загрузка деталей в печь, предварительно нагретую до 350°; нагрев до 550° со скоростью 50° в час; выдержка при этой температуре в течение 8—10 час., охлаждение до 350° со скоростью 50° в час с дальнейшим охлаждением на воздухе.

Вследствие того что в отливках из чугуна с шаровидным графитом возникают повышенные напряжения, все отливки, за исключением отливок с равномерными толщинами стенок и простой конфигурацией, подвергаются термической обработке для снятия напряжений.

Рассмотрим некоторые примеры отливки деталей из чугуна с шаровидным графитом в песчаные формы.

В песчаные формы из высокопрочного чугуна отливаются крупные коленчатые валы для дизелей, локомотивов, тепловозов и т. п. Вес одного коленчатого вала достигает 2 т.

Технология отливки коленчатых валов в песчаные формы еще не окончательно отработана и на разных заводах она различна. Первые крупные коленчатые валы из высокопрочного чугуна отливались на заводе «Русский дизель» в песчаные формы, при этом сборка форм производилась в вертикальном положении, а затем собранные формы поворачивались на 90° и заливались в горизонтальном положении. Впоследствии завод перешел на горизонтальную формовку и горизонтальную заливку коленчатых валов.

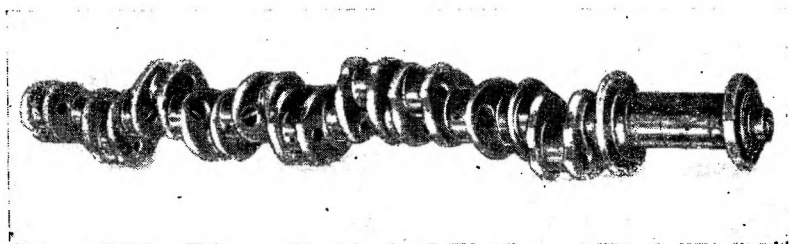
Такого же типа опытные коленчатые валы на заводе «Двигатель революции» отливались в формы, собранные из стержней, при этом заливка форм производилась в горизонтальном положении. В настоящее время завод перешел на горизонтальную формовку в парных опоках с заливкой форм в горизонтальном положении. Однако такую технологию отливки коленчатых валов нельзя признать удачной.

При горизонтальной заливке крупных коленчатых валов не удастся полностью избавиться от неметаллических включений в отливках, а вопросы питания отливок сильно затруднены — приходится устанавливать большое количество боковых закрытых прибылей.

Более рациональной следует признать технологию отливки коленчатых валов, принятую на заводах, выпускающих тепловозные двигатели с коленчатыми валами из высокопрочного чугуна. Такая технология оправдала себя в течение длительного времени и ее можно рекомендовать для аналогичных коленчатых валов [28], [29].

Коленчатые валы двигателей 2Д-100 мощностью 2000 л. с. магистрального тепловоза ТЭ-3 представляют собой отливку весом 1465 кг, длиной 4280 мм (фиг. 70). Ранее такие детали отливались из чугуна, легированного молибденом и никелем. В настоящее время Коломенский тепловозостроительный завод отливает коленчатые валы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Химический состав чугуна для отливки коленчатых валов принят следующий: 3,4—3,8% С; 1,8—2,0% Si; 0,7—0,9% Mn;  $\leq 0,1\%$  P;  $\leq 0,03\%$  S; 0,1% Cr; 0,04—0,074 Mg. По техническим условиям чугун для отливки коленчатых валов должен иметь следующие механические свойства:  $\sigma_b = 45 \text{ кг/мм}^2$ ;  $\delta = 1,0\%$ ; HB 217—302.

Для получения перлитной структуры, имеющей наивысшую износостойкость, отлитые коленчатые валы проходят нормализа-



Фиг. 70. Коленчатый вал двигателя 2Д-100.

цию по следующему режиму: нагрев отливок до  $860\text{--}880^\circ$  со скоростью  $50\text{--}80^\circ$  в час, выдержка при этой температуре 1 час, охлаждение на воздухе (с обдувкой сжатым воздухом) до  $300^\circ$ , после чего коленчатые валы поступают в печь для снятия литейных напряжений. Режим отпуска принят следующий: нагрев отливок до  $500\text{--}550^\circ$  со скоростью  $50\text{--}80^\circ$  в час, выдержка при этой температуре 4 часа, охлаждение до  $300^\circ$  с печью, а затем на воздухе. В результате такой термической обработки металлическая основа чугуна получается перлитной (допускается до 30% феррита и до 5% цементита в виде отдельных равномерно распределенных зерен). Графит должен иметь шаровидную форму (допускается до 10% пластинчатого графита гнездообразной формы).

Следует отметить, что при получении указанной структуры и механических свойств требования по химическому составу становятся факультативными.

Плавка чугуна для отливки коленчатых валов производится в трехтонной дуговой электрической печи. Шихта состоит из 50% чушкового чугуна и 50% возврата собственного производства.

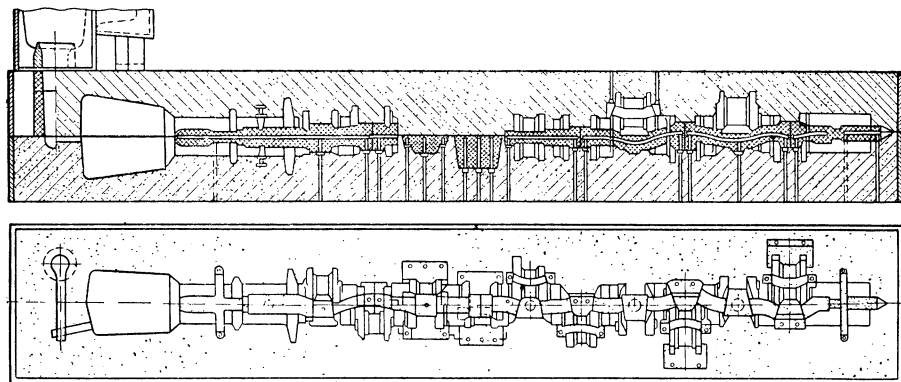
Для получения шаровидного графита чугун обрабатывается чистым магнезием при температуре  $1450\text{--}1460^\circ$  в открытом ковше, помещенном в камеру. Количество введенного магнезия составляет 0,35—0,45% от веса обрабатываемого чугуна. После ввода магнезия и очистки

чугуна от шлака производится доливка серого чугуна при температуре 1540—1560°. Одновременно с этим вводится 75%-ный ферросилиций 0,3—0,6%.

Для изготовления форм применяют формовочные смеси следующих составов:

облицовочная смесь: 94% люберецкого песка, 6% огнеупорной глины, 6% крепителя СП;

наполнительная смесь: 99% горелой земли, 0,5% луховицкого песка, 0,5% красной глины;



Фиг. 71. Схема формовки коленчатого вала.

стержневая смесь: 43% люберецкого песка, 38% маршалита, 14% серебристого графита, 5% сульфитно-спиртовой барды, 1% декстрина.

Физико-механические свойства смесей приведены в табл. 30.

Таблица 30

Наименование смеси	Сырая прочность в кг/см <sup>2</sup>	Сухая прочность в кг/см <sup>2</sup>	Газопроницаемость	Влажность в %
Облицовочная . . . . .	0,1—0,2		80	2,5—3,0
Наполнительная . . . . .	0,2—0,4		80	5,0—7,0
Стержневая . . . . .		4,0—7,0		

Формовка коленчатых валов производится в парных опоках в горизонтальном положении (фиг. 71). Уплотняются формы пескометом. Предварительно модель покрывается облицовочной смесью толщиной 40—50 мм. Плотность набивки форм составляет 60—70 ед. по твердомеру. Изготовленные формы подвергаются окраске перед

сушкой и после сушки при температуре формы 50—70°. Сушка форм производится при температуре 200° в течение 5 час. и при температуре 350° в течение 8 час. Влажность сухой формы не должна превышать 0,15%.

Изготовление стержней, образующих отверстия в коренных и шатунных шейках, производится по половинкам, которые затем склеиваются в сыром состоянии раствором из огнеупорной глины. Вентиляционные каналы устраиваются по разьему стержней. Сушка стержней производится в драйерах. Окраска стержней производится после первой и после второй сушки. Первая сушка стержней производится при температуре 200° в течение 3 час. Вторая сушка производится при температуре 280° в течение 4 час.

Ввиду большой склонности чугуна с шаровидным графитом к образованию усадочных раковин литейная форма после заливки поворачивается в особом приспособлении — кантователе в вертикальное положение. Это улучшает условия питания отливок. С этой же целью заливка форм производится при высокой температуре 1390—1420°.

Такие мероприятия обеспечивают получение отливок без усадочных раковин и с незначительным количеством неметаллических включений.

Одной из сложных деталей двигателя является днище цилиндровой крышки. В процессе работы двигателя она испытывает весьма большие механические и тепловые нагрузки.

Стендовые испытания показали, что днища, изготовленные из серого чугуна, легированного никелем и молибденом, выходили из строя из-за образования трещин вследствие низкой прочности и пластичности такого чугуна. У днищ, изготовленных из легированной стали 30ХМА, быстро расклепывались седла клапанов. Кроме того, механическая обработка стальных днищ была очень трудоемкой. И только днища, изготовленные из чугуна с шаровидным графитом, показали положительные результаты в работе.

Химический состав чугуна для отливки днищ принят следующий: 3,2—3,6% С; 2,7—3,1% Si; 0,7—1,1% Mn; <0,03% S; <0,1% P; 1,5—1,8% Ni; 0,3—0,5% Mo; 0,03—0,06% Mg. Структура металлической основы чугуна должна быть перлитная (допускается до 50% феррита).

Механические свойства чугуна следующие:  $\sigma_b = 50 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\delta = 1,5\%$ ,  $HV \text{ 240—280}$ .

Для получения указанной структуры металлической основы и механических свойств отливки подвергаются термической обработке по следующему режиму: нагрев до 900—920°, выдержка при этой температуре в течение 5 час., охлаждение с печью до 700—750° с дальнейшим охлаждением на воздухе. Для снятия напряжений отливки нагревают до 560—580° с выдержкой при этой температуре в течение 4 час. и с медленным последующим охлаждением.

Детали отливаются в сухие песчаные формы. Состав и свойства формовочных и стержневых смесей приведены в табл. 31.

Ввиду того что в форму устанавливается большое количество стержней, особое внимание уделяется вентиляции стержней и формы. Влажность стержней после сушки составляет 0,1%.

На фиг. 72 показана литейная форма для заливки деталей днищ. Собранный форма подается под заливку в нагретом виде [46].

На фиг. 73 показана схема формовки сложной детали — опоры балки цилиндров весом 8 т. Формовка производится в парных опоках, при этом все стержни устанавливаются в нижней опоке, а в верхней опоке размещены литниковая система и прибыли.

Подвод металла к отливке производится двумя наклонными стояками сечением 50 см<sup>2</sup> каждый. Шлакоуловитель выполнен в виде сифонной трубки того же сечения, что и стояк; подводящие каналы выполнены в виде сифонных трубок диаметром 38 мм.

Для питания отливки в массивных узлах установлены четыре открытые прибыли. Для вывода газов из полости формы установлены два выпора. Ввиду того что деталь имеет сравнительно равномерную толщину стенок, прибыли установлены небольших размеров.

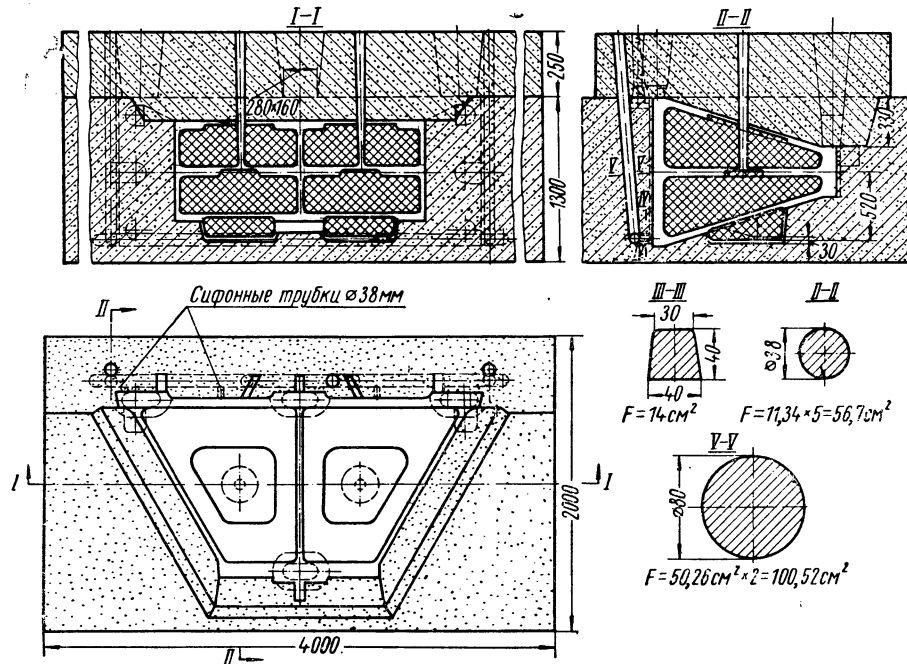
На фиг. 74 показана схема формовки детали крышки углеразмельной мельницы. Деталь имеет сравнительно тонкую стенку по ободу

Фиг. 72. Схема формовки детали днища.

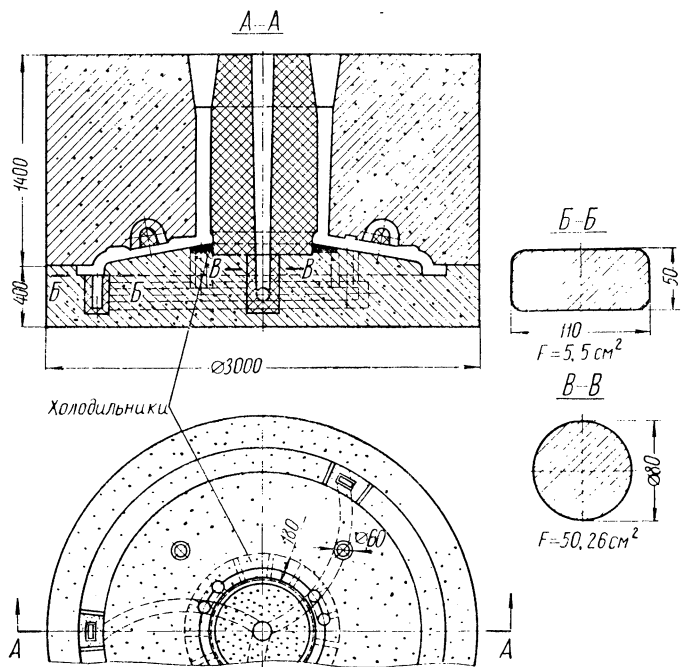
и толстую ступицу, вследствие чего остывание отливки происходит неравномерно, что влечет за собой образование литейных напряжений и появление трещин в местах сочленения обода со ступицей.

Таблица 31

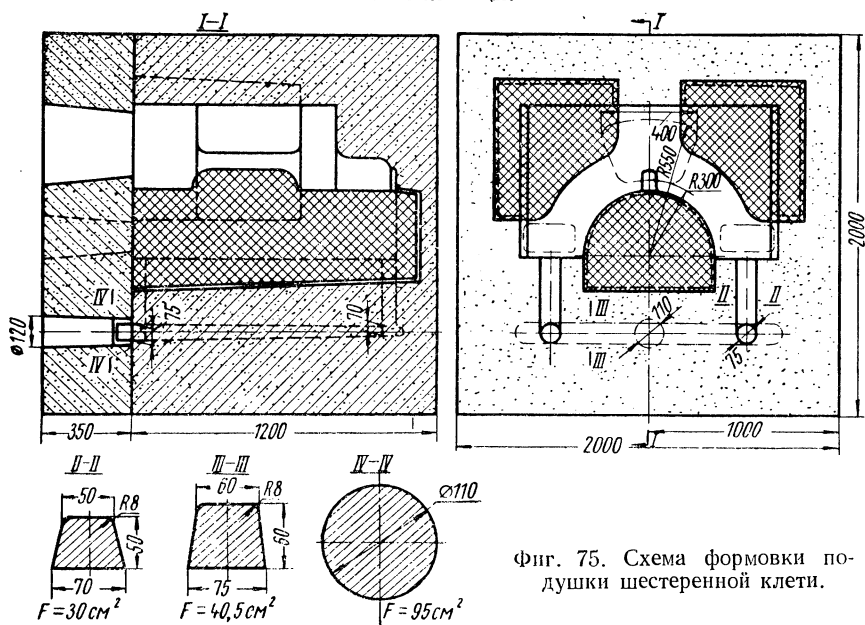
Смесь	Состав смеси в %								Физико-механические свойства		
	Песок К70/40	Песок К30/50	Горелая смесь	Песок ОЖ	Торф	Олифа	Декстрин	Сульфидная барда	Прочность в кг/см <sup>2</sup>	Газопроницаемость	Влажность в %
Стержневая	60	40	—	—	—	1,5	2	3	10—13	190	2,7—3,1
Облицовочная	30	—	50	10	10	—	—	—	1,3—1,8	100	—
Наполнительная	5	—	90	5	—	—	—	—	—	100	—



Фиг. 73. Схема формовки опоры балки цилиндров.



Ф. г. 74. Схема формовки загрузочной крышки углеразмольной мельницы.



Фиг. 75. Схема формовки подушки шестеренной клетки.

Приведенная на фигуре схема оказалась наиболее удачной. Подвод металла и отливка производятся снизу тремя подводящими каналами. Это позволяет значительно разогреть нижнюю, наиболее тонкую часть детали и тем самым выровнять условия охлаждения отливки. С этой же целью в месте перехода обода в ступицу установлены наружные холодильники. Для питания отливки установлена одна верхняя открытая прибыль.

На фиг. 75 показана схема формовки детали верхней подушки шестеренной клетки прокатного стана весом 1800 кг. Как видно из фигуры, деталь заливается в вертикальном положении; подвод металла к отливке осуществляется через стояк и шлакоуловитель, расположенные в нижней опоке. Затем металл поступает в два стояка, расположенные в нижней опоке, и далее через четыре подводящих канала, расположенных в два яруса, поступает в полость формы. Для питания отливки вверху установлена одна массивная прибыль.

В рассмотренных случаях для питания отливок устанавливались прямые открытые прибыли. При отливке более мелких деталей в большинстве случаев применяются закрытые прибыли (прямые и боковые).

На фиг. 76 показана схема формовки детали шатуна продувочного насоса. В данном случае питание отливки производится двумя закрытыми прибылями, одна из которых прямая, а вторая боковая. Подвод металла к отливке производится через боковую прибыль.

При установке прибылей без искусственного давления отливки в большинстве случаев не имели пороков усадочного происхождения. Однако выход годного при установке таких прибылей оказывается невысоким. Для повышения выхода годного на некоторых заводах при отливке деталей из чугуна с шаровидным графитом успешно применяют прибыли со сверхатмосферным давлением.

На фиг. 77 показана схема формовки детали траверсы весом 570 кг. Для питания в верхней части отливки установлена закрытая прибыль с газовым давлением. Подвод металла к отливке осуществляется через стояк, шлакоуловитель, расположенный в нижней части стержня ниже плоскости разъема формы, и двух подводящих каналов.

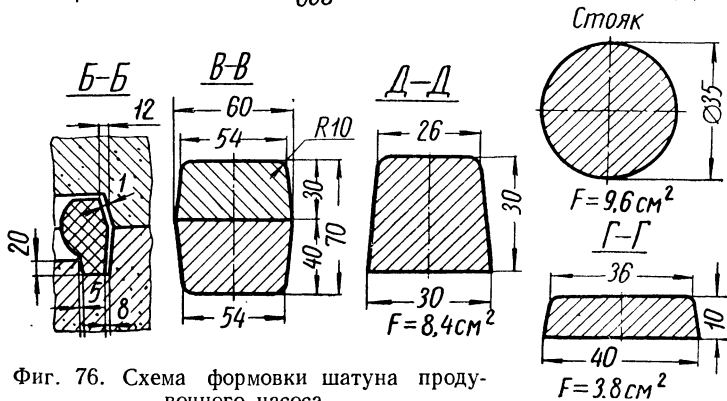
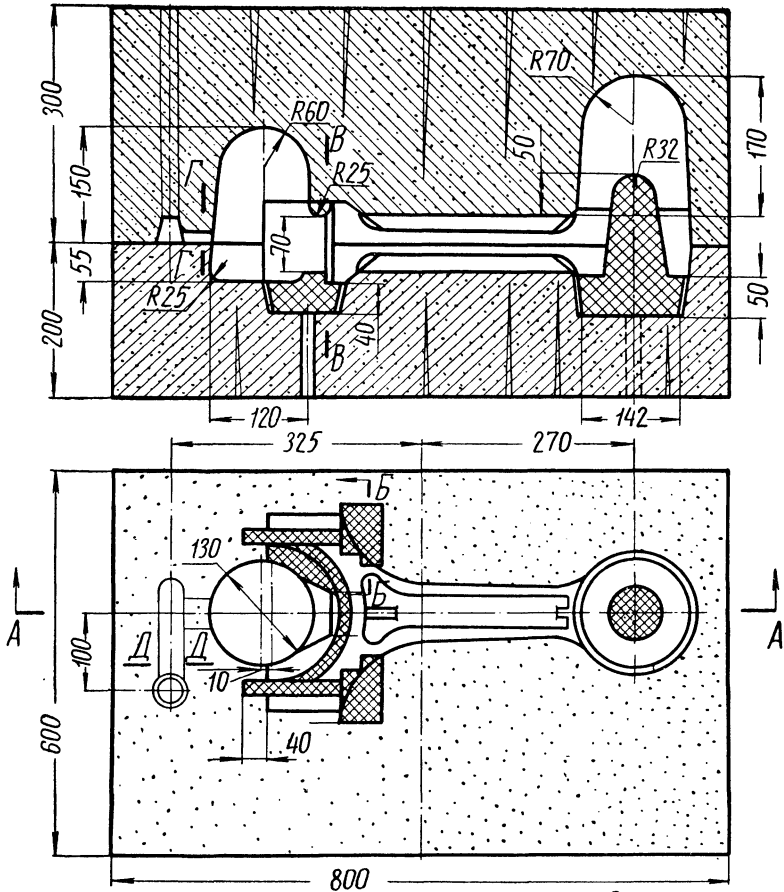
На фиг. 78 показана схема формовки другой траверсы. Деталь имеет два массивных узла. На каждом из них установлена прибыль закрытого типа с газовым давлением. Подвод металла к отливке осуществлен в наиболее удаленные части от прибылей.

На фиг. 79 показана схема формовки детали корпуса. В одной опоке размещено четыре детали, для питания которых установлено на каждую отливку по две прибыли с газовым давлением.

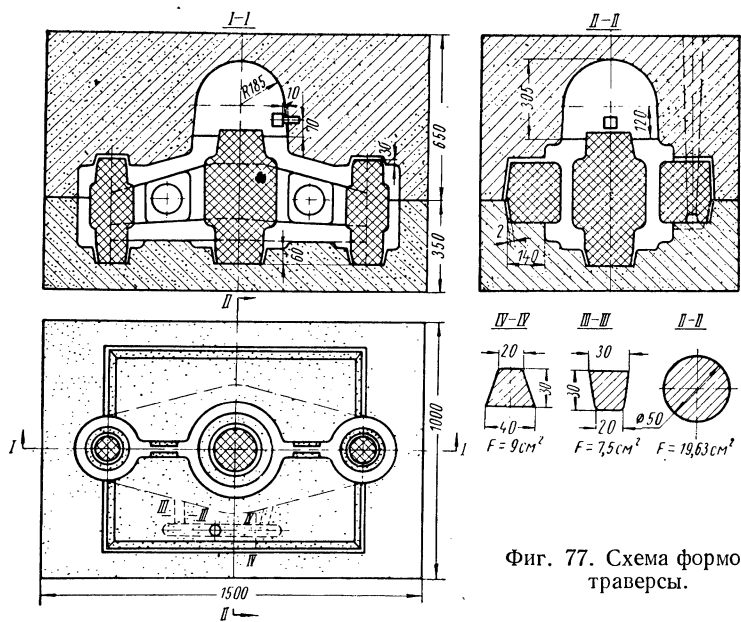
На фиг. 80 показана схема формовки детали траверсы, для питания которой установлена прибыль с экзотермической смесью. Пунктиром показана прибыль, которая устанавливалась до применения экзотермических смесей.

Большой интерес представляет опыт Херсонского завода, производившего отливку мелких деталей из чугуна с шаровидным

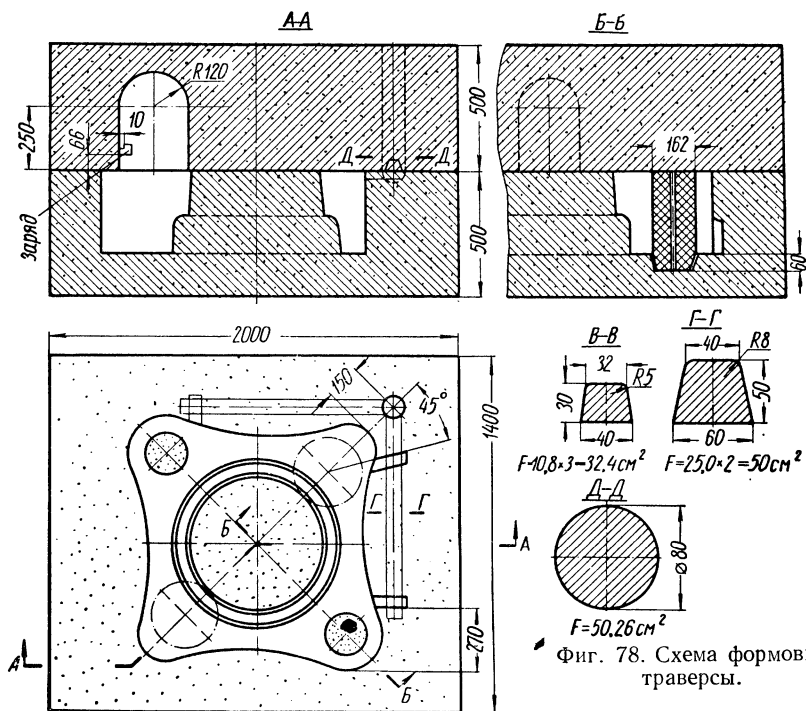
A-A



Фиг. 76. Схема формовки шатуна продувочного насоса.



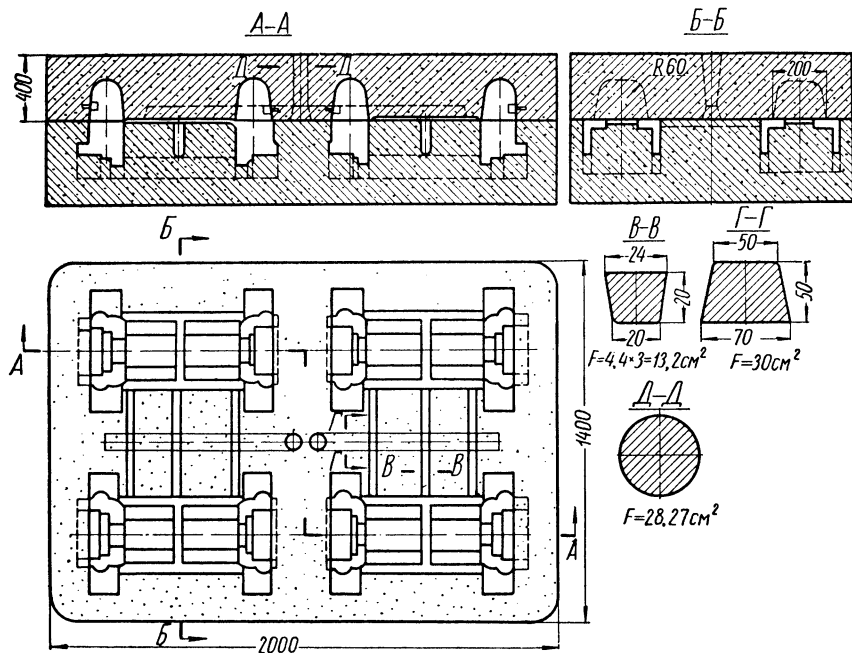
Фиг. 77. Схема формовки траверсы.



Фиг. 78. Схема формовки траверсы.

графитом в сырые песчаные формы. Ранее эти детали отливались из ковкого чугуна. Вес деталей колеблется от 0,2 до 5,0 кг.

Химический состав исходного чугуна для отливки мелких деталей был следующий: 3,0—3,5% С; 2,6—2,9% Si; 0,4—0,7% Mn; до 0,12% S; до 0,15% P, до 0,1% Cr и до 0,2% Cu. После обработки чугуна чистым магнием содержание серы в чугуне снижалось до 0,02%; остаточное содержание магния составляло не менее 0,04%.



Фиг. 79. Схема формовки корпуса.

Ввиду того что отливки имели тонкие стенки и получались, как правило, с отбелом, все литье подвергалось высокотемпературному отжигу для получения ферритной структуры и механических свойств, соответствующих марке чугуна ВЧ 40-10.

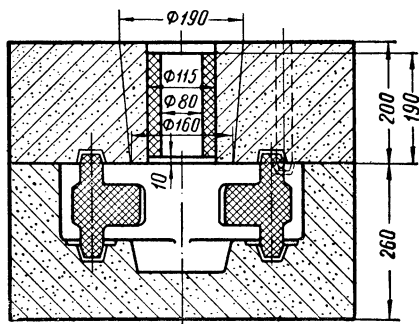
В состав шихты для выплавки чугуна входят следующие составляющие: 60% чушкового чугуна, 30% лома чугуна, обработанного магнием, 10% лома серого чугуна. В некоторых случаях применяли стальной лом и доменный ферросилиций.

Плавка чугуна производилась в вагранке с шамотной футеровкой. Температура чугуна на желобе вагранки находилась в пределах 1345—1365°. Обработка чугуна производилась чистым магнием в количестве 0,6% от веса обрабатываемого чугуна в открытом ковше емкостью 200 кг; разливка чугуна по формам производилась из ковша емкостью 16 кг. Перед разливкой ковши подогревались до 600—650°.

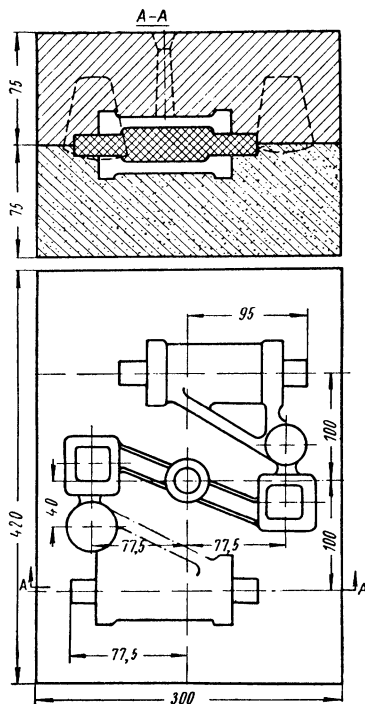
Все отлитые детали подвергались термической обработке — отжигу в электрических печах — по следующему режиму: нагрев деталей до температуры 950—970° со скоростью 150° в час; выдержка при этой температуре в течение двух часов, охлаждение до 670°, подъем температуры до 680—700°, выдержка при этой температуре 2 часа и охлаждение на воздухе.

На фиг. 81 показана схема формовки опоры винта кукурузного комбайна. Деталь отливается из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧ 40-10. Раньше эта деталь отливалась из ковкого чугуна марки КЧ 33-8. Вес детали 2,2 кг.

При отливке этой детали литниковая система и прибыли запроектированы по аналогии с ковким чугуном. Подвод металла к отливке осуществляется через общий стояк и общий шлакоуловитель. Металл подается в прибыли и через них



Фиг. 80. Схема формовки траверсы.



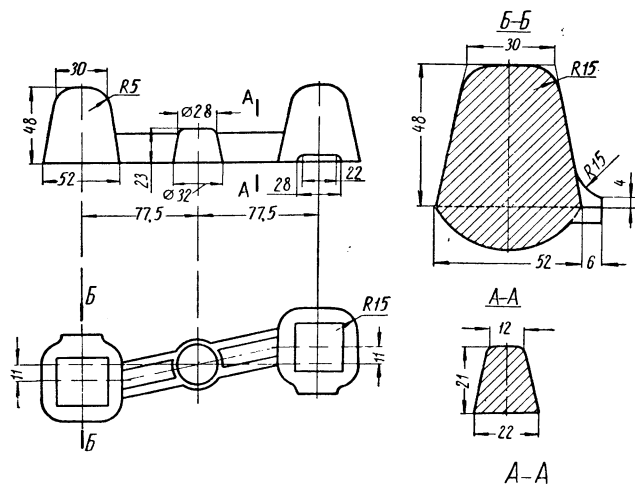
Фиг. 81. Схема формовки опоры винта.

в отливки. На фиг. 82 показана литниковая система для отливки этой детали. Общий вес литниковой системы с прибылями на две отливки составляет 1,86 кг.

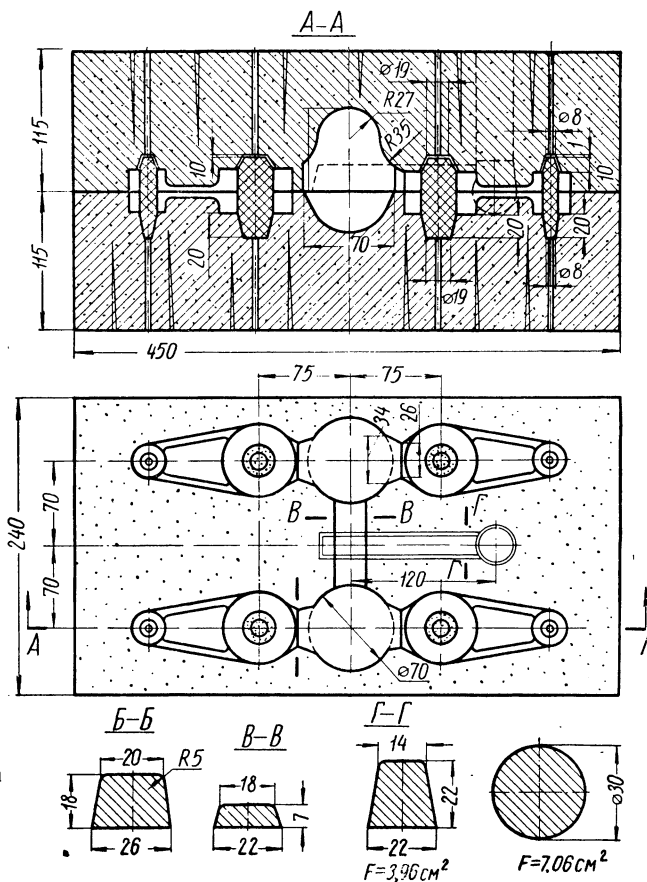
Температура чугуна при заливке форм выдерживалась не ниже 1300°; продолжительность заливки формы составляла 7—12 сек. Длительность остывания отливки в форме составляла 15 мин.

На фиг. 83 показана схема формовки деталей рычагов. Питание отливок производится также через боковые прибыли, подвод металла к отливке через стояк, шлакоуловитель и подводящий канал, подающий металл в прибыль.

Подвод металла непосредственно к отливке производится через прибыль.



Фиг. 82. Литниковая система для отливки опоры винта.

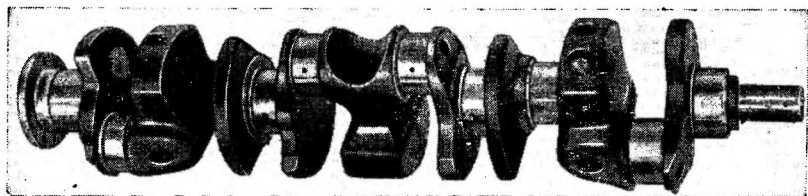


Фиг. 83. Схема формовки рычага.

## 2. ЛИТЬЕ В ОБОЛОЧКОВЫЕ ФОРМЫ

Одним из наиболее прогрессивных методов производства отливок является литье в оболочковые формы. Существенным преимуществом этого метода является возможность получения отливок с высокой точностью и возможность механизации и автоматизации процесса производства отливок.

Сущность этого метода заключается в том, что литейная форма изготавливается из специальной формовочной смеси, состоящей из кварцевого песка и пульвербакелита или его заменителей. Формовочную смесь насыпают на подогретую до соответствующей температуры модельную плиту; она оплавляется и, затвердевая, образует прочную корку, в которую затем заливается металл.



Фиг. 84. Коленчатый вал автомобиля «ФОРД».

Оболочковая форма, изготовленная из такой песчано-смоляной смеси, после заливки формы легко разрушается, освобождая без особых затруднений отливку.

Чистота поверхности отливок, залитых в оболочковые формы, соответствует 4—6-му классам, а точность отливок равна 0,3—0,5 мм на 100 мм.

Высокая точность и хорошая чистота поверхности отливок позволяют значительно уменьшить припуски на механическую обработку, вследствие чего объем механической обработки отливок сокращается на 40—50%, вес отливок уменьшается на 30—50%, снижается трудоемкость очистных и обрубных работ примерно на 50%. Вследствие небольшой толщины получаемых оболочек (5—12 мм) оборот формовочных материалов сокращается в 8—10 раз.

Обладая высокой прочностью и большой газопроницаемостью, оболочковые формы обеспечивают получение отливок без газовых раковин и без засоров.

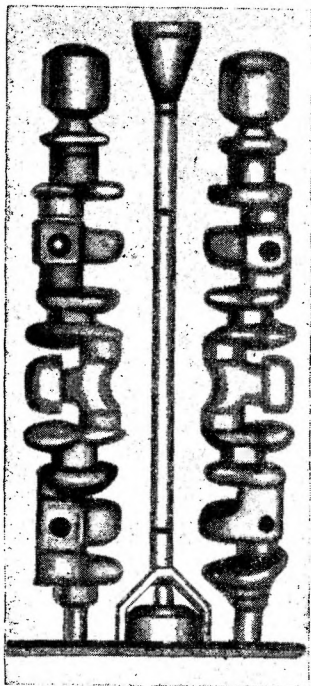
В настоящее время оболочковые формы изготавливают на автоматических установках, производительность которых достигает 80—90 полуформ в час при толщине оболочек 7—8 мм, и 60—65 полуформ в час при толщине оболочек 11—12 мм.

Наиболее характерными деталями, отливаемыми из чугуна с шаровидным графитом в оболочковые формы, являются коленчатые валы автомобильных и тракторных двигателей. Так например, на заводах Форда в США отливается по этому методу около 10 000 шт. коленчатых валов в день (фиг. 84).

Химический состав чугуна для отливки коленчатых валов принимается следующий: 3,5—4,0% С; 2,5% Si; 0,5% Mn; 0,01% S; 0,05% P; 0,1% Cr; 0,2% Cu; 0,1% Ni; 0,02% Mg.

Структура чугуна перлитная, получаемая в литом состоянии без термической обработки.

Механические свойства чугуна должны быть следующие:  $\sigma_b = 55 \div 65 \text{ кг/мм}^2$ ;  $\sigma = 3 \div 5\%$ , *НВ* 220—260.



Фиг. 85. Отливка коленчатого вала автомобиля «ФОРД».

Выплавка чугуна производится в ванне с основной футеровкой, обеспечивающей получение чугуна с содержанием серы, не превышающим 0,01%. Для достижения такого низкого содержания серы чугун, кроме того, подвергается обработке шлаками высокой основности в миксере.

Обработка чугуна производится магниевой лигатурой, укладываемой на дно ковша.

Изготовление оболочковых форм производится на специальных машинах, установленных на вращающейся карусели.

Цикл изготовления оболочковых форм, равный 2 мин., состоит из следующих операций.

1. Опрыскивание моделей жидкостью, предохраняющей модели от прилипания формовочной смеси.

2. Соединение бункера, наполненного формовочной смесью с модельной плитой.

3. Поворот бункера вместе с модельной плитой, в процессе которого происходит покрытие моделей pulverбакелитовой смесью.

4. Выдержка, при которой происходит отверждение смеси.

5. Возвращение бункера в исходное положение.

6. Снятие готовой оболочки.

7. Возвращение модельной плиты в исходное положение.

Изготовленные оболочки соединяются попарно специальными пружинящими зажимами и передаются на заливочный конвейер, где их устанавливают в специальные гнезда. Между стенками гнезда и оболочкой засыпают дробь из бункера, расположенного над конвейером. Заливка валов производится в вертикальном положении (фиг. 85).

После 30-минутного охлаждения отливки открывается дно гнезда, дробь высыпается вниз, а отливка навешивается на охлаждающий конвейер, подается на очистку, контроль и на термическую обработку [47].

В Советском Союзе из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в оболочковые формы отливаются коленчатые валы автомобиля «Волга» [26], [48]. Вал имеет вес 19,5 кг и длину 632 мм.

Плавка чугуна для заливки коленчатых валов производится в основной дуговой электропечи на твердой завалке, при этом обеспечивается получение чугуна с низким содержанием серы, что, в свою очередь, снижает расход магния.

После расплавления металла первый шлак тщательно счищается и для максимального снижения серы наводится новый шлак из восьми частей негашеной извести и двух частей плавикового шпата (5—6% от металлозавалки). Через 20—30 мин. на зеркало ванны забрасывается карбидная смесь, состоящая из трех частей извести, одной части древесного угля и одной части плавикового шпата, в количестве 0,7—1,0%.

В результате ведения такого процесса плавки содержание серы в чугуне не превышает 0,002%.

Химический состав чугуна для отливки коленчатых валов должен быть следующим: 3,2—3,4% С; 2,2—2,25% Si; 1,5—1,3% Mn; ≤ 0,12% P; ≤ 0,002% S; 0,15—0,25% Cr; 0,01—0,04% Mg.

Обработка чугуна чистым магнием производится в горизонтальном автоклаве, в который подается ковш с жидким чугуном емкостью 400 кг. В виду низкого содержания серы в исходном чугуне, количество вводимого магния составляет всего 0,07—0,08% от веса жидкого чугуна. Температура чугуна, выпускаемого из печи, равна 1545—1560°. Температура чугуна после обработки его магнием равна 1420—1450°.

После ввода магния в чугун счищается шлак и производится разливка чугуна в разливочные ковши, при этом на струю металла дается дробленый 75%-ный ферросилиций в количестве 0,3% и 0,25% криолита. Чугун выдерживается в ковше в течение 2—2,5 мин., счищается шлак и производится заливка форм при температуре 1280—1350°.

Отлитые валы подвергаются термической обработке по следующему режиму: нагрев до 950°, выдержка 9 час., охлаждение на воздухе. Затем производится отжиг валов для получения в структуре чугуна зернистого перлита по следующему режиму: нагрев до 740°, выдержка 6 час., охлаждение на воздухе. В результате такой термической обработки отливок получают следующие механические свойства чугуна:  $\sigma_b = 60 \div 70 \text{ кг/мм}^2$ ,  $HV 217—255$ .

В отличие от завода Форда коленчатые валы на Горьковском автозаводе заливаются в горизонтальном положении (фиг. 86).

Состав применяемых формовочных и стержневых смесей приведен в табл. 32.

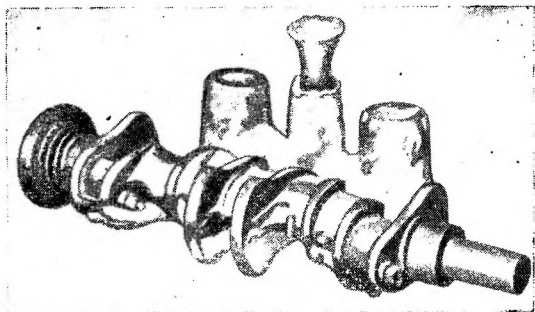
Физико-механические свойства смесей следующие: прочность на разрыв 18—32 кг/см<sup>2</sup>; прочность на сжатие 85—92 кг/см<sup>2</sup>, газопроницаемость 300—400.

Стеарат-цинк вводится в смесь для снижения прилипаемости смеси к моделям и стержневым ящикам.

Изготовление оболочковых форм производится на двухпозиционном автомате АКФ-2 производительностью до 150 съемов в смену. Модельную плиту подогревают один раз в смену до 250—260° при помощи электропечи сопротивления. Модели покрывают 4%-ным

раствором синтетического кремнеорганического каучука в уайт-спирите. После каждого съема оболочки модель покрывают 1%-ным раствором СКТ.

В оболочковые формы отливаются и тракторные коленчатые валы для двигателей СМД-7 и СМД-14 [27]. Чистый вес литых коленчатых валов составляет соответственно 36,5 и 46 кг, а вес отливок 50 и 64 кг.



Фиг. 86. Отливка коленчатого вала автомобиля «ВОЛГА».

Отливка тракторных коленчатых валов в оболочковые формы позволяют сократить количество операций и цикл механической обработки отливок.

При производстве тракторных коленчатых валов плавка чугуна производится в электропечи, что позволяет получать низкосернистый исходный чугун (ниже 0,04% S) и высокую температуру чугуна, что резко снижает количество черных пятен в отливках.

Таблица 32

Состав смеси	Назначение смеси	
	Для изготовления форм	Для изготовления стержней
Песок кварцевый 50/100 . . . . .	100	100
Вода . . . . .	0,3	0,3
Стеарат-цинк . . . . .	0,003	0,003
Спирт (ректификат) . . . . .	0,9	0,9
Пульвербакелит . . . . .	5,0	3,5

Металл выдается из электропечи при температуре не ниже 1550°, ввод магния в количестве 0,5% от веса металла производится при температуре чугуна 1480—1500°; заливка форм производится при температуре не ниже 1330°.

Обработка чугуна магнием производится в открытых ковшах, помещенных в камере. После обработки магнием в чугун вводится 0,5% ферросилиция.

Для изготовления оболочковых форм применяется формовочная смесь, содержащая 6% пульвербакелита, а для изготовления стержней — плакирующая смесь с 3% пульвербакелита. Изготовление оболочек производится на полуавтоматической установке УКФ-3.

Заливка оболочковых форм производится на конвейере; вал при заливке находится в горизонтальном положении. Для питания отливки установлены две боковые закрытые прибыли. Металл

из стояка поступает в шлакоуловитель, подводящие каналы, боковые прибыли и через них — в полость формы. Выбивка отливок производится при температуре 900—950° с целью уменьшения количества феррита в чугуне.

### 3. ЛИТЬЕ В КОКИЛИ

Литье деталей из высокопрочного чугуна в кокиль, в сравнении с литьем в песчаные формы, имеет следующие основные преимущества: возможность управления процессом кристаллизации чугуна в больших пределах; повышение точности литья и уменьшение объема механической обработки; возможность механизации и автоматизации процесса; улучшение санитарно-гигиенических условий труда; уменьшение расхода магния, так как высокая скорость охлаждения чугуна, залитого в кокиль, понижает температуру эвтектической кристаллизации, выполняя тем самым частично роль магния, вследствие чего образование шаровидного графита происходит при меньшем содержании остаточного магния.

Литье деталей из чугуна с шаровидным графитом в кокиль связано с некоторыми технологическими трудностями, к которым относятся следующие.

В связи с большой скоростью охлаждения металла в отливках, залитых в кокиль, требуется повышенная температура чугуна при заливке кокилей, в сравнении с заливкой в песчаные формы. Это обстоятельство усугубляется еще тем, что в кокилях отливаются сравнительно мелкие и тонкостенные детали, для заливки которых требуется повышенная температура чугуна.

В связи с большой скоростью охлаждения металла, залитого в кокиль, особый подход требуется при выборе типа литниковой системы. Если при отливке деталей из высокопрочного чугуна в песчаные формы рекомендуется быстрая заливка форм, особенно при отливке крупных деталей, то при отливке деталей в кокили, во многих случаях, необходима более медленная, спокойная заливка, при которой окисная пленка, образовавшаяся на поверхности металла поднимается вверх без разрушения и удаляется с прибылью, либо при механической обработке. При быстром заполнении кокиля чугуном окисные пленки могут измельчаться, запутываться в металле и, оставаясь в теле отливки, сильно снижать механические свойства чугуна.

Для уменьшения количества неметаллических включений (черных пятен) в отливках при кокильном литье необходимо предусматривать следующие мероприятия.

Стремиться к тому, чтобы остаточное содержание магния в отливке было минимальным. С целью снижения количества магния, вводимого в чугун, необходимо производить глубокое обессеривание исходного чугуна. Вводить в чугун вместе с магнием (0,2%) некоторое количество (0,15—0,20%) криолита.

Большая скорость охлаждения чугуна в кокиле препятствует эффективному удалению газов из полости формы и из металла,

вследствие чего в отливках образуется повышенное количество газовых раковин.

Вследствие большой скорости охлаждения чугуна, залитого в кокиль прибыли, устанавливаемые на отливках, оказываются менее эффективными, чем при литье в песчаные формы. Поэтому в массивных частях отливки, удаленных на значительное расстояние от прибыли, часто образуются усадочные раковины. Применение внутренних холодильников для устранения усадочных раковин в данном случае не дает положительных результатов, так как ведет не к устранению, а лишь к перемещению усадочной раковины. Кроме того, внутренние холодильники часто являются причиной возникновения газовых раковин.

Основными мероприятиями, обеспечивающими получение отливок из чугуна с шаровидным графитом при литье в кокиль без дефектов усадочного происхождения является создание конструкции литой детали с равномерной толщиной стенки.

Помимо этого, необходимо особое внимание обращать на подбор соответствующего состава чугуна.

Известно, что чугун с шаровидным графитом эвтектического и близкого к эвтектическому составу склонен к образованию сосредоточенных усадочных раковин, предупреждение образования которых представляет меньшие трудности, чем усадочной пористости, характерной для чугуна доэвтектического состава.

Не менее важным при отливке деталей из высокопрочного чугуна в кокиль является вопрос о скорости заливки. Практика показала, что лучшие результаты получаются при небольшой скорости заливки, так как в этом случае обеспечивается наиболее полная эвакуация воздуха и газов из полости формы, что способствует уменьшению количества газовых раковин в отливках. Отсутствие фонтанирования металла при поступлении его в полость формы создает благоприятные условия для получения отливок без окисных плен.

По данным Одесского конструкторского бюро скорость заливки мелких деталей при кокильном литье колеблется от 2,0 до 3,0 *кг/сек*. Увеличение скорости заливки ведет к появлению в отливках большого количества газовых раковин. Скорость подъема металла в полости кокиля составляет 20—45 *мм/сек*.

Что касается подвода металла к отливке, то при кокильном литье деталей из высокопрочного чугуна место подвода металла устанавливается применительно к каждой конкретной детали. В некоторых случаях полностью оправдывает себя заливка сверху с применением дождевого литника, выполненного в песчаном стержне. При таком подводе металла создаются благоприятные условия для получения отливок без усадочных раковин. Однако при таком способе заливки на поверхности отливки иногда появляются окисные пленки, которые в процессе подъема металла прижимаются к стенкам кокиля падающей сверху струей металла.

Сифонная заливка, наоборот, способствует получению отливок без окисных плен и газовых раковин. Однако при этом способе

подвода [металла труднее получить отливку без усадочных раковин.

Особое внимание при литье деталей из высокопрочного чугуна в кокиль следует обращать на линейную усадку. Практика показывает, что при литье в кокиль деталей со сложной конфигурацией усадка отливки происходит различно в разных направлениях. Величина линейной усадки разных частей отливки зависит от конструкции кокиля, определяющей степень торможения линейной усадки, а также от того, через какой промежуток времени после заливки производится извлечение стержней и раскрывание кокиля.

Так как при литье в кокиль деталей из высокопрочного чугуна отливки получают, как правило, со сквозным отбелом, величина линейной усадки получается повышенной (1,5—1,8%), если при этом отсутствовало резкое торможение линейной усадки. При последующей термической обработке отливок происходит увеличение размеров отливки вследствие происходящего процесса графитизации чугуна. Это увеличение размеров составляет 1,4—1,5%. Таким образом, при изготовлении кокиля размеры увеличиваются на 0—0,5% в сравнении с чертежом отливки.

Вследствие того что в отливках из чугуна с шаровидным графитом, отлитых в кокиль, образуются повышенные литейные напряжения, отливки, извлеченные из кокиля, следует помещать в специальный обогреваемый колодец во избежание образования холодных трещин и разрушения отливок.

К недостаткам кокильного литья из чугуна с шаровидным графитом следует отнести его большую склонность к отбеливанию, вследствие чего почти все детали, отлитые в кокиль, должны подвергаться термической обработке, при которой отливки нагреваются до 900—950°, а при отжиге в соляных ваннах даже до 1050° с целью разложения структурно-свободного цементита.

В настоящее время в кокиль отливаются многие детали из чугуна с шаровидным графитом. К их числу относятся: прокатные валки, изложницы для отливки стальных слитков, мелкие коленчатые валы, стойки плугов, лемехи плугов, ступицы колес, колеса шахтных вагонеток, катки траков тракторов, барабаны шахтных лебедок, двубортные ролики, шапки изоляторов высоковольтных передач, присадочные стержни для заварки отливок и т. п.

**а) Прокатные валки.** Одной из наиболее ответственных деталей прокатных станов является прокатный валок. Прокатные валки в процессе эксплуатации находятся в очень тяжелых условиях, они испытывают периодические ударные нагрузки, воспринимают на себя большое давление, подвергаются сильному износу и испытывают попеременные тепловые нагрузки. Поэтому прокатные валки должны иметь высокую общую прочность, достаточно высокую ударную вязкость, очень твердую поверхность и высокую термическую стойкость. Кроме этого, поверхность валков должна быть совершенно гладкой, в противном случае качество проката (особенно прокатываемых листов) будет невысокое.

Прокатные валки, отливавшиеся ранее из серого чугуна, часто выходили из строя вследствие невысокой их общей прочности.

Наиболее полно всем указанным требованиям удовлетворяют валки, отливаемые из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом [49] — [51].

Плавка чугуна для отливки крупных прокатных валков производится в отражательных печах, а мелких листопрокатных и мелкосортных валков в вагранках.

В соответствии с весом и назначением прокатных валков химический состав чугуна приведен в табл. 33.

Таблица 33

Плавильный агрегат	Химический состав в %					Тип валков
	C	Si	Mn	P	S	
Отражательная печь	3,2—3,4	0,35—0,60	0,2—0,5	0,5	0,09	Листопрокатные
То же	3,2—3,4	0,9—1,3	0,2—0,5	0,5	0,09	Крупные обжимные
Вагранка	3,3—3,7	0,35—0,5	0,3—0,5	0,5	0,14	Листопрокатные
То же	3,3—3,7	0,8—2,0	0,3—0,5	0,5	0,14	Мелкосортные

При плавке чугуна в отражательных печах шихта состоит из 40—50% чушкового чугуна и 60—50% лома изношенных валков, а при выплавке в вагранке — из 80—85% чушкового чугуна и 15—20% стального лома.

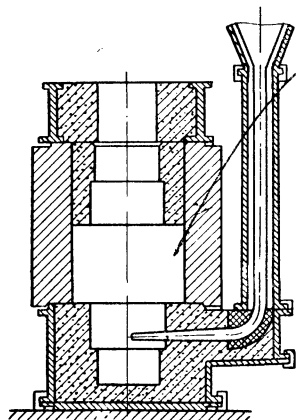
Листопрокатные валки должны иметь отбеленный слой твердостью *HV* 390—460 и прочную сердцевину. Сортопрокатные валки должны иметь *HV* 180—450. Твердость валков обжимных клетей должна быть *HV* 180—240, черновых клетей *HV* 240—360 и чистовых клетей *HV* 280—450. Глубина отбеленного слоя должна быть 40—60 мм для мелкосортных валков, 80—110 мм — для среднесортных валков и 200—250 мм — для крупносортных валков.

Для получения шаровидного графита чугун обрабатывается чистым магнием, вводимым в колоколах, в количестве 0,32% в чугун, выплавленный в отражательной печи, и 0,42% — в чугун, выплавленный в вагранке. Во избежание выплескивания чугуна из ковша, на ковш устанавливается специальная надставка с крышкой. В боковой части крышки сделано отверстие, соединенное с трубой, для отвода образующихся газов.

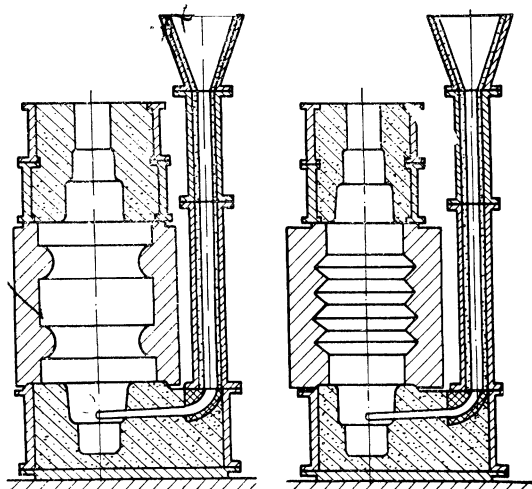
Температура чугуна на желобе отражательной печи должна быть 1370—1400°, а на желобе вагранки — не ниже 1340°.

После обработки чугуна магнием и тщательной очистки металла от шлака производится заливка форм.

На фиг. 87 показана схема литейной формы для заливки листопрокатных валков. Заливка форм производится сифоном; температура чугуна в начале заливки  $1270\text{--}1290^\circ$ . После заполнения формы на  $200\text{--}250$  мм выше края бочки заливка прекращается с таким расчетом, чтобы на поверхности соприкосновения жидкого металла с формой образовалась твердая корка металла толщиной  $25\text{--}35$  мм. После этого заливка продолжается тем же чугуном, но с добавкой



Фиг. 87. Кокиль для отливки прокатных валков.



Фиг. 88. Кокиль для отливки профилированных валков.

ферросилиция на струю чугуна в количестве  $1,1\text{--}1,4\%$ . На фиг. 88 показаны схемы формовки профилированных прокатных валков.

При отливке прокатных валков для мелкосортных станов чугун обрабатывается магнием и ферросилицием и после соответствующего перемешивания заполняется вся форма. При отливке прокатных валков для обжимных станов и черновых станов, заливка форм производится следующим образом: на струю чугуна, поступающего в форму, дается  $0,5\text{--}0,7\%$  ферросилиция. По заполнении формы до уровня кокиля резко уменьшается скорость заливки и увеличивается количество ферросилиция до  $1,2\text{--}1,5\%$ .

Как показала практика, стойкость прокатных валков, отлитых из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, выше стойкости валков из серого чугуна в  $1,5\text{--}2,5$  раза на сортотрубопрокатных и рельсобалочных станах и в  $1,3\text{--}2,0$  раза — на листопрокатных станах. Это объясняется главным образом высокой прочностью сердцевины валков из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом отливаются все виды прокатных валков диаметром  $0,2\text{--}1,4$  м, длиной  $0,5\text{--}6,0$  м,

Весом 0,3—36,0 т, составляющие свыше 70% продукции вальце-литейного производства. На многих типах станов применяются прокатные валки из чугуна с шаровидным графитом вместо более дорогих и менее износостойких стальных литых и кованных валков. Только некоторые разновидности прокатных валков с повышенной твердостью, например высоколегированные валки для непрерывных тонколистовых станов, отбеленные валки для бумажной промышленности, химической, резиновой, мукомольной и некоторых дру-

гих отраслей промышленности, отливаются из чугуна с пластинчатым графитом.

б) **Изложницы.** В Советском Союзе на 1 т выплавляемой стали расходуется около 2,0 кг изложниц; вполне понятно стремление металлургов повысить стойкость изложниц и тем самым уменьшить расход металла на их изготовление.

Такая возможность появилась в результате освоения производства отливок из чугуна с шаровидным графитом. Изложницы, отливавшиеся из чугуна с пластинчатым графитом, выходили из строя в основном из-за появления продольных трещин и сетки разгара, образующихся в результате больших термических напряжений.

Вследствие высокой прочности и пластичности чугуна с шаровидным графитом, высокой термической стойкости и ростоустойчивости, стойкость изложниц, отлитых из высокопрочного чугуна, возрастает в 2—3 раза по сравнению со стойкостью изложниц, отлитых из серого чугуна.

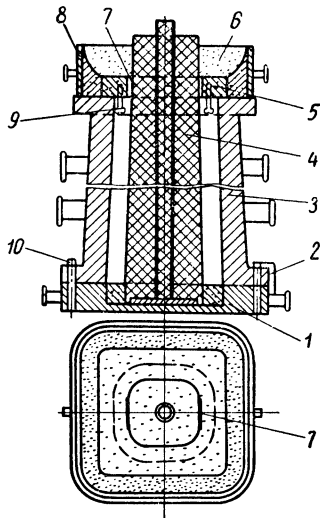
Проведенные исследования показали, что высокая стойкость изложниц из магнезиевого чугуна достигается в тех случаях, когда прочность чугуна составляет не менее 35 кг/мм<sup>2</sup> при удлинении не менее 5%.

Химический состав чугуна для изложниц должен быть следующий: 3,3% С—3,6 С; 2,0—2,5 Si; 0,25—0,7% Mn; 0,10—0,18% P; до 0,02% S; 0,15% Cr.

Уральским институтом металлов [51] проведена большая работа по освоению процесса отливки изложниц в кокиль. В результате этой работы было установлено, что чугун, обработанный магнием, залитый в кокиль и подвергнутый отжигу, обладает высокими пластическими свойствами, что обеспечивает высокую стойкость изложниц в эксплуатации.

На фиг. 89 показана схема кокиля для заливки изложниц. На поддоне 1 установлен кокиль 3, центральной стержень 4, верхний перекрывающий стержень 5 и литниковая чаша 6 в опоке 8. Взаимное положение поддона и кокиля обеспечивается при помощи шты-

ков 2. Литниковая чаша 6 имеет литниковый канал 7, который соединяется с каналом 9, ведущим к кокилю 3. Штыки 2 служат для фиксации кокиля на поддоне 1.



Фиг. 89. Кокиль для отливки изложниц.

рей 10. Крепление изложницы к поддону производится скобами 2. Заливка кокиля производится сверху через два щелевые литника 7, выполненные в стержне. В этом же стержне находятся стальные уши 9, для удобства транспортирования отлитых изложниц.

Внутренние поверхности кокиля покрываются перед заливкой тонким слоем краски. Перед заливкой кокиль должен иметь температуру 60—80°.

Обработка чугуна 75%-ным ферросилицием производится в количестве 0,3—0,5% в литниковой чаше в процессе заливки кокиля.

Структура чугуна изложниц, отлитых в кокиль, состоит из перлита и цементита. Для получения ферритной структуры изложницы подвергаются отжигу по следующему режиму: нагрев до 900—950° со скоростью 150° в час, выдержка 12 час., охлаждение с печью до 200—300° со скоростью не более 50° в час. Во избежание образования окалины изложницы отжигаются с невыбитыми стержнями.

Стойкость изложниц, отлитых в кокиль, не ниже стойкости изложниц, отлитых в песчаные формы.

В настоящее время освоено производство изложниц для заливки мелких и средних слитков.

Одесское конструкторское бюро в течение длительного времени плодотворно работает над созданием конструкций кокилей и кокильных установок для отливки деталей из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом [52] — [54].

**в) Колесо шахтной вагонетки.** На фиг. 90 показан кокиль для отливки колеса шахтной вагонетки из чугуна с шаровидным графитом. При отливке в кокиль колес вагонеток плавка чугуна производится в вагранке; чугун обрабатывается магнием в автоклавах. Ковш с обработанным чугуном устанавливается в трехпозиционную машину. Кокили смонтированы на карусельной 16-позиционной литейной машине. Кокили раскрываются гидравлическими цилиндрами. В поршне гидравлического цилиндра совмещен гидроцилиндр для вытягивания стержня из отливки.

Поворот рамы машины с кокилями производится по заданному циклу с помощью гидравлического цилиндра и храпового механизма.

Управление разливочной и кокильными машинами производится с общего пульта управления.

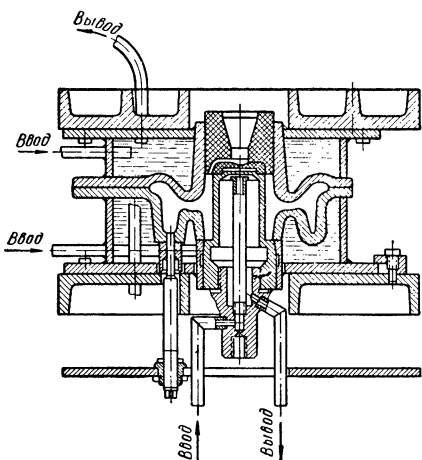
Разливка металла в кокили происходит во время перемещения машины, что повышает ее производительность.

Установлена следующая последовательность работы машины. Жидкий чугун из ковша заливается в поворотную разливочную чашу (3—4 сек.), расположенную над литниковыми каналами кокиля. После этого включается привод машины и в течение 10 сек. происходит заливка чугуна в кокиль. В течение последующих 20 сек. происходит кристаллизация чугуна в кокиле. После этого открывается крышка кокиля, отливка выталкивается из кокиля и укладывается на транспортер, подающий отливки на отжиг.

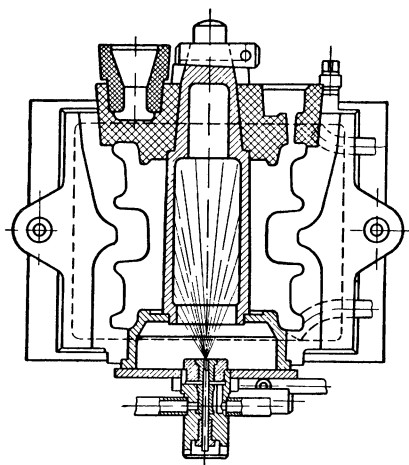
Рабочая температура кокиля составляет 150—250°. После каждой заливки кокили покрываются копотью и в течение смены дважды

окрашиваются. Отлитые детали укладываются по две штуки на поддон, который проталкивается в термическую печь, где отливки нагреваются до температуры 950—980°. Через 2,5 часа отливки поступают в следующую зону печи, имеющую температуру 850°, после чего перемещаются в охлаждающую зону, где они в течение часа охлаждаются до 650°, затем детали погружаются в бак с водой.

г) **Опорные ролики тракторов.** При отливке роликов из чугуна с шаровидным графитом состав чугуна принимается следующий:



Фиг. 90. Кокиль для отливки колес шахтной вагонетки.



Фиг. 91. Кокиль для отливки опорных роликов.

3,2—3,5% С; 2,8—3,2% Si; 0,4—0,7% Mn; до 0,12% P; до 0,05% S; до 0,03% Mg. Для получения шаровидного графита чугун обрабатывается в автоклаве магнием в количестве 0,15—0,020%. Заливка чугуна при температуре 1300—1320° производится в кокиль, нагретый до 180—220°. Время заливки составляет 1,4—1,6 сек. при скорости заливки 2,5—3,0 кг/сек.

Для поддержания заданной температуры кокиль охлаждается машинным маслом, имеющим температуру 40—50°.

Центральное отверстие в ролике получается металлическим стержнем, охлаждаемым водой.

Заливка кокиля производится дождевым литником сверху.

На фиг. 91 показан кокиль для отливки опорных роликов.

д) **Стойка плуга.** Одной из массовых деталей, отливаемых в кокиль из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, является стойка плуга. Чистый вес детали 22,7 кг, черный вес — 23,0 кг. Вес литников и прибылей для этой детали составляет всего 2,0 кг.

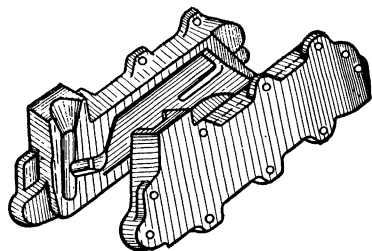
Заливка кокиля производится сверху через щелевой питатель; время заливки составляет 10—12 сек. Раскрытие кокиля производится через 20 сек. после окончания заливки.

Для получения заданной структуры отливки проходят следующую термическую обработку: отжиг при температуре  $1050^{\circ}$  в соляной ванне в течение 22 мин. и в проходной электропечи при температуре  $720^{\circ}$  в течение 50 мин.

Стальные стойки плуга при испытании под нагрузкой 3 т изгибаются; стойки плуга, отлитые из чугуна с шаровидным графитом, при испытании под нагрузкой 5 т не изгибаются и не разрушаются.

е) **Лемехи плугов.** Одной из самых тонкостенных деталей массового производства является лемех плуга, изготавливаемый из специальных марок стали.

На заводе сельскохозяйственного машиностроения им. Октябрьской революции освоено производство лемехов плугов в кокиль из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Лемехи плугов имеют вес 4,3 кг, длину 600 мм и высоту 120 мм. Лемехи отливаются в кокиль из чугуна следующего химического состава: 3,4—3,6% С; 3,0—3,2% Si; 0,4—0,6% Mn; до 0,15% P и до 0,02% S. Отливки подвергаются нормализации для получения перлитной структуры и повышения их износостойкости по следующему режиму: нагрев до  $950^{\circ}$ , выдержка при этой температуре 1 час, охлаждение на воздухе. Затем отливки закаливают в соляной ванне по следующему режиму: нагрев до  $920—950^{\circ}$  и охлаждение в воде. Закаленные детали подвергаются отпуску при температуре  $240—280^{\circ}$ . После такой термической обработки твердость лемехов составляет не менее *HV 444*.



Фиг. 92. Кокиль для отливки лемехов плугов.

На фиг. 92 показан кокиль для отливки лемехов плугов. Кокили монтируются на специальной кокильной машине карусельного типа. После заливки кокиля производится выдержка отливки в течение 4—6 сек., после чего производится раскрытие формы и удаление отливки.

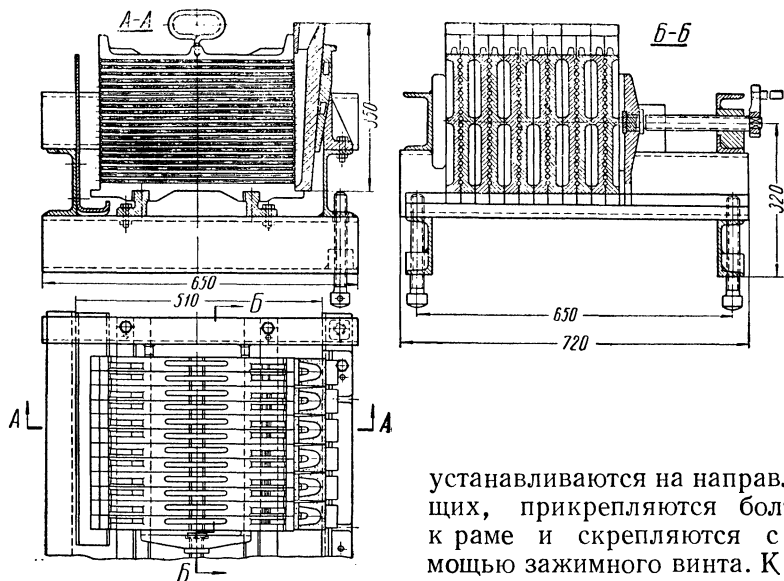
ж) **Присадочные стержни.** Стержни для газовой заварки деталей отливаются из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с высоким содержанием магния. Химический состав чугуна должен быть следующий: 3,0—3,5% С; 2,7—3,5% Si; не более 0,45% Mn; не более 0,07% P; не более 0,05% Cr; 0,07—0,14% Mg.

Плавка чугуна производится в высокочастотных печах с кислой футеровкой или в дуговых печах. На дно печи загружается электродный бой и около половины заготовленной для шихты стали. Затем производится расплавление шихты и добавка оставшейся стали, при этом вводится 75%-ный ферросилиций. Расплав нагревается до  $1500—1650^{\circ}$ .

Обработка чугуна чистым магнием производится в герметизированном ковше. Для обеспечения повышенного содержания оста-

Точного магния в чугун вводится повышенное количество магния 0,5—0,7%. Заливка стержней производится в кокиль, показанный на фиг. 93. Кокиль состоит из нескольких частей, каждая из которых имеет отдельную литниковую систему, выполненную в песчаных стержнях. Со стороны литниковой системы кокиль открыт, что обеспечивает получение стержней по длине равных длине кокиля.

Перед сборкой кокиль подогревается до температуры 100—150° и окрашивается каменноугольной смолой. После этого части кокиля



Фиг. 93. Кокиль для отливки при-  
содочных стержней.

устанавливаются на направляющих, прикрепляются болтами к раме и скрепляются с помощью зажимного винта. К торцу кокиля притираются литниковые стержни, которые затем закрепляются клиньями. Соб-  
ранный кокиль подогревается до 200—250°, после чего производится заливка металла. После заливки сразу же освобождается зажимной винт для обеспечения свободной усадки отливки. Освобождение стержней из кокиля производится через 2—3 мин. после заливки. Для отделения стержней от литниковой части, на них надевается стальная трубка, с помощью которой производится отламывание отлитых стержней.

Развитие производства кокильного литья из чугуна с шаровидным графитом идет по пути создания автоматических поточных линий. Так по проекту Одесского ЦКТБ строится специализированный цех кокильного литья стоек плугов с установкой двух автоматических линий. На Торецком заводе начато строительство автоматической линии для отливки из высокопрочного чугуна колес шахтных ваго-  
неток. На Харьковском заводе «Серп и молот» строится специализи-  
рованный цех на выпуск коленчатых валов из высокопрочного чугуна для тракторных двигателей.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом успешно применяется для отливки деталей различного назначения центробежным способом.

Центробежный способ литья устраняет некоторые дефекты, характерные для чугуна с шаровидным графитом. Детали, отлитые центробежным способом из чугуна с шаровидным графитом, не содержат усадочных раковин и рыхлот. Давление, развиваемое при вращении изложницы, способствует проникновению жидкого чугуна между затвердевающими дендритами, заполнению образующихся пустот. Особенно благоприятные условия для устранения усадочных раковин и осевой рыхлоты создаются тогда, когда уменьшается скорость затвердевания металла во вращающейся изложнице. Чем дольше чугун затвердевает в изолированной изложнице, тем больше остается времени для заполнения образующихся усадочных раковин и усадочных рыхлот.

Как указывалось ранее, после обработки чугуна магнием образуется большое количество шлака, удаление которого крайне затруднительно вследствие небольшой разницы в удельных весах металла и шлака. Удельный вес шлака, являющегося продуктом реакции жидкого чугуна с магнием, составляет  $6,74 \text{ г/см}^3$ , а продукта реакции с магнием и ферросилицием —  $5,87 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, удельный вес шлака приближается к удельному весу жидкого чугуна, но все же разница между ними достаточна для того, чтобы полностью отделить шлак при заливке чугуна во вращающуюся изложницу.

При вращении жидкого чугуна в изложнице шлаковые включения отбрасываются на внутреннюю поверхность, откуда легко удаляются при механической обработке.

Чугун с шаровидным графитом успешно применяется для изготовления поршневых колец, отливаемых в виде маслот центробежным способом. Поршневые кольца, изготовленные из маслот, отлитых центробежным способом, успешно применяются уже в течение нескольких лет на насосах и компрессорах.

Хотя после внедрения в производство поршневых колец, отлитых из чугуна с шаровидным графитом, удельное давление колец повысилось, износ-цилиндров не увеличился по сравнению с кольцами из модифицированного чугуна, а остаточная деформация была устранена полностью даже в кольцах очень малой толщины ( $1,5 \text{ мм}$ ).

Кольца, отлитые центробежным способом, смонтированные на компрессорах, не обнаружили понижения упругости после испытания на пробег поршня пути, равного  $8500 \text{ км}$ . Зазор в замке не уменьшился, что свидетельствует об отсутствии остаточной деформации.

При таком испытании износ цилиндров, отлитых центробежным способом из модифицированного чугуна, составил  $0,02 \text{ мм}$ , а износ колец, отлитых из чугуна с шаровидным графитом, составил только  $0,003 \text{ мм}$ .

На двигателях внутреннего сгорания автомобилей и тракторов поршневые кольца, изготовленные из ферритного чугуна с шаровидным графитом, переведенного в перлитный чугун, путем термической обработки показали такие же свойства, как кольца, имевшие перлитную структуру в литом состоянии. После длительных испытаний поршневых колец, изготовленных из чугуна с шаровидным графитом, установленных в насосах, процент брака по дефектам материала понизился до 2—5%, в то время как раньше брак по недостаточной упругости доходил до 50% [55].

Из втулок, отлитых из чугуна с шаровидным графитом центробежным способом, был изготовлен статор насоса пресса, предназначенного для штамповки пластмассовых изделий. Вначале для этой цели была выбрана ковкая сталь с содержанием 15% хрома.

После механической обработки поковка закаливалась до твердости 60—62 по Роквеллу. Пробный статор из чугуна с шаровидным графитом, подвергавшийся изотермической закалке в соляной ванне из 50% NaNO<sub>3</sub> и 50% KNO<sub>3</sub> с температурой в 300° имел твердость 48 по Роквеллу.

Наружные стенки статора работают на истирание, причем истирающимися частями являются лопатки из стали, закаленной до твердости 62—64 по Роквеллу.

Сравнение величины износа статоров, изготовленных из обоих материалов после одинаковых сроков работы, показало, что износ чугунного статора был не больше, чем стального. Таким образом, можно с успехом применять чугун с шаровидным графитом, закаленный изотермически, для отливки аналогичных деталей вместо дорогостоящей и трудно поддающейся термической обработке подшипниковой стали.

Состав чугуна для отливки втулок после модифицирования был следующий: 3,0—3,4% С; 2,3—3,2% Si; 0,5—0,8 Mn; 0,10—0,15% P; 0,02% S. После расплавления шихты и скачивания шлака вводилось 1,5—2,0% магниевой лигатуры. После введения магния ванна тщательно перемешивалась и производилась заливка изложниц. Перед заливкой чугунные изложницы подогревались до 300°.

На втулках, отлитых в неизолированные изложницы, обнаружили отбел, для устранения которого изложницы покрыли изоляционной пастой толщиной 0,5 мм, состоящей из 1,5 л воды, 0,10 кг порошка асбеста, 0,4 кг бентонита, 0,25 кг молотого графита, 0,01 кг марганцевокислого калия и 0,04 кг жидкого стекла. Однако и при этом отбел был устранен не полностью.

Наилучшим способом предохранения чугуна от отбела является изоляция затвердевающего металла от металлической изложницы песчаной втулкой.

В отлитых таким способом втулках из чугуна с шаровидным графитом отбела не было обнаружено.

Твердость наружной и внутренней поверхностей втулок, отлитых центробежным способом, была одинаковой и приближалась к твердости втулок, отлитых в песчаные формы.

Для разложения структурно свободного цементита, получающегося при отливке втулок в неизолированную изложницу, необходим отжиг отливок при температуре 900—940°.

Хорошая металлическая основа чугуна, отсутствие многих литейных пороков, мелкие включения шаровидного графита, равномерно распределенные в металлической основе, — таковы основные преимущества чугуна, отлитого центробежным способом.

Твердость втулок с перлитно-ферритной структурой после закалки в воде составляла 62 по Роквеллу, а после закалки в масле 60. Образцы под закалку нагревались в соляной ванне до 850—870°. После выдержки при температуре аустенизации образцы охлаждались в воде или масле. Можно производить нагревание втулок под закалку и в электропечи, в этом случае длительность нагрева несколько увеличивается. Так, например, втулки наружным диаметром 124 мм, внутренним диаметром 100 мм и длиной 280 мм выдерживались в электропечи при 850° 1 час, а в соляной ванне только 20 мин.

Втулки, имеющие феррито-перлитную структуру в литом состоянии или обнаружившие после нормализации много свободного феррита, подвергались закалке с отпуском. Закаленные изотермически отливки имеют значительно большую износостойкость, чем отливки, закаленные и отпущенные до такой же твердости, причем наибольшей износостойкостью обладал магниевый чугун, отпущенный до 350—450° или закаленный изотермически в селитровой ванне при температуре 500 и 350°.

Прочностные свойства чугуна (предел прочности при растяжении, удлинение и ударная вязкость) после изотермической закалки были выше, чем после обычной закалки с отпуском до такой же твердости [56].

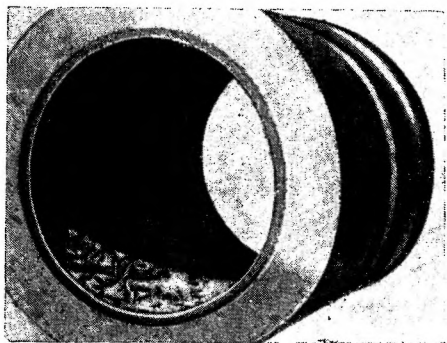
Из отлитых центробежным способом втулок из чугуна с шаровидным графитом изготавливались также гильзы цилиндров компрессоров толщиной 5 мм. После закалки в селитровой ванне до твердости по Бринелю около 320 гильзы вставлялись в цилиндры в горячем состоянии.

На Барнаульском заводе дизельных запасных частей освоена отливка гильз для дизельных двигателей средней мощности из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, взамен гильз, изготавливаемых из цельнотянутой стальной трубы (сталь 38ХМЮА, азотированная). Отлитые гильзы подвергаются термической обработке (закалка с отпуском), в результате которой получают следующие механические свойства:  $\sigma_b$  не менее 40 кг/мм<sup>2</sup>;  $\delta$  не менее 1%;  $HV$  277—331.

Микроструктура чугуна после термической обработки — перлитная. Отливка гильз производится центробежным способом в металлические изложницы с покрытием рабочей поверхности изложниц песчаной смесью на терморезистивной смоле. Плавка чугуна производится в вагранке, а обработка чугуна магнием в герметизированном ковше конструкции ЦНИИТМАШ. Гильзы, отлитые из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом центробежным способом, можно рекомендовать для двигателей внутреннего сгорания [57].

В Италии фирма Ансольдо на больших и средних дизельных двигателях применяет биметаллические рубашки цилиндров, отлитые центробежным способом. На фиг. 94 показана рубашка цилиндров двигателя Ансольдо, отлитая из перлитного чугуна с шаровидным графитом с внутренним слоем из хромофосфористого чугуна.

Чугун с шаровидным графитом применяется для канализационных и нефтепроводных труб, отливаемых центробежным способом.



Фиг. 94. Рубашка цилиндров двигателя, отлитая центробежным способом.

Нефтепроводные трубы, отлитые из высокопрочного чугуна, позволяют повысить давление в них в два раза.

На Макеевском труболитейном заводе были отлиты из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом партии опытных водопроводных труб диаметром 50, 100 и 300 мм, толщиной стенок 8—12 мм и длиной 3000—4000 мм. Вследствие того что водопроводные трубы в процессе эксплуатации испытывают значительные нагрузки (гидравлические удары, вибрация), в качестве материала был принят

высокопрочный чугун с ферритной структурой. Обработка чугуна производилась магниевой лигатурой, которая вводилась в чугун при температуре 1340—1360°. Отливка деталей производилась центробежным способом в футерованные и водоохлаждаемые изложницы. Скорость вращения формы при заливке чугуна в футерованную изложницу составляет 840 об/мин, а при заливке в водоохлаждаемые изложницы 340 об/мин.

Микроструктура чугуна, отлитого в водоохлаждаемую изложницу, ледебуритная с включениями шаровидного графита диаметром 15—35 мк. Микроструктура чугуна, отлитого в футерованную изложницу, перлитная с включениями шаровидного графита диаметром 25—50 мк.

Механические свойства чугуна с ферритной структурой, полученной после отжига, были следующие:  $\sigma_b = 35 \div 40$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_u = 60$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\delta = 7 \div 9\%$ ;  $a_k = 2 \div 3$  кгм/см<sup>2</sup>. Механические свойства чугуна с перлитной структурой, полученной после нормализации:  $\sigma_b = 50$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_u = 80$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\delta = 1,0 \div 1,5\%$ ;  $a_k = 1,2 \div 1,5$  кгм/см<sup>2</sup>.

Водопроводные трубы, отлившиеся из обычного серого чугуна, испытываются при давлении 25 кг/см<sup>2</sup>. Водопроводные трубы диаметром 100 мм, отлитые из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и имеющие перлитную структуру, выдерживали испытания при давлении 55—60 кг/см<sup>2</sup>, трубы диаметром 50 мм выдерживали испытание при давлении 200 кг/см<sup>2</sup>.

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Шаровидные включения графита в значительно меньшей мере снижают прочность металлической основы, чем пластинчатые, в результате чего повышение прочности, сообщаемое термической обработкой, оказывается гораздо более значительным.

Термическая обработка высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, кроме того, является серьезным средством изменения и регулирования пластических свойств этого чугуна.

В отливках из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом термической обработкой можно также повысить однородность структуры и свойств, улучшить обрабатываемость резанием, повысить ряд эксплуатационных свойств (износостойкость, коррозионную стойкость и др.).

Указанными обстоятельствами и обусловлено то внимание, которое в последние годы уделяется вопросам термической обработки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, в результате чего разработаны режимы различных видов термической обработки, применяемые для производства отливок из этого чугуна.

### 1. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Теоретические основы термической обработки стали, установленные Д. К. Черновым и развитые дальнейшими многочисленными исследованиями, являются исходными для определения режимов этого технологического процесса и для чугуна с шаровидным графитом.

Рассматривая основные элементы этого процесса — скорость нагрева, температуру нагрева, время выдержки, условия охлаждения — следует отметить, что существенное влияние на каждый из этих параметров оказывает химический состав и структура исходного чугуна.

Регулирование в значительных пределах свойств чугуна с шаровидным графитом за счет термической обработки является результатом изменения структуры металлической основы и процесса

графитизации; термическая обработка вызывает также изменение величины внутренних напряжений в отливках.

Не останавливаясь подробно на этих вопросах, обстоятельно разбираемых в соответствующих руководствах [58], [20], отметим следующие основные виды термической обработки чугуна с шаровидным графитом.

Снятие напряжений характеризуется относительно медленным нагревом и охлаждением. Температура нагрева не достигает области структурных превращений.

Отжиг является одной из весьма распространенных операций для чугунных отливок. Этому виду термической обработки подвергают большую часть отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Отжиг характеризуется нагревом с умеренной скоростью до интервала эвтектоидного превращения, выдержкой при температуре, превышающей эвтектоидную в течение 3—6 час. с медленным охлаждением.

Большое распространение для ряда чугунных отливок имеет вариант отжига для разложения структурно-свободного цементита и снятия поверхностного отбела.

Нормализации подвергаются многие отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Выдержка при высоких температурах дает возможность разложить структурно-свободный цементит (если он имеется в исходном чугуне), а повышенная скорость охлаждения (охлаждение производится на воздухе) обеспечивает получение структуры сорбита или сорбитообразного перлита, сообщающего чугуну высокую износостойкость и повышенные механические свойства. Нормализация часто сопровождается отпуском.

Закалка применяется для отливок простой конфигурации и обычно сочетается с отпуском.

Одной из разновидностей закалки является изотермическая закалка, дающая при высокой прочности значительное повышение износостойкости. Этот вид термической обработки также часто сочетается с отпуском.

Описанные виды термической обработки характеризуются структурными и фазовыми превращениями во всем объеме обрабатываемого изделия. Наряду с этим разработаны такие приемы термической обработки, при которых указанные превращения происходят только в поверхностном слое отливки. Сюда относятся различные виды поверхностной закалки, а также все виды химико-термической обработки: азотирование — насыщение поверхностного слоя обрабатываемого изделия азотом; хромирование — насыщение хромом; сульфидирование — насыщение серой. Во всех этих случаях достигается повышение свойств поверхностного слоя изделия — износостойкости, жаростойкости или коррозионной стойкости.

При рассмотрении отдельных видов термической обработки будут приведены данные об изменении свойств, вызываемых тем или иным видом термической обработки. Общее же представление о влиянии

структуры матрицы на основные свойства чугуна с шаровидным графитом приведены на фиг. 95, которая дает представление о зависимости между структурными составляющими матрицы, с одной стороны, и прочностью и удлинением с другой. Графики этой фигуры показывают, что наибольшие удлинения соответствуют ферритной структуре матрицы.

Весьма существенной является характеристика ударной вязкости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Абсолютное значение этой характеристики находится также в большой зависимости от структуры матрицы, а ферритная структура является также наиболее благоприятной. Однако ударная вязкость в большой мере зависит от природы феррита и химического состава чугуна.

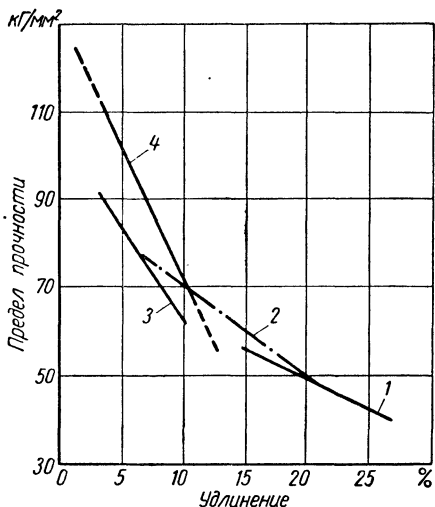
Повышение однородности самого феррита (достигаемое высокотемпературным отжигом) и понижение содержания кремния в чугуне способствуют повышению ударной вязкости.

Большое значение для вязкости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом имеет положение порога хрупкости — температуры, при которой наблюдается резкое снижение ударной вязкости.

Сдвиг порога хрупкости в сторону более низких температур является существенным фактором, способствующим повышению надежности работы деталей в эксплуатации.

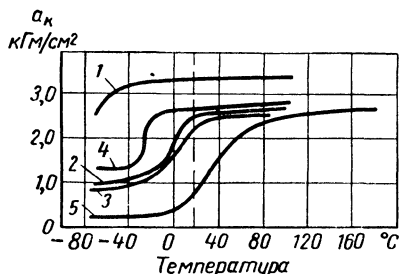
Ударная вязкость и температура перехода из хрупкого состояния в вязкое (порог хрупкости) для чугунов состава, указанного в табл. 34, приведены на фиг. 96.

Из графиков видно, что сдвиг порога хрупкости в сторону более низких температур одновременно сопровождается повышением абсолютного значения ударной вязкости. Условием смещения порога хрупкости от области комнатных температур (в сторону более низких температур) является низкое содержание фосфора (положение



Фиг. 95. Механические свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в зависимости от структуры матрицы:

1 — феррит; 2 — перлит + феррит; 3 — перлит; 4 — отпущенный мартенсит.



Фиг. 96. Влияние химического состава на ударную вязкость и положение порога хрупкости.

кривых 1, 4 и 2). Кремний, как в низкофосфористом, так и в высокофосфористом чугуна понижает ударную вязкость и сдвигает порог хрупкости в сторону более высоких температур.

Проф. Гиришович Н. Г. и Симановский М. П. [59] приводят следующие данные о влиянии отдельных элементов на ударную вязкость и положение порога хрупкости (табл. 35).

Таблица 34

№ плавки	C	Si	Mn	P	Ni
1	3,25	1,8	0,3	0,04	1,09
2	2,84	1,72	0,53	0,04	1,06
3	3,26	1,71	0,33	0,16	1,04
4	3,2	3,0	0,3	0,04	1,07
5	2,88	3,14	0,63	0,15	1,06

Таблица 35

Элемент	Пределы содержания в %	Изменение свойства на 1% элемента		
		$a_K 20^\circ$	$a_K \text{ max}$	Смещение порога хрупкости в $^\circ\text{C}$
		в %		
Кремний	1,75—3,5	37	15	60
Фосфор	0,04—0,16	512	175	440
Марганец	0,3 — 0,7	90	57	130

При этом указывается, что эти данные являются усредненными, поскольку влияние каждого из рассматриваемых в табл. 35 элементов зависит, в частности, как от концентрации этого элемента, так и от состояния металла (хрупкое, вязкое или переходное).

Эти же авторы дают следующее среднее соотношение влияния элементов на ударную вязкость чугуна.

При вязком состоянии

$$\text{Si} : \text{Mn} : \text{P} = 1 : 3,8 : 12,5.$$

При переходном состоянии

$$\text{Si} : \text{Mn} : \text{P} = 1 : 2,4 : 13,1.$$

Влияние этих элементов на положение порога хрупкости определяется соотношением

$$\text{Si} : \text{Mn} : \text{P} = 1 : 2,2 : 7,3.$$

Предложена [59] формула для приближенного определения ударной вязкости ферритного высокопрочного чугуна с шаровидным графитом:

$$a_K = 4,5 - 0,55 [\text{Si} - 3,5 (\text{Mn} - 1,7\text{S}) + 13\text{P}] \text{ кгМ/см}^2.$$

Для количественной оценки влияния отдельных элементов химического состава чугуна и структуры его матрицы на положение порога хрупкости предложена следующая формула [60]:

$$T_{xp} = -95 + 50\text{Si} + 400 (\text{P} - 0,09) + (\% \text{ перлита} - 5) + \\ + 17 (\% \text{ карбидов} - 3), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

## 2. ВИДЫ И РЕЖИМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

а) **Снятие напряжений.** Как следует из самого названия, назначением этого вида термической обработки является снятие внутренних литейных напряжений. Этим достигается повышение надежности работы деталей в эксплуатации.

При этом виде термической обработки, характеризующимся нагревом до температур, не достигающих интервала эвтектоидных превращений, особо существенное значение имеет скорость нагрева.

Этот параметр зависит от конфигурации отливки и в большой мере определяется химическим составом чугуна. Чем сложнее конфигурация отливки, чем ниже содержание углерода и кремния в чугуне, чем выше содержание марганца, тем меньше должна быть скорость нагрева при этом виде термической обработки.

Наличие легирующих элементов в чугуне (никеля, меди и, особенно, хрома) требует снижения скорости нагрева. Максимальная температура нагрева детали не должна превышать  $550^{\circ}$ . В тех случаях, когда нет достаточной уверенности в равномерном распределении температур в рабочем пространстве печи, рационально снизить этот верхний предел.

Практически для этого вида термической обработки можно считать типичным следующий режим:

Нагрев со скоростью не выше  $100 \text{ град/час}^1$  до  $500^{\circ}$ ; выдержка при  $500^{\circ}$  — 2—3 часа; охлаждение со скоростью до  $80 \text{ град/час}^1$  до  $200^{\circ}$ ; дальнейшее охлаждение можно вести на воздухе.

Этот типичный режим может корректироваться в зависимости от конкретных условий.

Исходная структура матрицы чугуна, предназначенного для снятия напряжений, является перлитной, перлитно-ферритной либо феррито-перлитной без включений структурно-свободного цементита.

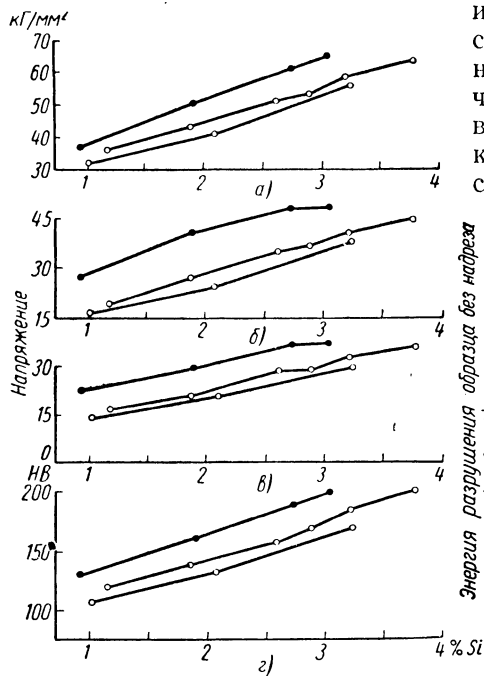
б) **Отжиг.** Отжиг является одним из наиболее эффективных средств повышения пластических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. При наличии шаровидных включений графита в чугуне пластичность и вязкость определяются двумя важнейшими факторами: 1. Структурой матрицы. 2. Химическим составом. Для получения высоких значений пластичности и вязкости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом необходимо, чтобы структура матрицы была ферритной, а содержание фосфора было бы менее 0,1%.

Повышенное содержание фосфора затрудняет получение чисто ферритной структуры при отжиге. В работах ЦНИИТМАШ [61] показано, что при содержании 0,08% P достаточно часовой выдержки при  $720^{\circ}$  для полного разложения цементита перлита и получения чисто ферритной структуры матрицы; с повышением же содержания фосфора в чугуне длительность выдержки, необходимой для процесса разложения цементита перлита, увеличивается, и при 0,26% P

<sup>1</sup> Для отливок сложной конфигурации скорость снижается до двух раз.

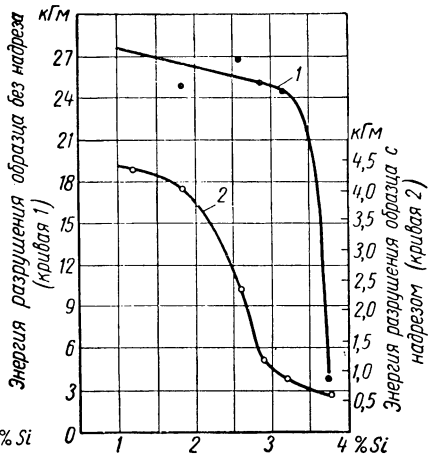
В чугуна выдержка даже в 16 час. не привела к полному разложению цементита перлита.

Действие кремния довольно сложно. Кремний, способствуя графитизации, облегчает получение при отжиге ферритной структуры и благоприятствует тем самым созданию условий для повышения пластичности и вязкости чугуна. В то же время, входя в твердый раствор с ферритом, кремний снижает пластические свойства чугуна.



Фиг. 97. Влияние содержания кремния на прочность и твердость термически обработанного ферритного высокопрочного чугуна:

а — предел прочности при растяжении; б — предел текучести; в — предел пропорциональности; г — твердость по Бриггелю.



Фиг. 98. Влияние кремния на ударную вязкость.

На фиг. 97 и 98 приведены данные, иллюстрирующие влияние кремния на прочность (фиг. 97) и вязкость (фиг. 98) [62] чугуна, состав которого приведен в табл. 36.

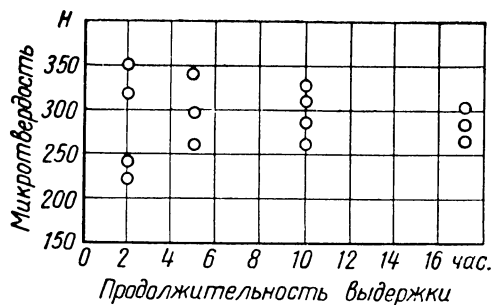
Таблица 36

№ плавки	Содержание в %						
	C	Mn	S	P	Ni	Mg	Ce
1	2,78— 2,98	0,17— 0,23	0,010— 0,019	0,05	2,82— 3,29	0,044— 0,106	—
2	3,00— 3,29	0,26— 0,31	0,025— 0,032	0,053— 0,065	0,54— 1,31	0,048— 0,077	0,021— 0,046
3	3,21— 3,53	0,31— 0,45	0,008— 0,014	0,011— 0,023	0,55— 0,89	0,045— 0,100	—

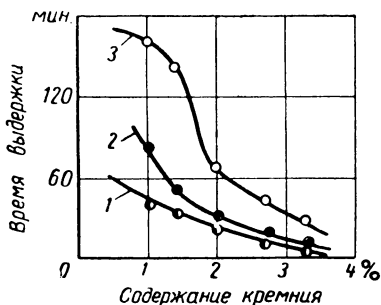
Основные элементы режима отжига — температура нагрева и продолжительность выдержки — в большой мере определяются содержанием кремния в чугунах.

Кремний повышает температуру эвтектондного превращения железо-углеродистых сплавов. Этим и определяется минимальная температура нагрева для отжига чугуна с получением ферритной структуры.

В чугунах с шаровидным графитом отмечено неравномерное распределение кремния между структурными составляющими. Так, определение микротвердости (фиг. 99) показало, что вблизи графита



Фиг. 99. Микротвердость феррита в зависимости от продолжительности выдержки при температуре 1050°.



Фиг. 100. Влияние кремния на распад эвтектического цементита. Температура отжига:

1 — 920°; 2 — 900°; 3 — 850°.

товых включений микротвердость феррита наибольшая, что свидетельствует о повышенной концентрации кремния в этих местах. О повышенной концентрации кремния в перлите на участках, прилегающих к ферритовым оторочкам вокруг графита, свидетельствуют также данные о микротвердости перлита.

Приведенными соображениями обуславливается в частности установленная рядом работ [59], [62], [74] рациональность применения при отжиге более высоких температур, обеспечивающих гомогенизацию структуры матрицы.

Важным обстоятельством, определяющим продолжительность выдержки при отжиге, является увеличение на 15—20% скорости распада цементита в магниевом чугунах с шаровидным графитом по сравнению с серым чугуном.

Кремний, как и в сером чугунах, способствует ускорению процесса распада цементита при отжиге (фиг. 100); особенно эффективно это проявляется при низких температурах отжига.

Марганец, как и в случае серого чугуна, затрудняет получение ферритной структуры при отжиге. Особенно же вредным является хром, резко повышающий стойкость карбидов.

Переходя к вопросу о практических режимах отжига отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, следует

Подчеркнуть, что этот вид термической обработки является наиболее распространенным.

Учитывая множество вариантов отжига, успешно применяющихся на отдельных заводах, можно все их свести к следующей типовой схеме.

1. Нагрев до температуры отжига должен предотвратить появление опасных внутренних напряжений. Скорость нагрева до 650—700° должна быть задана с учетом конфигурации, химического состава и исходной структуры отливки. Ориентировочно эту скорость следует принять порядка 100 град/час, уменьшая ее для отливок сложной конфигурации. Скорость нагрева от температур 650—700° до заданного режима не ограничивается и определяется мощностью нагревательной печи.

2. Максимальная температура нагрева устанавливается в 900—950°. Повышение этой температуры сверх указанного предела может оказаться полезным только для деталей небольшого развеса, несложной конфигурации, исходная структура которых содержит свободные карбиды, а химический состав характеризуется повышенным содержанием хрома или пониженным — кремния.

3. Во время выдержки при этой температуре в течение 3—5 час. происходит: разложение свободных карбидов и выравнивание химического состава в части распределения имеющихся примесей между структурными составляющими.

4. Снижение температуры до 720—740° при выключенном источнике подогрева.

5. Выдержка при температуре 720—740° в течение 2—4 час. В это время происходит разложение эвтектоидного цементита и получение ферритной структуры. Длительность выдержки обусловливается химическим составом чугуна.

6. Охлаждение отливок после пятого этапа во всех случаях производится в печи до температуры 680—690°; дальнейшее же охлаждение рекомендуется проводить на воздухе, поскольку замедленное охлаждение в интервале 650—450° может привести к резкому снижению вязкости (аналогичное явление известно для ковкого чугуна).

Все приведенные выше значения параметров процесса отжига высокопрочного чугуна с шаровидным графитом являются наиболее типичными. Однако в практических условиях могут быть допущены определенные отклонения.

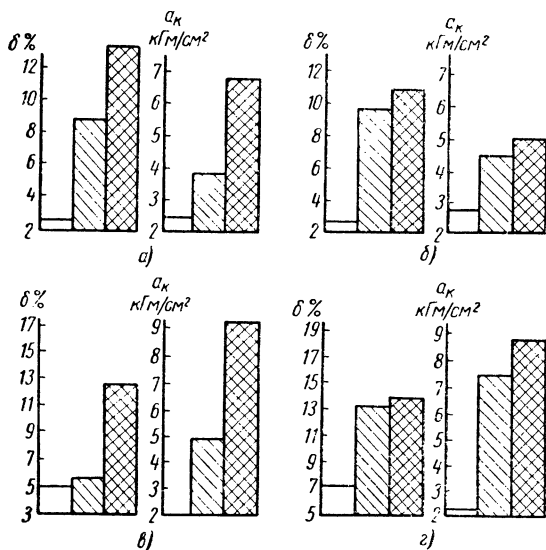
Что же касается цикла отжига, то он может быть проведен для отливок с исходной перлитной или перлитно-ферритной структурой (без свободных карбидов) с исключением этапов 2-го и 3-го. Это приводит к сокращению длительности и снижению стоимости отжига. Однако исследования этого вопроса [62], [63] свидетельствуют о том, что проведение отжига по изложенной выше схеме (этапы 1—6) способствует получению более высоких значений пластичности и вязкости.

В этой связи представляют интерес исследования, проведенные в ЦНИИТМАШ [64].

Химический состав чугуна в %					
C	Si	Mn	S	P	Mg
2,77	3,27	0,64	0,004	0,15	0,098
3,13	2,86	0,60	0,006	0,15	0,092
2,81	2,66	0,53	0,006	0,12	0,078
3,23	2,38	0,54	0,002	0,13	0,070

Данные по исследованию чугунов, химический состав которых приведен в табл. 37, дают возможность установить влияние кремния на свойства при различных видах термической обработки.

Были исследованы следующие режимы отжига: нагрев до  $720^{\circ}$ , выдержка 2 часа; нагрев до  $900^{\circ}$ ; выдержка 0,5; 2; 4; 16 час.; охлаждение с печью до  $720^{\circ}$ ; выдержка 2 часа. Дальнейшее охлаждение с печью до  $680^{\circ}$ , а затем на воздухе.



Фиг. 101. Изменение пластических свойств высокопрочного чугуна в зависимости от режима отжига и содержания кремния:

а — 2,66%; б — 2,38%; в — 2,86%; г — 3,27%.

На фиг. 101 приведены данные о влиянии кремния на пластические свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, подвергнутого отжигу<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Столбики: незаштрихованный — литое состояние, заштрихованный — одноступенчатый отжиг, двойная штриховка — двухступенчатый отжиг.

Основными выводами этого исследования являются следующие:

1. При ступенчатом отжиге (нагрев до  $900^{\circ}$  с выдержкой в течение 2 час., охлаждение с печью до  $720^{\circ}$  с выдержкой в течение 2—4 час.) ударная вязкость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, содержащего 0,12—0,15% Р, достигает 6—9  $\text{кгМ/см}^2$  (на образцах размерами  $10 \times 10 \times 55$  мм без надреза), т. е. значительно превышает ударную вязкость этого чугуна, полученную при других режимах термической обработки.

2. Изменение содержания кремния в пределах 2,6—3,2% не сказывается на ударной вязкости чугуна, подвергнутого термической обработке по указанному режиму; у чугуна с меньшим содержанием кремния (2,4%) получаются более низкие значения ударной вязкости. Это расходится с некоторыми литературными данными по исследованию низкофосфористого чугуна. Можно полагать, что в присутствии фосфора отрицательное влияние кремния на ударную вязкость чугуна сказывается слабее.

3. Важнейшим условием получения повышенной ударной вязкости является ферритная структура металлической основы.

4. Изменение относительного удлинения чугуна в зависимости от содержания кремния и режима термической обработки в чугунах с содержанием 2,6—3,3% Si подчиняется тем же закономерностям, что и изменение ударной вязкости.

5. Исследованные режимы и варианты термической обработки привели к снижению примерно на 15% показателей прочности при статическом растяжении по сравнению с литым состоянием.

6. Отношение предела текучести к пределу прочности в зависимости от химического состава чугуна (содержания кремния) и режимов термической обработки изменяются в пределах 0,7—0,8. Для литых углеродистых сталей (марок 25Л, 30Л, 35Л) после отжига это отношение равно 0,55—0,61.

7. При нагреве до  $900^{\circ}$  с увеличением выдержки от 0,5 до 16 час. зерна феррита укрупняются примерно с балла 7—8 до балла 5—6 (по шкале ГОСТ 5639-51), а с увеличением выдержки от 2 до 16 час. заметного улучшения свойств чугуна не отмечено.

Примеры микроструктур высокопрочного чугуна с шаровидным графитом после отжига показаны на фиг. 102 и 103.

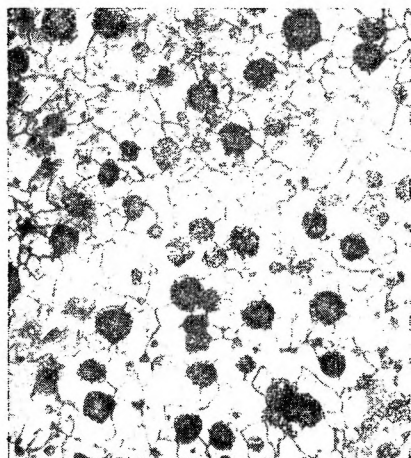
Характерным для структуры матрицы после отжига является феррит. Фиг. 103 иллюстрирует тормозящее влияние фосфора на процесс разложения эвтектоидного цементита. Несмотря на длительную выдержку, в структуре матрицы имеются остатки неразложившегося перлита, располагающегося вблизи включений фосфидной эвтектики.

Ниже приводятся режимы отжига отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, применяемые на отдельных заводах.

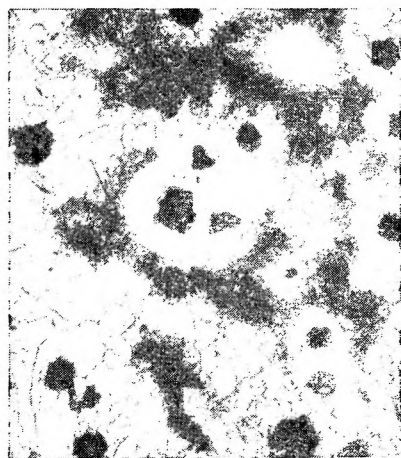
1. Для получения ферритной структуры матрицы в отливках применяют отжиг по режиму: нагрев до  $930^{\circ}$ ; выдержка 4 часа при

температуре  $930^{\circ}$ ; охлаждение  $2,5$  часа до температуры  $740^{\circ}$ ; при этой температуре выдержка  $4-7$  час.; затем охлаждение с печью до  $200^{\circ}$  в течение  $5$  час.

Феррито-перлитно-графитовую структуру в отливках получают после отжига по режиму: нагрев до  $720^{\circ}$ , затем выдержка  $2$  часа при температуре  $720^{\circ}$ ; дальнейший нагрев до  $850^{\circ}$  и выдержка при



Фиг. 102. Микроструктура чугуна после отжига.



Фиг. 103. Незрелый перлит вокруг включений фосфидной эвтектики в отожженном чугуне с шаровидным графитом.

этой температуре  $6$  час.; дальнейшее охлаждение до  $400^{\circ}$  в течение  $6,5$  час.

2. На другом заводе отжиг отливок весом  $1-5$  т проводят по следующему режиму: посадка в печь при температуре не выше  $150^{\circ}$ ; нагрев со скоростью  $100^{\circ}/\text{час}$  до температуры  $500^{\circ}$ , выдержка при этой температуре  $2$  часа; дальнейший нагрев со скоростью  $100^{\circ}/\text{час}$  до  $920-950^{\circ}$ . Выравнивание температуры  $1$  час; выдержка при  $920-950^{\circ}$  —  $3$  часа; охлаждение со скоростью  $30^{\circ}/\text{час}$  до  $730-740^{\circ}$ , затем выдержка  $4$  часа; охлаждение со скоростью  $80^{\circ}/\text{час}$  до  $450^{\circ}$ , дальнейшее охлаждение на воздухе.

в) **Нормализация.** Этот вид термической обработки является эффективным средством повышения такого важного эксплуатационного свойства отливок, как износостойкость. При этом повышается также предел прочности и обеспечивается повышенная однородность структуры.

Основными параметрами процесса нормализации являются: нагрев до  $950^{\circ}$ , выдержка  $2-3$  часа (выдержка увеличивается до  $5$  час. при наличии в исходной структуре свободного цемента) и охлаждение на воздухе. Для отливок сложной конфигурации заслуживает внимания практика снижения температуры до

860—880° при выдаче отливок навоздух. В этом случае после выдержки при максимальной температуре нагрева детали охлаждаются в печи до 860—880°, после чего охлаждаются на воздухе. Такой режим уменьшает внутренние напряжения и снижает опасность поводки и коробления деталей, что особенно важно для крупных отливок. Предупредить коробление и поводку во время выдержки при высокой температуре можно при помощи таких приспособлений, как специальные подставки, песчаные постели и пр., какие применяются при термической обработке крупных стальных отливок.

Нормализация обычно сопровождается отпуском, назначением которого является снятие и выравнивание напряжений, возникающих при охлаждении отливок на воздухе.

Наиболее существенным при нормализации является изменение структуры матрицы. Окончательным продуктом этого вида термической обработки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом является сорбитообразный перлит или сорбит. Иногда и после нормализации наблюдаются очень тонкие

оторочки феррита вокруг шаровидных включений графита (фиг. 104).

Показателем полноты процесса нормализации при металлографическом контроле является уничтожение структурно-свободного цемента (если такие включения были в исходной структуре), растворение включений феррита и переход пластинчатого перлита в сорбитообразный.

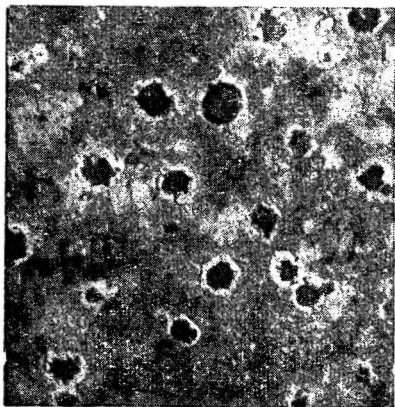
г) **Закалка.** Все известные для стали разновидности закалки — объемная, поверхностная, изотермическая — в принципе применимы и для отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Правда, возможности закалки ограничиваются габаритами и конфигурацией детали.

Важное значение для определения параметров закалки имеет, как известно, прокаливаемость. Имеющиеся данные свидетельствуют о повышенной прокаливаемости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом по сравнению со сталью.

Повышение содержания углерода сверх 3,5% вызывает резкое уменьшение прокаливаемости; кремний понижает, а марганец повышает прокаливаемость чугуна; фосфор незначительно ее уменьшает.

В табл. 38 приведены данные о влиянии отдельных легирующих элементов на прокаливаемость стали и чугуна с шаровидным графитом [65].



Фиг. 104. Микроструктура чугуна с шаровидным графитом после нормализации.

Материалы	Легирующие элементы						
	Mn	Mo	P	Cr	V	Si	Ni
Сталь углеродистая . . . . .	3,3	3,0	2,5	2,2	1,8	0,7	0,4
Высокопрочный чугуи с шаровидным графитом	0,54	1,1	2,8	1,9	0,43	0,2	0,24

Примечание. Увеличение абсолютного значения коэффициентов, приведенных в таблице, приводит к снижению прокаливаемости.

*Объемная закалка* находит ограниченное применение в связи с тем, что развивающиеся высокие внутренние напряжения при закалке в воде часто приводят к трещинам.

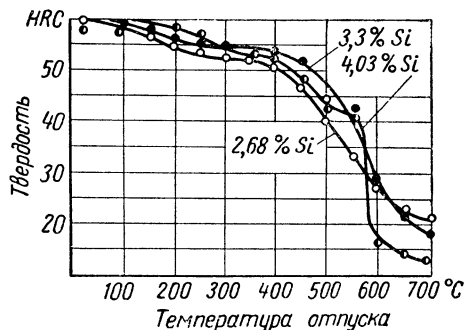
Температура нагрева под закалку зависит от содержания кремния. Для чугунов с содержанием 2—2,5% кремния температура составляет 880—900°, для чугунов с более высоким содержанием кремния — 900—920°.

При слишком высокой температуре нагрева под закалку получается крупноигольчатый мартенсит и значительное количество остаточного аустенита. Заниженная же температура нагрева под закалку приводит к получению структурно-свободного феррита.

Время выдержки при максимальной температуре для отливок с толщиной стенки 15—20 мм составляет 30 мин. С увеличением толщины стенки это время увеличивается из расчета 25 мин. на каждые дополнительные 10 мм. При определении общей длительности выдержки следует учесть время, необходимое на выравнивание структуры. Это время оказывается большим для чугунов с исходной ферритной структурой, чем для перлитных.

Как правило, после закалки отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом подвергаются отпуску. Влияние отпуска на твердость иллюстрируется фиг. 105. Как видно из данных этой фигуры, наибольшее снижение твердости закаленного чугуна наблюдается при температурах отпуска, превышающих 400°. Изменение твердости при отпуске закаленного чугуна является результатом изменений структуры.

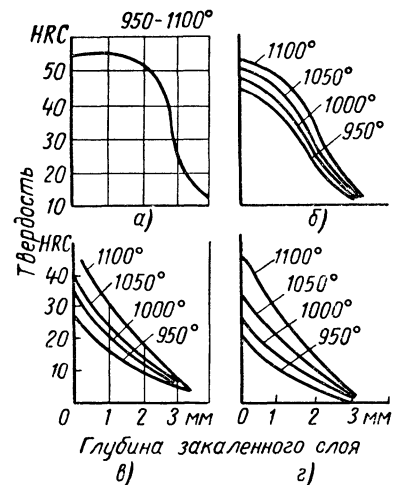
Выдержка при отпуске составляет: 1—2 часа при температуре 500—600° и 1—4 часа при 400°.



Фиг. 105. Изменение твердости при отпуске чугуна с шаровидным графитом.

Структура зернистого перлита с присущей ей повышенной пластичностью может быть получена отпуском при 720—700° закаленного чугуна.

**Поверхностная закалка.** Свойственные высокопрочному чугуну с шаровидным графитом пластичность и вязкость делают весьма перспективной возможность осуществить поверхностную закалку, позволяющую сочетать пластичную и вязкую сердцевину с прочным износостойким поверхностным слоем.



Фиг. 106. Зависимость между твердостью и глубиной закаленного слоя чугуна с шаровидным графитом при различных температурах закалки и исходных структурах.

Структура матрицы до закалки:  
 а — перлитная; б — перлитно-ферритная; в — феррито-перлитная; г — ферритная.

и перлитной структурой. Максимальная твердость закаленного слоя уменьшается с переходом к перлитно-ферритной, феррито-перлитной и ферритной структуре исходного (до закалки) чугуна.

2. Повышение температуры закалки приводит к увеличению твердости закаленного слоя.

3. Увеличение скорости нагрева под закалку снижает твердость закаленного слоя. Это снижение особенно сильно проявляется в чугунах с исходной ферритной структурой.

Как показано в работе [75], поверхностная закалка существенно повышает усталостную прочность чугуна с шаровидным графитом, особенно на надрезанных образцах, что иллюстрируется данными табл. 40.

**Изотермическая закалка.** Высокие значения прочности при значительном повышении износостойкости и умеренной пластичности получаются при изотермической закалке высокопрочного чугуна

Из многих работ, посвященных разработке режима поверхностной закалки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, ниже приводятся некоторые данные исследований, проведенных в ЦНИИТМАШ [66]. Поверхностная закалка производилась с индукционного нагрева. Исходная структура матрицы — перлитная, перлитно-ферритная, феррито-перлитная и ферритная. Скорость нагрева — 15, 25, 50 и 100 град/сек. Температура нагрева под закалку — 900 — 1150° с интервалом в 50°.

В табл. 39 приведена поверхностная твердость в зависимости от режима закалки и различной структуры матрицы высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (см. фиг. 106). Из приведенных данных следует:

1. Наибольшая твердость закаленного слоя, достигающая до HRC 60, получена при поверхностной закалке чугуна с шаровидным графитом и

Таблица 39

Структура	Скорость нагрева в град/сек	Температура нагрева под закалку в град.					
		900	950	1000	1050	1100	1150
Перлитная	10	48—55	55—60	53—60	49—56	46—54	—
	25	50—56	53—60	52—60	48—57	45—55	
	50	43—58	50—58	50—58	50—59	48—58	
	100	32—58	48—58	54—58	50—58	48—58	
Перлито-ферритная	10	42—48	46—54	52—57	50—56	48—56	—
	25	35—45	42—52	48—55	52—58	48—58	
	50	30—44	40—52	42—57	52—58	49—58	
	100	25—40	35—50	45—56	50—57	50—57	
Феррито-перлитная	10	17—24	27—39	30—43	40—52	48—57	48—59
	25	16—23	23—37	28—42	34—45	43—52	45—54
	50	10—22	15—32	23—38	32—42	35—48	40—52
	100	5—21	8—24	12—30	25—40	30—48	40—52
Ферритная	10	7—13	18—28	25—37	31—44	42—48	44—49
	25	1—10	10—20	17—30	26—39	39—26	40—47
	50	1—12	6—15	12—24	20—35	30—43	38—48
	100	1—10	3—13	5—17	14—29	24—37	37—44

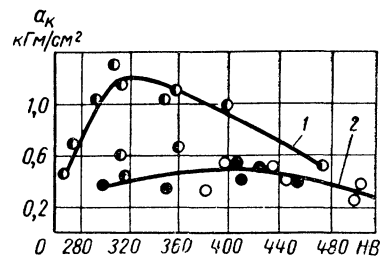
Таблица 40

Форма и диаметр образца в мм	Вид поверхностной обработки	Предел выносливости при изгибе	
		в кг/мм <sup>2</sup>	в %
Гладкие Ø 20	Шлифование	19,5	100*
То же	Закалка; нагрев токами высокой частоты	23,5	120
»	Обкатка роликами	23,2	119
»	Дробеструйный наклеп	22,7	116
Гладкие Ø 12	Шлифование	19,7	100
То же	Закалка; нагрев токами высокой частоты	27,7	140
»	Обкатка роликами	24,7	126
Надрезанные Ø 12	Шлифование	17,2	100
То же	Закалка; нагрев токами высокой частоты	34,5	200
»	Обкатка роликами	32,0	185

\* Предел выносливости шлифованных образцов в каждой группе принят за 100%.

с шаровидным графитом. Исходная структура матрицы высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, вообще говоря, может быть как перлитная, ферритная или иметь различные сочетания этих составляющих, так и содержать структурно-свободный цементит. В последнем случае элементом режима изотермической закалки является нагрев с соответствующей выдержкой для разложения структурно-свободного цементита.

Изотермическая закалка проводится по режиму: нагрев до 850—920°\*, выдержка 15—60 мин. Передача в ванну, нагретую до 300—350°, выдержка в ванне 1—2 часа.



Фиг. 107. Зависимость между твердостью и ударной вязкостью высокопрочного чугуна, подвергнутого изотермической закалке (кривая 1) и закалке с отпуском (кривая 2).

В результате изотермической закалки получается структура троостита и около 25% остаточного аустенита. Большое значение имеет однородность получаемой структуры, что достигается подбором оптимальных температур в соответствии с химическим составом чугуна.

Изотермическая закалка позволяет получить более высокие значения ударной вязкости, чем при обычном процессе улучшения, что следует из данных фиг. 107 [59].

Следует отметить наличие выраженного максимума для значений

ударной вязкости в зависимости от твердости изотермически закаленного чугуна.

**д) Химико-термическая обработка.** За счет различных видов химико-термической обработки можно значительно повысить свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, особенно такие, как износостойкость, коррозионная стойкость, способствующие увеличению срока службы деталей в эксплуатации.

**Азотирование** [67], [68], [73]. Проведенными исследованиями выявлен ряд особенностей как самого процесса азотирования высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, так и свойств азотированного слоя.

Важнейшими из этих особенностей являются:

1. Более высокая температура азотирования представляет возможность значительно сократить длительность процесса по сравнению с азотированием стали.

2. Хрупкость азотированного слоя в чугуне с шаровидным графитом появляется при значительно более длительной выдержке, чем в стали.

\* Эта температура повышается с увеличением содержания кремния.

3. Глубина азотированного слоя на чугуна оказывается бóльшей, чем у стали (при одинаковых условиях азотирования).

4. Значительная неоднородность твердости азотированного слоя уменьшается в случае предварительного (до азотирования) отжига чугуна на феррит.

Представление о твердости азотированного слоя в зависимости от температуры азотирования дает фиг. 108.

Микроструктура азотированного слоя выявляется в виде нетравящейся светлой зоны, отвечающей карбонитридной  $\epsilon$ -фазе [73], что подтверждается также рентгеновским анализом. Глубина распространения  $\epsilon$ -фазы не превышает 0,02—0,03 мм. Толщина слоя  $\epsilon$ -фазы возрастает с повышением температуры азотирования до 700°; с дальнейшим ростом температуры азотирования толщина этого слоя уменьшается.

Типичным примером успешного применения азотирования высокопрочного чугуна с шаровидным графитом являются описанные в литературе данные, относящиеся к зубчатым колесам [69] и коленчатым валам крупных дизелей [70].

Исходный чугун для зубчатых колес имел состав: 3,32%  $C_{\text{общ}}$ ; 2,86%  $C_{\text{граф}}$ ; 2,57% Si; 0,46% Mn; 0,09% P; 0,012% S; 0,049% Mg; 0,22% Ni; 0,005% Cr; 0,08% Cu.

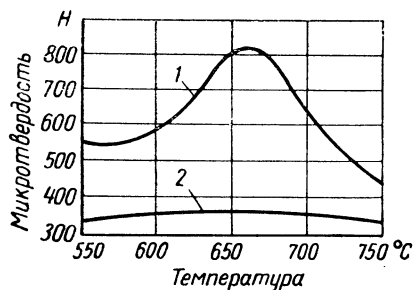
До азотирования чугун был подвергнут следующим видам термической обработки:

1. Отжигу для получения ферритной структуры по режиму: нагрев до 900°; выдержка 3 часа; охлаждение до 700°; выдержка 5 час.; охлаждение с печью до 600°, далее на воздухе.

2. Закалке с отпуском по режимам: нагрев до 870°; выдержка 2 часа; закалка в масле. Отпуск: а) нагрев до 650°, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе; б) нагрев до 580°, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе.

Азотирование проводилось при температуре 550° в ванне следующего состава: 35% KCN и 45% NaCN. Выдержка в ванне — 45 мин. и 3 часа.

Свойства азотированных чугунных зубчатых колес сравнивались со свойствами закаленных колес из хромомарганцевой стали, содержащей 5% Cr и 16% Mn (табл. 41). Для повышения свойств сердцевины рекомендуется использование легирования алюминием, хромом или ванадием азотируемого высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Полезным является также легирование молибденом в количестве около 0,5%.



Фиг. 108. Зависимость между микротвердостью и температурой азотирования при выдержке 1 час.:

1 — высокопрочный чугун; 2 — углеродистая сталь.

Характеристика материала		Поверхностная микротвердость по ПМТ-3		
		До азотирования	После азотирования	
			45 мин.	3 час.
Чугун с шаровидным графитом	После отжига	202	381	499
	После закалки с отпуском на зернистый перлит	260	396	358
	После закалки с отпуском	329	504	472
Хромомарганцевая сталь, закаленная		805		

Азотирование повышает на 20% усталостную прочность основания зуба и в 3 раза износостойкость зубчатых колес из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Примером азотирования ответственных крупных отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом являются коленчатые валы крупных дизелей.



Фиг. 109. Режим азотирования крупных коленчатых валов.

чугуна с шаровидным графитом и имели следующий химический состав: 3,4—3,8% С; 0,7—0,9% Мп; 1,8—2,0% Si; до 0,03% S; до 0,1% Р; 0,04—0,08% Mg [69].

До азотирования коленчатые валы для снятия напряжений подвергались термической обработке по режиму: нагрев до 560—580°, выдержка 10—12 час. До азотирования производилась окончательная механическая обработка шатунных шеек, а на коренных шейках оставлялся припуск по 0,10—0,15 мм на сторону.

Места, подлежащие предохранению от азотирования, покрывались содосульфатным жидким стеклом удельного веса 1,45. Предварительно эти места тщательно очищались от грязи и масляных пятен протиркой и последующей обработкой венской известью. Покрытие жидким стеклом производилось кистью дважды с промежуточной естественной сушкой в течение 4—5 час. Режим азотирования указан на фиг. 109.

В связи с отмеченным большим перепадом температур по зонам в дальнейшем этот перепад поддерживается в пределах 20—30° путем подогрева нижней зоны (нагреватели в печи разделены по высоте на три зоны).

В табл. 42 приводится основная характеристика азотированных валов.

Таблица 42

Элемент вала	Азотированный слой		
	Твердость НВ	Глубина в мм	Микроструктура
Шатунные шейки	425—470	0,4—0,55	Основная масса — эвтектид $\epsilon + \gamma$ !
Коренные шейки	470—500	0,4—0,55	На поверхности $\epsilon$ -фаза в виде нетравящейся белой полосы глубиной около 0,007 мм
Щеки <sup>1</sup>	335—360	0,2	

<sup>1</sup> Щеки до азотирования не подвергались механической обработке.

**Сульфидирование.** Этот процесс приводит к образованию на поверхности обрабатываемой детали слоя толщиной в 0,2—0,3 мм, способствующего значительному повышению износостойкости. Особое значение сульфидирования для чугуна заключается в том, что оно улучшает прирабатываемость и тем самым значительно повышает срок службы деталей в узлах трения. Сульфидирование производится преимущественно в соляных ваннах [71], [72].

Примерный состав ванны: 5,8% KOH; 5% FeS<sub>2</sub>; 0,85% NaCl; 0,35% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; остальное K<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>. Используются также среды газовые (H<sub>2</sub>S) и твердые (FeS, Fe<sub>2</sub>S).

Температура жидких ванн 540—560°, выдержка 2,5—3 часа.

**Хромирование.** Имеются данные о том, что хромирование в струе хлористого хрома (скорость струи 50 м<sup>3</sup>/мин) при 1000° в течение 5 час. приводит к повышению износостойкости в два раза по сравнению с нехромированным чугуном и на 30% по сравнению с гальваническим покрытием. Глубина хромированного слоя 0,014 мм. Хромиро-

вание можно также производить в электролите, содержащем хромистый ангидрид и серную кислоту. Температура электролита 50—55°, продолжительность хромирования 5—6 час., глубина слоя 0,11—0,15 мм.

*Эмалирование.* Этому виду поверхностной обработки подвергаются отливки с исходной ферритно-перлитной или перлитной структурой с целью повышения стойкости в агрессивных средах. Основной областью применения является химическая аппаратура.

Для нанесения эмали отливки подвергаются обезуглероживанию на глубину 0,2—0,3 мм, путем отжига в окислительной среде.

---

## **ХАРАКТЕРНЫЕ ВИДЫ БРАКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ И МЕРЫ БОРЬБЫ С НИМ**

Практика литейных цехов показывает, что при отливке деталей из чугуна с шаровидным графитом обнаруживаются специфические виды литейных дефектов, отличные от обычного серого чугуна.

К числу таких дефектов можно отнести следующие: 1. Смешанная структура шаровидного и пластинчатого графита. 2. Черные пятна. 3. Усадочные раковины и усадочная пористость. 4. Горячие и холодные трещины. 5. Газовая подкорковая пористость.

### **1. СМЕШАННАЯ СТРУКТУРА ШАРОВИДНОГО И ПЛАСТИНЧАТОГО ГРАФИТА**

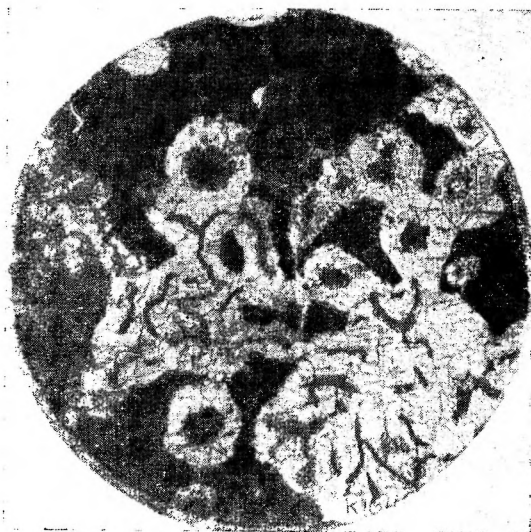
Многочисленные исследования показывают, что высокие механические свойства чугуна могут быть гарантировано получены в тех случаях, когда графит имеет шаровидную форму. В тех же случаях, когда наряду с шаровидным графитом в структуре чугуна имеется и пластинчатый графит, механические и пластические свойства чугуна, как правило, снижаются и поэтому такая смешанная структура графита является крайне нежелательной.

Появление смешанной структуры графита связано с недостаточным содержанием остаточного магния в чугуне. Известно, что полностью шаровидная структура графита в чугуне получается только в том случае, когда остаточное содержание магния в чугуне не ниже 0,03%. При меньшем содержании остаточного магния в отливках получается смешанная либо пластинчатая форма графита.

Пониженное содержание остаточного магния в чугуне может оказаться либо вследствие недостаточного количества введенного магния, либо вследствие очень длительной выдержки жидкого чугуна в ковше после обработки его магнием. В последнем случае магний, находясь в газообразном состоянии, довольно быстро испаряется и остаточное его содержание получается недостаточным для образования шаровидного графита.

В зависимости от того, сколько графита получилось шаровидной и сколько пластинчатой формы, механические свойства чугуна могут иметь различные значения.

В качестве примера приведем чугун, имеющий смешанную структуру графита и следующий химический состав: 3,35% С; 3,68% Si; 0,151% Р; 0,009% S; 0,015% Mg. Механические свойства такого чугуна были следующие: предел прочности при растяжении 32,5—33,6 кГ/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение 0,4—0,6% (фиг. 110).



Фиг. 110. Смешанная структура графита.  $\times 100$ .

Часто при достаточно высоких показателях по пределу прочности при растяжении получают низкие показатели по удлинению. Такое явление наблюдается в тех случаях, когда при полностью шаровидной форме графита в структуре металлической основы обнаруживается значительное количество цементита. В этом случае при величине предела прочности при растяжении, равном 55 кГ/мм<sup>2</sup>, величина удлинения составила всего 0,2% при твердости *HV* 277.

Для получения графита полностью шаровидной формы необходимо соблюдение следующих условий:

а) Количество вводимого в чугун магния должно определяться с учетом химического состава чугуна, особенно содержания серы в исходном чугуне. Чем больше содержание серы, тем большее количество магния вводится в чугун.

б) При определении количества вводимого магния необходимо учитывать принятый способ обработки чугуна магнием. При вводе магния в открытые ковши количество магния увеличивается по срав-

нению с вводом магния в автоклавы или герметизированные ковши.

в) Количество вводимого магния зависит от толщины тела отливки: чем больше толщина стенки детали, тем большее количество магния следует вводить в чугун.

г) Расчетное количество магния должно точно соответствовать количеству обрабатываемого чугуна. Поэтому жидкий чугун и магний должны взвешиваться.

д) Обработанный магнием чугун должен немедленно заливаться в формы во избежание испарения магния и получения графита пластинчатой формы.

## 2. ЧЕРНЫЕ ПЯТНА

В результате обработки магнием расплавленного чугуна в расплаве появляется большое количество неметаллических включений, которые, попадая в литейную форму, образуют особый вид дефектов в отливках, называемый «черными пятнами».

Наличие черных пятен в отливках является крайне нежелательным явлением, так как они значительно снижают показатели механических свойств чугуна и являются причиной брака отливок при их гидротестировании.

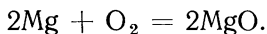
Исследования изломов отливок показали, что черные пятна располагаются чаще всего на горизонтальных поверхностях и в верхних частях отливок или под стержнями. Это указывает на то, что рассматриваемые включения имеют меньший удельный вес в сравнении с чугуном и стремятся всплыть на поверхность.

Серные отпечатки, снятые с темплетов, вырезанных из отливок разного сечения и конфигурации, неизменно показывают увеличение содержания серы в верхних частях отливки.

Исследования состава неметаллических включений, образующих черные пятна, показали, что они представляют собой сульфиды, фосфиды, нитриды, силициды и окись магния.

Сульфид магния ( $MgS$ ) образуется по реакции  $Mg + S = MgS$  и встречается наиболее часто и в большом количестве. Наличие его зависит прежде всего от содержания серы в чугуне, так как магний прежде всего реагирует с серой.

Окись магния ( $MgO$ ) образуется по реакции



Температура плавления окиси магния  $2642^\circ$ , а температура кипения  $2800^\circ$ . Фосфид магния ( $Mg_3P_2$ ) образуется по реакции



Нитрид магния ( $Mg_3N_2$ ) диссоциирует при температуре  $1500—2200^\circ$ , а силицид магния ( $Mg_2Si$ ) — при температуре  $1070^\circ$ .

В табл. 43 [76] приведены данные об изменении состава шлака после обработки чугуна магнием и ферросилицием.

Состав шлака	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CuO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	Основность шлака
ходного чугуна	78,00	0,093	6,00	1,44	8,76	2,17	0,054	0,12
сле обработки магнием	43,60	0,180	8,50	1,40	5,44	8,26	0,090	0,41
ходного чугуна	79,60	0,93	3,00	0,72	8,37	2,17	0,090	0,74
сле обработки магнием	11,40	0,180	5,00	1,48	1,88	12,67	0,410	0,60
сле ввода ферросилиция	35,00	0,180	6,00	1,92	3,76	15,03	0,400	0,65
ходного чугуна	67,48	0,030	0,92	3,97	4,00	2,19	0,030	0,09
сле обработки магнием	25,04	0,070	0,60	2,08	2,60	14,01	0,530	0,66
сле ввода ферросилиция	52,84	0,080	0,50	0,79	6,70	8,54	0,960	0,18
ходного чугуна	70,14	0,070	1,03	1,82	4,20	1,57	0,070	0,06
сле обработки магнием	23,56	—	0,50	2,47	3,20	14,59	0,800	0,74
сле ввода ферросилиция	50,25	0,050	0,46	0,92	4,20	7,13	0,800	0,14

Данные таблицы показывают, что после ввода магния резко увеличивается содержание серы в шлаке. Последующее введение ферросилиция не меняет содержания серы.

Точно также резко увеличивается содержание MgO. Образующийся шлак вследствие большой его вязкости трудно отделяется от металла.

Содержание кислорода в зонах отливки с черными пятнами увеличивается в 100—300 раз, водорода в 2,5—10 раз, а азота в 3—20 раз.

С увеличением остаточного содержания магния количество черных пятен в отливках возрастает.

Если остаточное содержание магния в чулуне превышает 0,1%, то в отливках, как правило, образуется большое количество черных пятен, так как процесс окисления в этом случае проходит наиболее интенсивно и вследствие этого образуется большое количество окислов магния, образующих пленки.

Количество черных пятен в отливках находится в прямой зависимости и от содержания серы в чулуне.

При низком содержании серы в исходном чулуне порядка 0,03% количество черных пятен в отливках получается сравнительно не большое. По мере увеличения содержания серы в исходном чулуне количество черных пятен в отливках возрастает и при содержании серы 0,08—0,12% и выше количество черных пятен в отливках достигает наибольшей величины.

Углерод, марганец и фосфор не оказывают существенного влияния

и к кремнию, хотя по некоторым данным с повышением содержания кремния количество неметаллических включений в отливках увеличивается.

Количество и распределение черных пятен в отливках в значительной мере зависит от сечения отливки. В отливках с тонкими стенками черные пятна располагаются по всему сечению отливки, так как вследствие значительной скорости охлаждения неметаллические включения не успевают всплыть вверх и остаются в теле отливки.

В толстостенных отливках неметаллические включения имеют возможность всплыть в верхнюю часть отливки, вследствие малой скорости охлаждения последней. Это особенно хорошо заметно в очень массивных отливках.

На фиг. 111 показан серный отпечаток, снятый с разрезанной отливки шабота. Как видно из фигуры, в верхней части отливки имеется большое скопление неметаллических включений. Непосредственно под прибылью неметаллических включений и скопления серы совершенно не обнаружено.

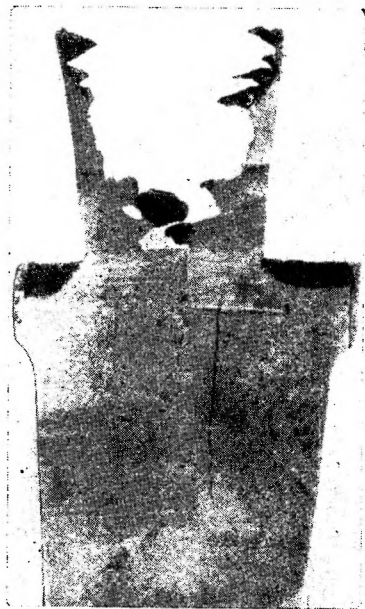
Основными мероприятиями по борьбе с черными пятнами в отливках являются следующие:

а) Количество вводимого магния в чугун должно быть минимальным, но достаточным для того, чтобы образовался графит шаровидной формы.

б) Исходное содержание серы в чугуне должно быть по возможности низким. При исходном содержании серы в чугуне менее 0,03% черные пятна в отливках, как правило, не образуются или образуются в значительно меньшем количестве, чем при большем содержании серы. Для понижения содержания серы в чугуне перед его обработкой магнием необходимо производить обессеривание чугуна, применять шихтовые материалы с низким содержанием серы и в частности лом чугуна и литники от отливок, залитых чугуном, обработанным магнием.

в) Необходимо производить тщательную очистку чугуна от шлака на желобе вагранки, в ковше и в литниковых каналах.

г) Температура чугуна на желобе вагранки должна быть не ниже 1420—1450°.



Фиг. 111. Серный отпечаток с отливки шабота.

е) После обработки чугуна магнием рекомендуется производить выдержку чугуна в ковше или литниковой чаше (если позволяет температура чугуна) с тем, чтобы неметаллические включения имели возможность всплыть на поверхность.

ж) Необходимо проводить мероприятия, направленные на изменение физико-химических свойств шлака и металла за счет повышения межфазного натяжения на границе шлак — металл. С этой целью рекомендуется вводить в чугун криолит  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ .

При обработке чугуна криолитом последний быстро расплавляется и взаимодействует с тугоплавкими соединениями. В результате взаимодействия криолита с жидким чугуном резко увеличивается содержание серы и углерода в шлаке. В табл. 44 приведены данные об изменении содержания углерода и серы в шлаке после обработки его криолитом [77].

Таблица 44

Содержание в %			
Углерод		Сера	
После обработки магнием	После обработки магнием и криолитом	После обработки магнием	После обработки магнием и криолитом
3,54	12,07	0,752	1,68
4,04	8,56	0,392	1,46
3,98	11,23	0,14	0,47
4,92	16,0	0,08	0,48

По данным В. М. Королькова для нейтрализации вредных примесей необходимо вводить в чугун 0,5—1,0% криолита. При введении большего количества криолит действует как десфероидизатор.

Обработанный криолитом чугун имеет весьма жидкоподвижный шлак; при этом удельный вес шлака уменьшается вследствие отделения железа от шлака и перехода его в чугун.

Криолит можно помещать на дно ковша, заполняемого чугуном, обработанным магнием.

При обработке чугуна магнием в герметизированных ковшах, как показали опыты В. Т. Лисицына, криолит необходимо загружать в стаканы вместе с магнием. В этом случае количество вводимого криолита значительно снижается, составляя 0,25% от веса обрабатываемого чугуна, а эффективность его значительно повышается.

Во избежание попадания жидкого шлака в литейную форму перед заливкой форм производят сгущение шлака покрытием поверхности чугуна сухим кварцевым песком или битым стеклом.

Применение криолита повышает стоимость чугунного литья на 2—3 руб. на 1 т, однако это удорожание литья быстро окупается, вследствие снижения процента брака литья по черным пятнам.

### 3. УСАДОЧНЫЕ РАКОВИНЫ И УСАДОЧНАЯ ПОРИСТОСТЬ

Усадка жидких металлов и сплавов, происходящая в жидком состоянии и в процессе кристаллизации, сопровождается появлением в отливках литейных дефектов в виде усадочных раковин или усадочной пористости.

По вопросу о причинах большой склонности чугуна с шаровидным графитом к образованию усадочных раковин нет единой точки зрения.

По нашему мнению, большая склонность чугуна с шаровидным графитом к образованию усадочных раковин объясняется тем, что выделение графита в нем происходит не только в процессе кристаллизации, но и в твердом состоянии.

Поэтому в тот момент, когда образуется внешняя корка отливки, в ней происходит расширение, связанное с выделением графита, внешний объем отливки увеличивается и объем усадочной раковины внутри отливки соответственно увеличивается. Происходящее увеличение объема отливки вследствие выделения графита при эвтектической кристаллизации не может полностью компенсировать образовавшуюся усадочную раковину. Выделение графита, происходящее в полностью затвердевших внутренних частях отливки, не оказывает заметного влияния на уменьшение объема усадочной раковины, поскольку формирование усадочной раковины к этому времени уже закончилось.

Характер протекания усадки в значительной мере зависит от химического состава чугуна. В чугуне эвтектического состава образуются преимущественно сосредоточенные усадочные раковины. В чугуне доэвтектического состава образуются, как правило, усадочная пористость, которая по мере приближения чугуна к эвтектическому составу уменьшается, а объем усадочных раковин увеличивается.

При кристаллизации чугуна доэвтектического состава образуются сильно развитые дендриты аустенита, между ветвями которых остается изолированная жидкость, при затвердевании которой в условиях отсутствия доступа жидкого чугуна для компенсации усадки, образуется усадочная пористость.

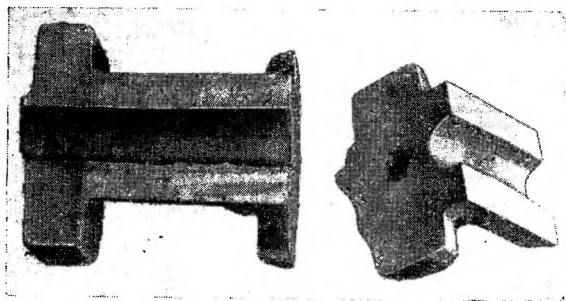
Усадочная пористость особенно хорошо видна даже невооруженным глазом в центральных частях цилиндрических отливок, так как образующиеся на наружных частях отливки дендриты, проникая к центру, становятся менее разветвленными, а при взаимной их встрече образуются значительные не полностью замкнутые пространства между дендритами, дающие возможность жидкому чугуну стекать вниз, обнажая тем самым ветви дендритов.

Отсутствие прибылей на отливках или наличие прибылей недостаточных размеров неизменно приводит к образованию усадочных раковин в отливках.

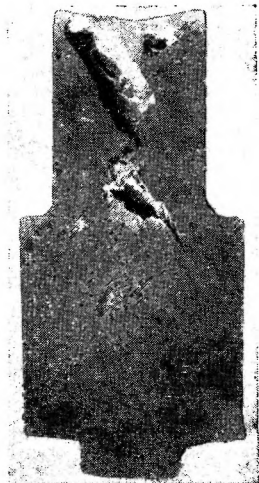
На фиг. 112 показана отливка со сплошным цилиндрическим отверстием и утолщением в средней части. При заливке такой детали

чугуном, обработанным магнием, в массивной части отливки, как правило, появлялась усадочная раковина.

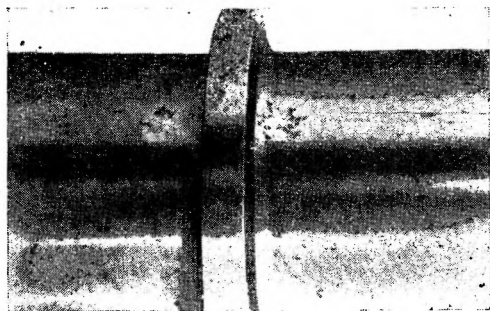
При наличии прибылей недостаточного размера усадочная раковина, образующаяся в прибыли, проходит глубоко в тело отливки и приводит к браку литья (фиг. 113).



Фиг. 112. Усадочная раковина в отливке из чугуна с шаровидным графитом.



Фиг. 113. Усадочная раковина в отливке валка из чугуна с шаровидным графитом.



Фиг. 114. Усадочная пористость в отливке коленчатого вала.

расположенная в месте подвода металла к отливке, образовалась вследствие недостаточного размера боковой прибыли, питавшей отливку.

Приведенные примеры и многие другие указывают на то, что при разработке технологического процесса получения деталей из чугуна с шаровидным графитом необходимо уделять большое внимание выбору типа и размеров прибылей.

При создании литых конструкций и разработке технологического процесса отливки деталей необходимо предусматривать следующие мероприятия:

а) конструкция отливки должна обеспечить условия для создания направленного затвердевания отливки;

б) располагать модели так, чтобы имелась возможность установить прибыли на наиболее массивные части отливки;

в) заливать отливки чугуном эвтектического или близкого к эвтектическому составу;

г) производить заливку форм чугуном, имеющим сравнительно высокую температуру;

д) подводить металл в массивные части отливки, снабженные прибылями, либо в саму прибыль.

е) при отливке цилиндрических и подобных им деталей, имеющих значительную высоту и заливаемых вертикально, прибыль рекомендуется устанавливать так, чтобы она являлась продолжением тела отливки; в этом случае металл следует подавать в форму через верхнюю дождевую литниковую систему;

ж) при большой высоте отливки подвод металла к отливке следует осуществлять сифоном с верхней дождевой литниковой системой;

з) с целью уменьшения размеров прибылей и повышения выхода годного рекомендуется применение экзотермических смесей для изготовления специальных вставок, устанавливаемых в местах расположения прибылей.

В зависимости от размеров, веса и конфигурации отливок, а также от принятого способа формовки, прибыли можно применять прямые открытые, закрытые, боковые, без искусственного и с искусственным давлением.

Во избежание образования усадочной пористости рекомендуется применять холодильники, которые, увеличивая скорость охлаждения отливки в местах их установки, способствуют уменьшению пористости. Применение прибылей в этом случае не дает положительных результатов, поскольку, несмотря на наличие металла в прибыли, поступление его к местам образующейся усадочной пористости оказывается невозможным вследствие очень узких каналов между ветвями дендритов.

Применяя холодильники, следует учитывать, что в местах непосредственного соприкосновения холодильников с отливкой и вблизи от холодильника в структуре чугуна образуется значительное количество цементита, для разложения которого необходимо отливки подвергать высокотемпературному отжигу с нагреванием отливок до  $950^{\circ}$ . Если отливка по техническим условиям должна проходить термическую обработку (отжиг или нормализацию), то процесс разложения цементита не требует дополнительной термической обработки. В тех же случаях, когда отливки не проходят термическую обработку, необходимо выбирать требуемую толщину холодильников и применять соответствующие обмазки во избежание отбела отливок.

#### 4. ГОРЯЧИЕ ТРЕЩИНЫ

Как известно, горячие трещины в отливках образуются в период кристаллизации при температуре, близкой к температуре солидуса, когда в сплаве имеются твердая и частично жидкая фазы.

В это время сплав имеет очень низкую прочность, малую пластичность и достаточны небольшие растягивающие усилия, чтобы вызвать образование трещин. Даже сравнительно небольшое торможение линейной усадки в этот момент может привести к появлению трещин.

В связи с этим большое значение приобретает изучение характера протекания линейной усадки в период кристаллизации сплава, точнее в тот момент, когда начинает проявляться линейная усадка и до полного охлаждения отливки.

Образование горячих трещин зависит от величины предудочного расширения, величины и скорости протекания доперлитной линейной усадки и температуры, при которой эти процессы происходят.

Отсутствие предудочного расширения или небольшая его величина, при прочих равных условиях, повышает склонность сплава к образованию горячих трещин.

Поэтому углеродистая сталь, не имеющая заметного предудочного расширения, имеет большую склонность к образованию горячих трещин, чем серый чугун и особенно чугун с шаровидным графитом, в которых предудочное расширение, связанное с выделением графита, имеет место.

Значительная величина и бóльшая скорость протекания доперлитной линейной усадки увеличивают склонность к образованию горячих трещин. Поэтому, углеродистая сталь, имеющая большую величину доперлитной усадки и большую скорость ее протекания, имеет значительно бóльшую склонность к образованию горячих трещин, чем серый чугун и чугун с шаровидным графитом, в которых величина доперлитной усадки и скорость ее протекания сравнительно невелики.

Линейная усадка углеродистой стали быстро возрастает сразу же после заливки литейной формы, а у серого чугуна и чугуна с шаровидным графитом увеличивается крайне медленно, либо происходит не усадка, а расширение отливки.

В первом случае, при температурах, когда сплав имеет незначительную прочность, торможение усадки вызывает появление растягивающих усилий и как следствие — образование горячих трещин.

В чугуне с шаровидным графитом вначале происходит не усадка, а расширение, усадка же начинается позднее при более низких температурах, когда сплав приобрел уже достаточную прочность и пластичность, способные противостоять силам, развивающимся при усадке. При таком характере протекания литейной усадки сплав обладает меньшей склонностью к образованию горячих трещин.

Кривая усадки чугуна, обработанного магнием без дополнительной обработки ферросилицием, в структуре которого имеется значительное количество структурно-свободного цемента, имеет сходство с кривой усадки углеродистой стали, поэтому такой чугун обладает большой склонностью к образованию горячих трещин.

Для борьбы с горячими трещинами необходимо обеспечить свободное протекание линейной усадки в области высоких температур (в твердо-жидком состоянии); не допускать в структуре металлической основы чугуна наличия структурно-свободного цемента. При конструировании отливок необходимо стремиться к тому, чтобы отливка имела равномерную толщину стенки. Охлаждение отливок должно производиться так, чтобы была обеспечена равномерность охлаждения в стенках отливки различной толщины.

## 5. ХОЛОДНЫЕ ТРЕЩИНЫ

Образование холодных трещин в отливках из чугуна с шаровидным графитом связано непосредственно с повышенными остаточными напряжениями, возникающими в отливках при их охлаждении.

Холодные трещины образуются в отливках в тех случаях, когда напряжения, развиваемые в интервале упругих деформаций, достигнут величины предела прочности материала.

Чем больше напряжения и чем меньше прочность и пластичность материала, тем более вероятно образование холодных трещин.

При охлаждении отливок, имеющих массивные и тонкие части, усадке массивных частей препятствуют более тонкие части, вследствие чего как в массивных, так и в тонких частях возникают напряжения, при этом в более массивных частях возникают растягивающие, а в более тонких частях — сжимающие напряжения.

При механическом торможении усадки возникают растягивающие напряжения. Склонность сплава к образованию холодных трещин зависит от состава сплава, который определяет величину модуля упругости, теплопроводность, коэффициент линейного расширения и механические свойства.

На образование холодных трещин оказывает влияние содержание графита и форма графитовых включений, поскольку от этого зависят прочностные и тепло-физические свойства чугуна. Чем больше графита в чугуне, тем ниже величина модуля упругости и тем больше теплопроводность. Таким образом, графитовыделение в чугуне способствует уменьшению напряжений и препятствует образованию холодных трещин.

Известно, что белый чугун, применяющийся для отливок при производстве ковкого чугуна, обладает большой склонностью к образованию холодных трещин, что связано с большими значениями модуля упругости, а также с меньшей, по сравнению с серым чугуном, теплопроводностью. Кроме того, белый чугун не обладает пластичностью при низких температурах.

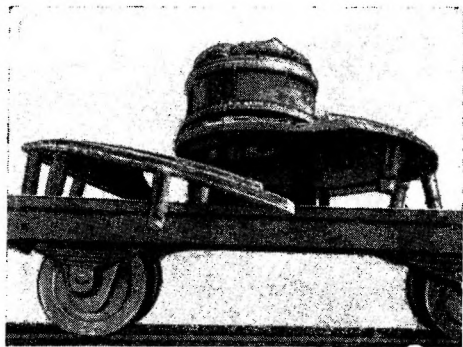
В отливках из серого чугуна холодные трещины образуются значительно реже, чем в белом чугуне.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом имеет повышенную склонность к образованию холодных трещин, которая связана

с повышенными напряжениями, возникающими в отливке вследствие высокого модуля упругости и низкой теплопроводности этого чугуна.

При отливке деталей, имеющих резкую разницу в толщинах стенок, когда имеют место большие градиенты температур в тонкой и толстой частях отливки, холодные трещины образуются чаще всего.

На фиг. 115 показана отливка торцевой стенки углеразмольной мельницы весом 6 т, разрушившаяся под действием литейных напряжений.



Фиг. 115. Отливка, разрушившаяся под влиянием литейных напряжений.

Так как холодные трещины образуются в отливках под влиянием остаточных напряжений, то все мероприятия, направленные на уменьшение напряжений в отливках, будут способствовать уменьшению холодных трещин. При этом особое внимание следует обращать на уменьшение термических напряжений, так как именно они, в большинстве случаев, являются причиной образования холодных трещин.

Для уменьшения холодных трещин необходимо: выбирать чугун такого состава, чтобы его теплопроводность была максимальной; конструировать отливки с равномерной толщиной стенок; подводить металл к отливке таким образом, чтобы он протекал медленнее по тонким частям отливки с расчетом выравнивания температур в тонких и толстых частях. Массивные части отливок должны охлаждаться с большей скоростью путем установки на них соответствующих холодильников.

## 6. ГАЗОВАЯ ПОДКОРКОВАЯ ПОРИСТОСТЬ

При заливке чугуна, обработанного магнием, в сырые формы под поверхностью отливок часто образуются мелкие газовые раковины. Эти дефекты, по-видимому, являются результатом взаимодействия растворенного в жидком чугуне магния с влагой, содержащейся в формовочной смеси и с кислородом воздуха, находящимся в полости литейной формы.

По мнению некоторых авторов, газовую пористость в отливках из чугуна с шаровидным графитом можно избежать путем заливки в сухие формы, в кокили и выдержки чугуна после обработки магнием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мильман Б. С., Сверхпрочный чугун со сфероидальным графитом в литой структуре, «Вестник машиностроения» № 12, 1959.
2. Френкель Я. И., Кинематическая теория жидкостей, Изд-во АН СССР, 1945.
3. Гиршович Н. Г., Чугунное литье, Metallurgizdat, 1948.
4. Рыжиков А. А., Теоретические основы литейного производства, Машгиз, 1954.
5. Берг П. П., Справочник машиностроения, т. IV, Машгиз, 1947.
6. Бочвар А. А., Metallovedenie, Metallurgizdat, 1954.
7. Нехендзи Ю. А., Стальное литье, Metallurgizdat, 1948.
8. Бидуля П. Н., Литейное производство, Машгиз, 1954.
9. Спасский А. Г., Основы литейного производства, Metallurgizdat, 1951.
10. Гуляев Б. Б., Затвердевание и неоднородность стали, Metallurgizdat, 1950.
11. Курнаков Н. Н., Тронева М. Я., О жидкотекучести железных сплавов, Изв. СФХА, 20, Изд-во АН СССР, 1950.
12. Briggs C. W., Metals Handbook, 1948.
13. Корольков А. М., Литейные свойства металлов и сплавов, Изд-во АН СССР, 1960.
14. Ключнев Н. И., Литейные свойства чугуна со сфероидальным графитом, Сб. «Высокопрочный чугун со сфероидальным графитом», Машгиз, 1953.
15. Piwowarsky E., Stand, Entwicklung und Aussichten von Grauguss mit kugelförmiger Graphitbildung, «Neue Giesserei» N 4, 1950.
16. Croft N., Producing ductile cast iron, «Iron and Steel» N 2, 1951.
17. Rehder I., Canadian Metals, V. 13, N 5, 1952.
18. Gries H., Fünf Jahre Kugelgraphitcisen im praktischen Betrieb, «Konstruktion» werkstoffe versuchswesen N 4, 1956.
19. Dunphy R., Askerlind C., Pellini W., Solidification, feeding characteristics of gray and nodular eiron, «Foundry», V. 82, N 6, 1954.
20. Ващенко К. И., Софрони Л., Магниевый чугун, Машгиз, 1960.
21. Derg G., Depkidation in production of nodular cast iron, «Foundry» N 4, 1951.
22. Ключнев Н. И., Стрижов Г. С., Исследование остаточных литейных напряжений в высокопрочном чугуне, «Metallovedenie и обработка металлов» № 1, 1957.
23. Мильман Б. С., Цыпин И. О. и др., Сб. «Высокопрочный чугун с шаровидным графитом», Машгиз, 1955.
24. Степин П. И., Получение высокопрочного вязкого чугуна, Сб. «Metallovedenie и современные методы термической обработки чугуна», Машгиз, 1955.
25. Цыпин И. О., Син М. К., Бложко Н. К., Чугуноплавильная установка ЦНИИТМАШ, Инф. письмо № 25, ОНТИ, 1959.
26. Дудник А. А., Ухабин Г. А., Коленчатый вал автомобиля «Волга», «Литейное производство» № 5, 1959.
27. Горшков А. А. и др., Коленчатые валы для дизельных тракторных двигателей из магниевого чугуна, «Литейное производство» № 11, 1958.
28. Солдатенко В. И., Технология отливки коленчатых валов из магниевого чугуна, для двигателей тепловозов, Изд-во ЦИТЭИН, 1959.

29. К в а с м а н М. Г., Т у н и к А. А., Б е г у н Б. Е., Отливка крупных коленчатых валов дизелей, «Литейное производство» № 10, 1960.
30. G r i e s H., Aus der Praxis des Sphärogusses, «Giesserei» N 4, 1953.
31. O t á h a l V., Provozni výroba tvárné litiny pod tlakem, «Slévarenství» N 1, 1955.
32. Ш а п р а н о в И. А., Ш а б л и н с к и й В. Б., П е т р о в а Э. В., Автоматизированная установка для введения магния в жидкий чугун, «Литейное производство» № 6, 1961.
33. М и л ь м а н Б. С., С т р и ж о в Г. С. и др., Авторское свидетельство, № 110523.
34. M o r r o g h H., G r a n t I. W., Nodular Cast Irons, Their Production and Properties, «Foundry Trade Journal», V. 85, N 1662—65, 1948.
35. M o r r o g h H., W i l l i a m s W. I., The Production of Nodular Graphite Structures in Cast Iron, «Journal of the Iron and Steel Institute», V. 158, p. 3, 1948.
36. М и л ь м а н Б. С., П о п о в а Н. Ю., Изыскание новых методов получения чугуна с шаровидным графитом, «Литейное производство» № 5, 1961.
37. I h i n g H. K., New Nodular Iron Process, Transactions of American Society for Metals V. XLIX, 1957.
38. H l o u š e k Č., Výroba tvárné litiny očkováním šedé litiny Solemi, «Slévarenství» N 10, 1959.
39. Ш а п р а н о в И. А., Г е т ь м а н А. А., Литниковые системы и прибыли для отливок из магниезового чугуна, Изд-во ЛДІІТП, 1960.
40. К л о ч н е в Н. И., Ф и к с е н Н. В., Опыт внедрения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом на Ново-Краматорском заводе тяжелого машиностроения, Изд-во АН СССР, ВИИИТИ, 1959.
41. V i s h o p H. F., A s k e r l i n d C. G., Dimensioning of Risers For Nodular Iron Castings, «Foundry» N 12, 1956.
42. В ы ш е м и р с к и й М. М., Производство отливок из высокопрочного чугуна в небольших литейных цехах, Сб. «Технологичность литых деталей», ЛОВИТОЛ, Машгиз, 1953.
43. К л о ч н е в Н. И., С у х а р е в А. М., Применение экзотермических смесей в производстве отливок из чугуна с шаровидным графитом, «Литейное производство» № 1, 1959.
44. T i m m e r b e i l H., Über die Verwendung von wärmespendenden Trichter — einsätzen beim Gusseisen mit Kugelgraphit, «Giesserei» N 20, 1954.
45. P i a s k o w s k i I., I a p k o w s k i A., Zeliwo sferoidalne, P. W. T., 1957.
46. Р о т е н б е р г М. И., С о л д а т е н к о В. И., Отливка тепловозных коленчатых валов из магниезового чугуна, «Литейное производство» № 6, 1959.
47. С т е п и н П. И., Зарубежная практика отливки автомобильных коленчатых валов, «Литейное производство» № 3, 1958.
48. З а х а р о в В. А., Д о к у к и н В. И., Магниевый чугун в автомобилестроении, «Литейное производство» № 4, 1961.
49. Б е ш л ы к А. С., Опыт отливки прокатных валков из чугуна, обработанного магнием, Сб. «Получение отливок из высокопрочного чугуна», Изд-во АН СССР, 1955.
50. К р и в о ш е е в А. Е., Литые валки, Metallurgizdat, 1957.
51. П и с а р е н к о Г. А., Ф и л и п п о в А. С., Отливки металлургического оборудования из чугуна с шаровидным графитом, Metallurgizdat, 1960.
52. Н и к о л а е н к о Е., Будущее рождается сегодня, Одесское изд-во, 1960.
53. С а м а р и н А. А., М и р о н е н к о А. П., Г а л а й к о Р. И., Способы ввода магния и свойства высокопрочного чугуна, Вторая научно-техническая конференция по чугунному листу и получению отливок из магниезового чугуна в механизированных кокилях, Тезисы докладов, Изд-во ИТО Машпром, 1958.
54. Н и к о л а е н к о Е. Г., Отливка в кокиль лемехов из высокопрочного чугуна, Сб. «Высокопрочные чугуны», Машгиз, 1954.
55. S u r z y t e k M., Doświadczenia nad pierścieniami tlokowymi z żeliwa modyfikowanego i sferoidalnego, «Przegląd Odlewnictwa» N 9, 1957.
56. S u r z y t e k M., Badanie nad odlewaniem odśrodkowym i obróbka cieplna tulei z żeliwa sferoidalnego, «Przegląd Odlewnictwa» N 10—11, 1958.

57. Ш и п и л и н Б. И., Центробежная отливка высокопрочного магниевого чугуна, Всесоюзное совещание «Теория и практика производства отливок из высокопрочного чугуна», Тезисы доклада, Изд-во НТО Машпром, 1960.
58. Г у л я е в А. П., Металловедение, Изд-во оборонной промышленности, 1956.
59. Г и р ш о в и ч П. Г., С и м а н о в с к и й М. П., О хрупком и вязком состоянии чугуна с шаровидным графитом, «Литейное производство» № 1, 1960.
60. K r a f t R. W., ASTM Special Technical Publication, N 158, p. 456, 1954.
61. З а р у б и н Н. М., Ц ы п и н И. О., Влияние термической обработки на структуру и механические свойства чугуна со сфероидальным графитом, Сб. «Высокопрочный чугун со сфероидальным графитом», Машгиз, 1953.
62. P a l m e r K. B., G i l b e r t G. N. I., The fatigue properties of nodular cast iron, «Journal of Research and Development B. C. I. R. A.», V. 5, N 1, 1953.
63. Г и р ш о в и ч П. Г., С и м а н о в с к и й М. П., Ударная вязкость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, Сб. «Новое в теории и практике литейного производства, Машгиз, 1956.
64. Ц ы п и н И. О., Повышение пластических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, Изд-во ИТЭИИ, 1959.
65. R e y n o l d s C. C., W h i t t i n g t o n W. T., T a y l o r H. F., Hardenability of ductile cast iron, «Transaction of the American Foundrymen's Society», T. 63, 1955.
66. К л и м о ч к и н М. М., Поверхностная закалка чугуна с шаровидным графитом, Сб. «Электротермическая обработка и электроникровое упрочнение деталей», Машгиз, 1958.
67. Я х н и н а В. Д., Азотирование магниевого чугуна, «Литейное производство» № 4, 1955.
68. Б о б р о Ю. Г., К о в а л е н к о В. С., Азотирование чугуна с шаровидным графитом, Сб. «Труды Харьковского политехнического института», том IX, 1957.
69. W i e g a n d H., H e n t z e H., Dauerschwingfestigkeit und Verschleissverhalten von salzbadnitrierten Zahnrädern aus Gusseisen mit Kugelgraphit, «Metall oberfläche» N 8, 1959.
70. Р о т т е н б е р г М. И., З а п о л ь с к а я А. В., Азотирование тепловозных коленчатых валов из чугуна, «Литейное производство» № 10, 1959.
71. Новая марка антифрикционного чугуна с шаровидным графитом с 51-52, «Технология транспортного машиностроения» № 7, 1956.
72. М и ш и н П. А., Б у р а я Я. С., Сульфидирование деталей машин и инструмента, «Вестник машиностроения» № 7, 1955.
73. Л а х т и н Ю. М., П и н ч у к Д. С., Азотирование высокопрочного магниевого чугуна, «Металловедение и обработка металлов» № 7, 1958.
74. В а щ е н к о К. И., Т о д о р о в Р. П., К о ш о в н и к Г. И., Влияние режима отжига магниевого чугуна на его механические свойства, «Литейное производство» № 5, 1960.
75. К у д р я в ц е в И. В., С а в в и н а Н. М., Влияние поверхностных упрочнений на усталостную прочность сверхпрочного чугуна, «Литейное производство» № 10, 1951.
76. И л ь и ч е в а Л. В., П о п о в а Н. Ю., Образование черных пятен в чугуне с шаровидным графитом и методы борьбы с ними, Изд-во ВИНТИ, 1957.
77. К о р о л е в В. М., Новое в производстве отливок из магниевого чугуна, Изд-во ВИНТИ, 1957.
-

Николай Иванович Ключнев

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА  
С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Технический редактор *Г. В. Смирнова*

Корректор *В. П. Крылова*

Переплет художника *Е. В. Бекетова*

---

Сдано в производство 11/XII 1961 г.

Подписано к печати 5/III 1962 г.

T-03227

Тираж 6000 экз. Печ. л. 10,75. Бум. л. 5,38. Уч.-изд. л. 11,5. Формат 60×90/16.

Цена 68 коп.

Зак. 822.

---

Типография № 6 УПП Ленсовнархоза. Ленинград, ул. Моисеенко, 10

68 коп.



Москва, 1-й Басманный пер., 3

Н. И. КОУЧЕВ