

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛИТЬЯ

А. Н. ЦИБРИК, М. И. АВЕРЧЕНКОВ,
В. А. ЦИБРИК

**ОСНОВЫ
СТРУКТУРНО-
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО
УПРОЧНЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ**

КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 1979

Основы структурно-геометрического упрочнения деталей /
Цибрик А. Н., Аверченков М. И., Цибрик В. А.— Киев : Наук.
думка, 1979.— 180 с.

В монографии обобщены закономерности влияния структуры на модуль упругости и совместного влияния геометрических параметров поверхности на коэффициент жесткости и несущую способность литых деталей. Дан сравнительный анализ существующих способов физико-термического, химического и механического упрочнения поверхности деталей. Приведены методы определения и практического регулирования структуры, физико-химических свойств и остаточных напряжений в поверхностном слое отливок. Рассмотрены процессы заполнения форм жидким металлом, формирование и классификация дефектов поверхности и поверхностного слоя литых и механически обработанных деталей. Описаны особенности технологической оснастки и технологии новых и существующих способов формообразования для получения отливок с упрочняющим геометрическим орнаментом.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, занятых в области исследования, конструирования и изготовления литых деталей.

Ил. 123. Табл. 65. Список лит. : с. 173—177 (121 назв.).

Ответственный редактор *Д. Ф. Чернега*

Рецензенты *Л. Д. Перкас, Ю. З. Бабаскин*

Редакция технической литературы

Ц 31204-349 414-79 2603000000
M221(04)-79

© Издательство «Наукова думка», 1979

Процесс формирования отливок в литейных формах (изложницах) определяется законами теплофизики, термодинамики, гидравлики и других смежных наук, достижения и трансформированные закономерности которых являются основой при разработке новых и усовершенствовании существующих технологических процессов производства отливок.

Согласно положениям теории теплообмена, кристаллизации и кристаллохимии, поверхность и поверхностный слой литых деталей по сравнению с глубинными слоями должны обладать высокой физико-химической однородностью структуры, плотностью, антикоррозионной стойкостью и другими ценными свойствами.

Известно, что структура и свойства отливок зависят главным образом от свойств жидкого металла и литейной формы, характера кристаллизации и затвердевания металла в форме. При этом разнородные структурные зоны отливки, состоящие из мелких, столбчатых и равноосных кристаллов, существенно различаются по плотности, прочности и степени физической неоднородности. Фасонные отливки и слитки, получаемые по существующим технологическим процессам, характеризуются наличием в мелкокристаллической зоне (поверхностном слое металла) большого количества газовых и неметаллических включений, трещин, пригара и других дефектов, резко ухудшающих физико-механические свойства отливок. При обжиге слитков и отливок мелкокристаллический поверхностный слой металла окисляется и превращается в окалину (на слитках и крупных отливках толщина окисленного слоя достигает 5 мм). Поэтому в отливках предусмотрены специальные припуски металла на механическую обработку, а слитки из качественной легированной стали и специальных сплавов перед прокаткой подвергаются обдирке на станках. Таким образом, вследствие несовершенства технологии поверхностная мелкокристаллическая зона отливок и слитков в большинстве случаев превращается в отходы и безвозвратные потери производства.

Это характерно не только для отливок, но и для других заготовок. Прокатка, ковка, горячая штамповка и механическая обработка также не могут обеспечить необходимое качество поверхности и поверхностного слоя деталей. Поэтому кроме механической обработки в настоящее время широкое распространение получили физико-химические методы поверхностной обработки, направленные на улучшение структуры, качества поверхности и поверхностного слоя деталей. Такая поверхностная обработка машиностроительных деталей повышает предел выносливости (цементация, поверхностная закалка и др.), твердость и коррозионную стойкость (азотирование, цементация, фосфатирование, хромирование и др.), жаростойкость (алитирование, алюмосилицирование и др.), уменьшает шероховатость (резание, шлифование, полирование и др.).

Однако применение этих методов обработки не может в полной мере решить проблему улучшения качества поверхности и поверхностного слоя, так как нагрев деталей до температуры $0,4-0,5 T_n$, необходимый при обработке, вызывает рекристаллизацию и полиморфные превращения в металле и, как следствие, большие остаточные напряжения (коробление), потерю размерной точности и поверхностное окисление металла (до 1,5%). После механической обработки на деталях образуется деформированный слой металла с разрыхленной структурой, который существенно снижает их прочностные и антикоррозионные свойства.

Следовательно, необходимо разработать технологию производства, направленную на улучшение качества поверхности и поверхностного слоя литых деталей. Решение этой проблемы тесно связано с изучением анизотропии материала и анализом конструкции отливок, рациональное сочетание которых имеет одно из первостепенных значений для повышения прочностных и эксплуатационных характеристик литых деталей.

Анизотропия свойств литых деталей, обусловленная направленной ориентацией зерен (дендритов) и наличием различных структурных зон, во многих случаях является нежелательной, так как может быть одной из причин разрушения литых деталей при сложном нагружении в условиях эксплуатации. Геометрическая анизотропия поверхности и поверхностного слоя после прокатки и механической обработки также снижает прочностные свойства деталей. Однако можно существенно повысить несущую способность детали, если создать заданную геометрическую и структурную анизотропию в отливке с учетом характера нагружения в рабочих условиях. Для этого разработаны основы геометрического и структурного упрочнения литых деталей в области литейного производства.

Большинство литых металлов и сплавов обеспечивают необходимую прочность отливок при толщине стенки 1,5—3 мм. На практике (при существующих способах производства) мини-

мальная толщина стенок отливок составляет: в песочных формах 5—8 мм для чугуна и 10—15 мм для стали, в керамических — для стали 2—3 мм, минимальный припуск металла на механическую обработку достигает 2—5 мм и допуск металла на массу 3—8%. Во многих отраслях промышленности средняя толщина стенок литых деталей часто определяется наличием формовочного оборудования, в большинстве случаев она значительно завышена и составляет 15—50 мм, при этом шероховатость больше предельно возможной. Значительное влияние на толщину стенки отливки оказывает жидкотекучесть расплава. Чем она больше, тем более тонкостенные и крупногабаритные отливки можно получить в литейных формах при прочих равных условиях. Большинство литейных металлов и сплавов характеризуется ограниченной жидкотекучестью, что в значительной степени сужает технологические возможности получения тонкостенных отливок.

Применение формовочных покрытий и облицовок форм с заданными кристаллохимическими и физико-механическими свойствами позволяет управлять процессами в контактной зоне жидкий металл — форма и получать бездефектную структуру поверхности и поверхностного слоя отливки.

Новая технология получения отливок в формах из сыпучих песков и порошков обеспечивает литую орнаментированную поверхность 5—6-го классов шероховатости и бездефектный мелкокристаллический слой.

В настоящее время возникла необходимость обобщить результаты экспериментально-теоретических исследований и существующих научных положений о роли структурной и геометрической анизотропии, качества поверхности и поверхностного слоя в формировании физико-механических и эксплуатационных свойств отливок, что даст возможность разработать новые методы использования резервов прочности литого материала, повышения несущей способности и улучшения эксплуатационных характеристик готовых деталей, а также снижения металлоемкости литых деталей.

1. Основы поверхностного упрочнения

Эффективное использование резервов заложенных в материалах свойств приобретает актуальнейшее значение на современном этапе. О величине таких резервов достаточно красноречиво свидетельствует, например, теоретическая оценка прочности твердых тел, в частности металлов. Так, прочность металлов на разрыв (при всестороннем растяжении) может достигать нескольких сотен и тысяч килограмм-сил на 1 мм^2 [1]. Прочность же промышленных металлов и сплавов обычно составляет $10\text{--}100 \text{ кгс/мм}^2$. Такая большая разница между значениями теоретической и технической прочности обусловлена наличием в реальном материале различных дефектов: микроскопических — точечных (вакансии, межузельные атомы, примесные атомы в твердых растворах), линейных (дислокации), двумерных (поверхностные и двойниковые границы, дефекты упаковки, межзеренные границы в поликристалле) и макроскопических (включения других фаз, поры, трещины и пр.).

Накопление дефектов одного типа (микроскопических) приводит к их слиянию и росту, образованию микротрещин и пор, которые еще более снижают прочность материала. В настоящее время уже имеются новые материалы в виде бездефектных нитевидных кристаллов («усов»), обладающие прочностью, близкой к теоретической. Однако исходя из современного уровня развития машиностроения реальным на данном этапе представляется путь эффективного использования существующих материалов (металлов). За последние годы с появлением новых высокопрочных металлов и сплавов ужесточились условия эксплуатации машин, аппаратов и конструкций, что привело к переоценке конструктивных критериев.

Основной тенденцией в поисках надежности конструкции является не только выбор материала и совершенное проектирование, но и технологическое обеспечение надежности машин и конструкций. Рациональная технология позволяет наилучшим образом использовать физико-механические и другие свойства металла при наименьших материальных и энергетических за-

тратах. Большинство исследований по упрочнению изделий и практическое использование их результатов направлено на ликвидацию дефектов в деталях, полученных по несовершенной технологии. Обзор этих исследований показывает, что наиболее доступным и эффективным воздействием на улучшение физико-механических свойств металла является устранение поверхностных дефектов в металле.

Уже в начальной стадии формирования литых деталей и слитков наблюдаются такие дефекты, как засоры, ужимины, спаи, завороты, рубцы, плены, газовые раковины, поры, шероховатость поверхности и пр. При физико-химическом взаимодействии расплава с материалом формы и окружающей средой в контактной зоне отливки образуется поверхностный слой, отличающийся от основного металла по структуре, составу и свойствам, например обезуглероженный слой в стальных отливках, альфированный слой в титановых, окисные плены в магниевых чугунах, тонкая феррито-графитная эвтектика в эвтектических чугунах, черный излом в алюминиевых отливках и др. Этот поверхностный слой, как правило, ухудшает свойства отливки. Изучению механизма образования поверхностных дефектов и разработке мероприятий по их предупреждению посвящено огромное количество работ, в частности работы Г. Ф. Баландина, Н. Д. Дубинина, В. А. Ефимова, И. Б. Куманина, Ф. Д. Оболенцева, А. М. Лясса, А. А. Рыжикова, А. Н. Цибрика, А. М. Петриченко, А. П. Пронова и др. Однако полного устранения этих дефектов добиться до сих пор не удалось. Естественно, что литейщики стремятся к сокращению литых поверхностей путем замены деталей с литыми поверхностями деталями, у которых все поверхности получены механической обработкой.

Однако введение механической обработки не решает проблему эффективного использования материалов. Не говоря уже об увеличении затрат по изготовлению детали, механическая обработка часто усугубляет потерю прочности материала вследствие возникновения новых микро- и макротрещин, вырывов и др. Различный вид нагружения при точении, резании, фрезеровании, шлифовании и пр. обуславливает изменение текстуры, деформацию и степень проявления пластичности и хрупкости материала. Наряду с изменением физико-механических свойств поверхностного слоя металла наблюдается возникновение остаточных растягивающих напряжений. Механизм возникновения этих дефектов и их влияние на свойства деталей достаточно полно освещены в работах М. О. Якобсона, С. В. Серенсена, Г. В. Карпенко, Н. Ф. Сидорова, А. Д. Манасевича и других специалистов. Причинами возникновения остаточных напряжений являются неравномерный локальный нагрев поверхностных слоев металла и его неоднородная пластическая деформация. Их величина и знак зависят от физико-механических свойств обрабатываемого металла, теплового и силового воздействия

инструмента и режимов резания. Не останавливаясь на механизме возникновения этих напряжений, который достаточно полно описан в работах [2—7], приведем лишь их значения (рис. 1—5) [4]. Чем выше прочность материала, тем значительнее величина остаточных напряжений растяжения в поверхностном слое (рис. 6) [8].

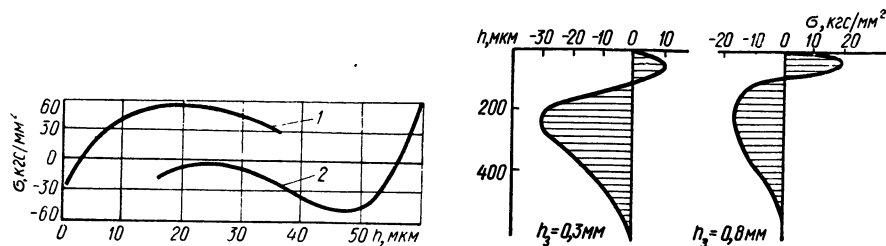


Рис. 1. Зависимость остаточных напряжений при фрезеровании стали 45 от глубины резания h и переднего угла инструмента γ :
1 — $\gamma = -6^\circ$; 2 — $\gamma = -27^\circ$.

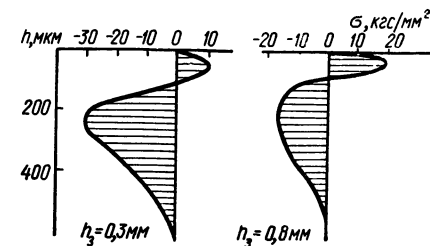


Рис. 2. Зависимость остаточных напряжений при точении стали 45X4MФА от износа задней поверхности инструмента.

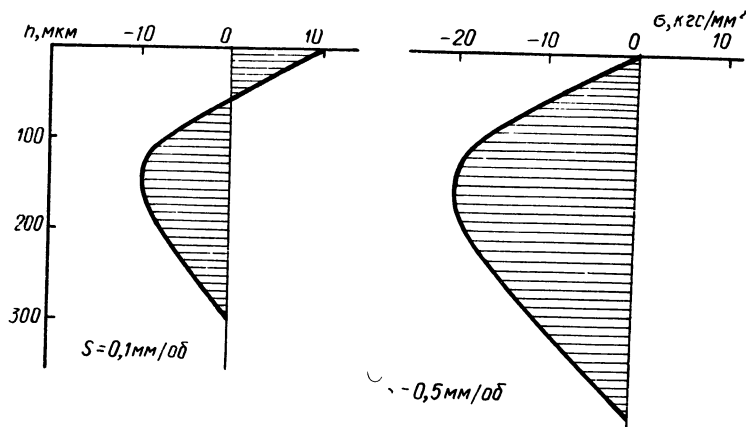


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений при точении стали 50 от глубины резания.

Из приведенных данных видно, что механически обработанные поверхности имеют существенные недостатки. Сравнительная характеристика поверхностных слоев деталей, полученных различными способами, приведена ниже. И хотя применение той или иной технологии изготовления деталей необходимо и оправдано с точки зрения конструктивного воплощения последних, все же в некоторых случаях возникает необходимость их противопоставления. Это вызвано прежде всего тем, что современная технология производства большинства деталей обуславливает коэффициент использования металла в пределах 0,6—0,7. Например, при обработке резанием отливок из серого чугуна при массовом производстве на припуски затрачивается количество металла, составляющее в среднем 15—20% массы деталей, при серийном — до 40—60%, а в отдельных случаях

даже до 70—80% [9, 10]. Кроме того, повышение требований к деталям по долговечности и эксплуатационной надежности, от которых зависят работа машин и конструкций в целом и производительность труда десятков миллионов людей, вынуждает исследовать, разрабатывать и применять дополнительные технологические мероприятия по упрочнению и повышению указанных характеристик деталей.

Принимая во внимание многообразие применяемых технологических методов для повышения физико-механических и других характеристик деталей, авторы считают возможным в данной работе привести лишь краткий перечень наиболее распространенных в современном машиностроении.

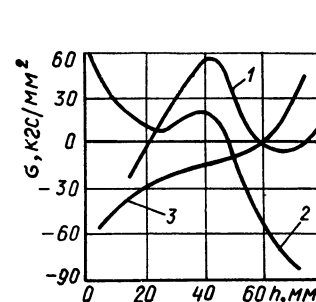


Рис. 4. Зависимость остаточных напряжений при торцовом фрезеровании стали 45 от скорости резания:
1 — $v = 16$ м/мин; 2 — $v = 210$ м/мин; 3 — $v = 610$ м/мин.

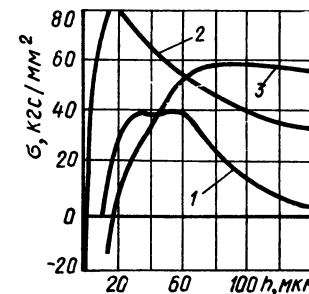
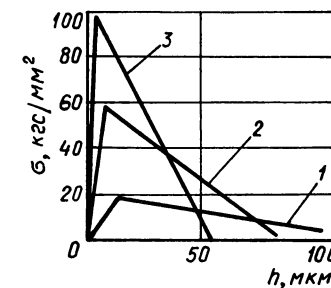


Рис. 5. Зависимость остаточных напряжений при шлифовании стали У8 от скорости резания:
1 — $v = 13$ м/сек; 2 — $v = 20$ м/сек; 3 — $v = 35$ м/сек.

Рис. 6. Зависимость величины и эпюры распределения остаточных напряжений от скорости резания сплава ХН70ВМТЮ:
1 — $v = 5$ м/мин; 2 — $v = 12$ м/мин; 3 — $v = 36$ м/мин.



В первую очередь следует упомянуть термическую обработку металлов, значение которой трудно переоценить. Согласно классификации А. А. Бочвара [108], имеются следующие виды термообработки: рекристаллизация (отжиг первого рода), отжиг (отжиг второго рода), закалка, отпуск и химико-термическая обработка (цементация, азотирование, алитирование, хромирование, сульфидирование, борирование, ванадирование, меднение, цинкование, силицирование, нитроцементация и др.).

Вопросу об изменении свойств металлов при термообработке на протяжении последних десятилетий уделяется значительное внимание. Литература на эту тему весьма обширна, поэтому даже краткое рассмотрение работ в данной монографии не представляется возможным. В большинстве своем перечисленные выше виды термообработки являются наиболее надежными и эффективными. Однако их практическое использование с сопутствующими исправлениями нарушений, вызванных побочными явлениями (изменений размеров детали во время термообработки, коробления, растрескивания, наличия остаточных напряжений, по большей части вредных), значительно повышает стоимость продукции. К тому же широкое применение этих операций при массовом производстве изделий ограничивается низкой пропускной способностью термических агрегатов (цехов).

Другим способом повышения прочностных свойств деталей является поверхностное пластическое деформирование. На качественные показатели этого процесса наибольшее влияние оказывают максимальные значения нормальных и касательных напряжений, передаваемых от упрочняющего инструмента на деталь. Поэтому, несмотря на многообразие и кажущееся различие существующих методов упрочняющей обработки конструкций и деталей, они могут быть разделены в соответствии со схемой деформирования металла в зоне контактирования с инструментом (рис. 7) [4, 12].

В техническом арсенале современного производства имеются другие методы, улучшающие свойства деталей и повышающие их эксплуатационную надежность, однако все они, как правило, не отвечают технологическим требованиям современного производства, обусловленным высокой производительностью, массовостью и экономической эффективностью. Следовательно, для повышения долговечности и эксплуатационной надежности машин и конструкций требуются такие технологические методы получения прочных (бездефектных) деталей, применение которых можно было бы осуществить за коротких промежутков времени и без значительных капитальных затрат.

Из известных промышленных методов получения машиностроительных деталей метод литья является практически единственным, с помощью которого можно формировать свойства деталей с учетом природы металла, конструктивных особенностей, технологии обработки и эксплуатационной надежности.

Конструкции литой детали в целом, отдельным ее узлам, сочленениям, конфигурации поверхности можно придать любую оптимальную форму, что позволяет без ущерба для размерной точности детали рационально изменять ее конструкцию в соответствии с величиной и характером ее нагружения при изготовлении и эксплуатации. На поверхностях литой детали (исключая посадочные и трущиеся) можно получать фасонные впадины и выступы, профили любой геометрической сложности, так

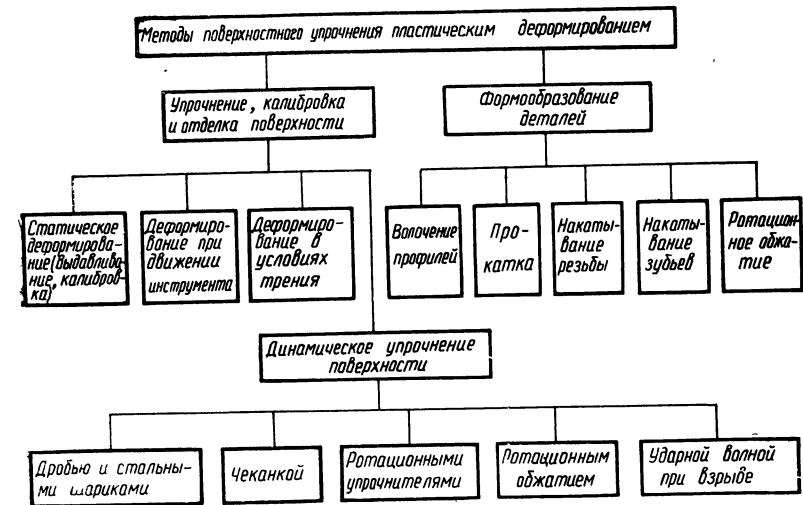


Рис. 7. Классификация методом упрочняющей обработки.

называемый рельефный орнамент (нервюры), выполнять ребра жесткости, рациональные радиусы закруглений в сочленениях, конусные сечения стенок, вносить другие конструктивные элементы, позволяющие улучшить свойства и повысить несущую способность литой детали [13—17].

Исследованиями отмечено, что изменением литейной формы можно регулировать структурообразование поверхностного слоя металла отливки и получать заданные механические свойства. В зависимости от размерных параметров кристаллических решеток, электронной структуры и химической активности жидкого металла в условиях формирования отливки ее поверхностный слой насыщается кислородом, водородом, углеродом, азотом и другими элементами, содержащимися в облицовках и покрытиях форм. В результате протекания указанных процессов в поверхностном слое и на поверхности образуются новые структурные фазы, резко изменяющие природу и свойства отливок. Так, адсорбционные поверхностные пленки могут играть роль пассивирующего элемента, когда отношение молекулярного

объема плены к атомному объему металла равно единице или больше ее, и роль активирующего элемента, снижающего коррозионную стойкость и разупрочняющего отливку, когда указанное отношение меньше единицы. Управлять этим процессом можно, применяя облицовки и покрытия, которые при взаимодействии с жидким металлом образуют на поверхности отливки защитные плены (Al_2O_3 , Al_2S_2 , Fe_2O_3 , MgS , TiO_2 и др.). Пределы растворимости элементов (кислорода, азота, углерода, водорода, хрома, титана, циркония, магния, теллура и др.), диффундирующих из формы в поверхностный слой отливки, определяются степенью переохлаждения жидкого металла. Известно, что при прочих равных условиях величина переохлаждения вблизи поверхности контакта с формой зависит от соотношения масс, температур и теплоемкости металла и формы.

По экспериментальным данным [105], предельная растворимость углерода в поверхностном слое и объеме отливки из сплавов на основе никеля, железа и кобальта составляет (%): 0,55 и 1,85, 2,0 и 2,06, 0,1 и 1,65 соответственно. Растворимость железа, циркония, церия, титана, хрома, магния в поверхностном слое и объеме отливок из алюминия составляет 0,05/0,17, 0,0/8,0, 0,0/9,0, 0,15/0,32, 0,7/5,8, 17/36 соответственно. При этом необходимо учитывать, что при избытке поступающих элементов в поверхностном слое отливки образуются соединения типа Me_xC_y , Me_xN_y , Me_xO_y , Me_xS_y и другие твердые фазы, наличие которых резко увеличивает твердость, трещиночувствительность, физическую и химическую неоднородность отливки. По активности образования новых твердых фаз в поверхностном слое первое место занимают отливки из титана и его сплавов, второе — отливки из чугуна, третье — из легированных сталей. Кроме того, если к отливкам предъявляются высокие требования по теплоотдаче в условиях эксплуатации, то при выборе металла для отливок с развитой поверхностью учитывают его теплопроводность.

Увеличение удельной поверхности отливок из структурно-чувствительных металлов и сплавов позволяет сознательно управлять формированием высоких прочностных и антикоррозионных свойств отливок. Если условно сохранить предысторию литейного металла и условия заливки как неизменные факторы, то состояние, структура, свойства поверхности и поверхностного слоя отливки определяются главным образом теплофизическими, термохимическими и термодиффузионными процессами, происходящими в зоне контакта жидкого металла с формой. Количество дефектов в литом металле увеличивается с увеличением толщины отливки, оно растет в направлении от поверхности к центру детали. Для отливок характерно изменение структуры от плотной мелкокристаллической на поверхности до крупнокристаллической с рыхлыми зонами в центре. Чем больше толщина отливки, тем больше крупнокристаллическая зона, сни-

жающая общую ее прочность. Здесь наиболее ощутимо влияние размера, которое проявляется через структуру и масштабный фактор. Увеличение диаметра образца из серого чугуна от 11 до 36 мм приводит к снижению прочности на разрыв σ_b примерно в два раза, увеличение диаметра образца из малоуглеродистой стали от 6 до 28 мм приводит к уменьшению σ_b на 25% [18].

Большое влияние на масштабный фактор оказывают наличие дефектов, микротрещин, включений, дислокаций и пр. и увеличение их количества и размеров с укрупнением отливки. При увеличении диаметра образца уменьшается поверхность контакта кристаллизующегося металла, отнесенная к единице его объема (удельная поверхность или приведенная толщина), что замедляет процесс затвердения и кристаллизации и приводит к снижению механических свойств отливки (табл. 1). Математические выражения этой закономерности приводятся в работах [13, 19]:

$$\sigma_b = kR'^{-K} = k'\tau_3^{-\frac{1}{2}K}; \quad (1)$$

$$HB = kR'^{-K_1} = k'\tau_3^{-\frac{1}{2}K_1},$$

где K и K_1 — коэффициенты однородности (квазиизотропии)¹; k , k' — коэффициенты пропорциональности; R' — приведенная толщина; τ_3 — продолжительность затвердевания. Другая зависимость между прочностью и скоростью затвердевания охлажденных чугуновых отливок, подтвержденная Г. В. Чертковым [109] с помощью статистического анализа, изображается прямой линией в полулогарифмических координатах

$$\sigma_b = k - K \lg R' = k - \frac{1}{2} K' \lg \tau_3. \quad (2)$$

Частным примером такой зависимости может служить формула, в которой вместо τ_3 использована средняя скорость затвердевания отливки [2]

$$\sigma_{кл} = 14,1 + 14,6 \lg v_{ср}, \quad (3)$$

где $\sigma_{кл}$ — предел прочности при давлении в клиньях; $v_{ср}$ — средняя скорость затвердевания.

Ввиду сложности характера влияния скорости охлаждения на прочность металла математические выражения этих зависимостей справедливы для определенного диапазона химических составов чугуна, толщин отливок и условий производства [22].

Результаты исследования образцов, вырезанных из различных зон чугуновой отливки, свидетельствуют о расхождении

¹ Значения коэффициентов квазиизотропии приводятся в работах [13, 20].

Таблица 1

Влияние структуры и диаметра образцов на физико-механические свойства

Марка чугуна	Степень эвтектичности	Модуль упругости, кгс/мм ²	$\frac{\sigma_B}{E}$	Среднее значение прочности на разрыв, кгс/мм ² , при диаметре образца, мм					
				5	10	15	20	25	30
				СЧ 12-28	0,88—1,2	$\frac{3300}{8400}$	0,002	17	15
СЧ 15-32	0,86—1,1	$\frac{7500}{10000}$	0,002	20	18	16	16,5	16	15
СЧ 18-36	0,81—1,05	$\frac{9200}{12000}$	0,002	24	21	20,5	20	19	18
СЧ 21-40	0,75—1,05	$\frac{10200}{12500}$	0,002	26	24	23,5	23	22	21
СЧ 24-44	0,74—0,98	$\frac{11200}{14000}$	0,002	28	27	27	26	25	24
СЧ 28-48	0,71—0,97	$\frac{11400}{14500}$	0,0022	32	31	31	30	29	28
СЧ 32-52	0,71—0,87	$\frac{13100}{15100}$	0,0023	36	35	35	34	33	32
СЧ 35-56	0,68—0,81	$\frac{14800}{15800}$	0,0026	41	40	39	37	36	35
СЧ 38-60	0,65—0,78	$\frac{15300}{16300}$	0,0026	43	42	42	40	39	38

прочностных свойств материала этих зон (табл. 2). Характерным для многих литых материалов является то, что мелкокристаллическая поверхностная зона обладает по сравнению с внутренней более высокими механическими свойствами. Количество и размер зерен в каждой зоне определяются степенью переохлаждения, а также, как это показано в работе [23], условиями теплоотвода. Максимальное переохлаждение, большое количество центров кристаллизации ведут к массовому возникновению зародышей кристаллов, которые не успевают да и не могут развиваться из-за их тесного размещения. В такой структуре плотность межзерновых прослоек и укладки зерен весьма высокая, поперечный размер поверхностной зоны в зависимости от размеров (толщины) отливок может составлять 0,4—1,0 мм.

Следующая за поверхностной промежуточная зона формируется при меньшем по интенсивности теплоотводе, что обусловлено прогревом поверхностных слоев формы и компенсацией выделившегося кристаллизационного тепла из поверхностной зоны отливки. Этот новый слой, как и поверхностный, характеризуется так же, хотя и в меньшей степени, хорошей

Таблица 2

Прочность литых чугунных образцов с различными структурными зонами отливки

Диаметр отливки, мм	Удаленный поверхностный слой			Удаленная сердцевина		
	Диаметр испытываемого образца, мм	Площадь сечения, мм ²	Прочность, кгс/мм ²	Диаметр сверления, мм	Площадь сечения, мм ²	Прочность, кгс/мм ²
40	25	490,63	18	24,6	770,92	20
	14	153,86	16,5	14,5	1090,96	19
	10	78,5	13	9	1192,41	17
25	16	200,96	18	15	314,00	22
	10	78,5	14,5	10	412,13	23
	8	50,24	13,5	6,8	454,33	20
15	8,8	60,79	18,5	8,2	121,23	27,8
	7,0	38,47	18,0	7,1	137,07	25,6
	4,9	18,85	17,0	5,8	150,18	21,5

плотностью межзерновых прослоек и мелкозернистой структурой. Распределение наиболее характерных для зон зерен в отливках серого чугуна показано в табл. 3 и на рис. 8 [9]. Характер изменения величины зерна соответствует обычным вариантам химического состава чугуна.

Таблица 3

Зависимость величины зерна в различных структурных зонах от диаметра образца

Зона	Величина зерна, мкм, при диаметре образца, мм					
	5	10	15	20	25	30
Поверхностная	75	100	100	125	150	200
Промежуточная	100	150	175	220	265	325
Основная	100	150	300	350	400	450
Центральная	115	165	350	400	475	500

Как отмечается в исследованиях Э. Я. Храповского [9], форма зерна во всех структурных зонах близка к многогранной, так как она связана со строением оболочки графитного скелета зерна, повторяющего форму базисной площади графитного зародыша. Наиболее отчетливо это наблюдается в поверхностной зоне, где благодаря большому переохлаждению ликвационные оболочки зерен более плотные и хорошо выявляют их форму, а общий характер строения наиболее близок к глубинной картине субструктур. В последующих зонах по мере уменьшения переохлаждения постепенно уменьшаются плотность ликвационных оболочек и отчетливость их форм, утрачивается сходство строения зон с субструктурой. Такое изменение размеров и фор-

мы зерен в различных структурных зонах в зависимости от тепловых условий процесса формирования структуры отливок соответствует общим закономерностям, изучавшимся на протяжении длительного периода в работах многих авторов: Э. Я. Храповского, Г. В. Черткова, С. С. Штейнберга, Я. Н. Малиночки, В. И. Данилова, Д. П. Иванова, Г. Ф. Баландина, Н. Г. Гиршовича, А. А. Рыжикова, Б. Б. Гуляева и др. Анализ физической стороны этого процесса и необходимое математическое описание даны в работах Н. Г. Гиршовича [24, 25].

Формирование поверхностного слоя происходит под непосредственным влиянием покрытий, облицовок и материала формы. Поэтому формирование отливок с заданными свойствами можно рассматривать во взаимосвязи с технологическими характеристиками литейной формы.

Как уже отмечалось в табл. 2, литые образцы с равной площадью сечения, взятые из различных структурных зон, имеют разные прочностные свойства. Качественное преимущество поверхностных более плотных слоев перед сердцевинной отмечается и в работах [7, 13, 26—34].

Очевидно, способствуя развитию этих слоев, т. е. увеличению их удельного объема во всем теле отливки, можно добиваться повышения прочностных и других характеристик литой детали. Авторы данной монографии, следуя по такому пути улучшения свойств литых деталей, предложили при создании отливок изменять конфигурацию литых поверхностей, которые в процессе обработки и эксплуатации детали не являются посадочными и трущимися.

Рельеф поверхности (орнамент) обуславливается технологическими возможностями изготовления детали и эксплуатационными условиями (тепловыми, силовыми, кавитационными, коррозионными и другими воздействиями среды). При высоком качестве литья эта орнаментированная поверхность не должна подвергаться радикальной механической обработке. В некоторых случаях можно допустить тонкую шлифовку с удалением слоя толщиной не более 0,1—0,2 мм.

Применение рельефного орнаментирования в сочетании с хорошим качеством поверхностного слоя позволяет повышать несущую способность детали, рационально распределять напряжения от рабочих нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации. При развитии контура поверхности и создании несимметричного сечения, расположенного таким образом, чтобы при изгибе или кручении его части с наибольшим моментом сопротивления подвергались растягивающим напряжениям, улучшаются технологические и конструктивные свойства детали. Эта закономерность описывается уравнением [13, 21]

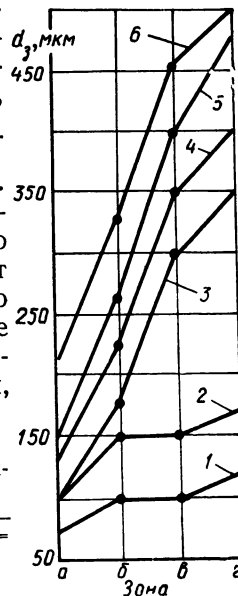
$$\frac{\sigma_{из}}{\sigma_{из}^0} = \frac{K_3}{1,67} K_2^{m_0} = \frac{2I_z}{1,67W} \left(\frac{R^0}{R'} \right), \quad (4)$$

где $\frac{\sigma_{из}}{\sigma_{из}^0}$ — отношение предела прочности при изгибе образцов любого $\sigma_{из}$ и цилиндрического $\sigma_{из}^0$ сечения; K_3 — критерий формы сечения (I_z — статический момент половины площади сечения образца относительно оси, проходящей через центр тяжести перпендикулярно к плоскости изгиба), $K_3 = \frac{2I_z}{W}$; W — момент сопротивления сечения; 1,67 — критерий для круглого сечения; K_2 — критерий скорости охлаждения (R^0 — приведенная толщина цилиндра с таким же моментом сопротивления сечения, как у данной отливки), $K_2 = \frac{R^0}{R'}$; m_0 — показатель степени, определяющий влияние скорости охлаждения на величину $\sigma_{из}$.

С развитием литой поверхности необходимо одновременно стремиться к уменьшению общей толщины стенки отливки, что приведет к увеличению доли более плотного и прочного слоя и тем самым к использованию наиболее благоприятным образом влияния масштабного фактора на прочность материала отливки,

Рис. 8. Зависимость величины зерна в различных структурных зонах от диаметра образца:

а — поверхностная зона; б — промежуточная; в — основная; г — центральная; 1 — $d=5$ мм; 2 — $d=10$ мм; 3 — $d=15$ мм; 4 — $d=20$ мм; 5 — $d=25$ мм; 6 — $d=30$ мм.



о котором можно судить по данным табл. 4 [18] и работ [35—39].

Как дополнительный резерв повышения прочности нужно рассматривать возникающие в поверхностном слое отливки благоприятные напряжения сжатия. Имеющиеся опытные данные [4, 40—47] показывают, что остаточные тепловые напряжения во многих случаях достигают весьма больших значений. Вполне очевидно, что, управляя процессом охлаждения и конструктивными параметрами отливки (степенью развития поверхностей охлаждения, толщиной стенок и разностенностью), можно найти оптимальные условия, при которых изделие не будет претерпевать кардинальных искажений (т. е. при остаточном σ , не превышающем предела текучести для пластичных металлов и предела прочности при растяжении и сжатии для хрупких). В отливке поверхностный слой, затвердевающий раньше глубинных слоев, подвергается воздействию остаточных сжимающих напряжений.

В работах И. В. Кудрявцева и В. В. Абрамова [41, 47] приведены зависимости ~~величины остаточных напряжений~~ на уста-

лостную и статическую прочность металлов. Отмечено, что повышение усталостной прочности под воздействием благоприятных остаточных напряжений имеет место в меньшей степени для гладких образцов и в значительно большей степени для образцов с различными концентраторами напряжений. Так, в образцах с круговыми выточками отмечено наиболее эффективное влияние благоприятных остаточных напряжений. Весьма

Таблица 4
Влияние диаметра образцов на прочность чугуна

Марка чугуна	Диаметр образца, мм	Прочность, кгс/мм ²		$\frac{\sigma_B}{\sigma_{сж}}$
		$\sigma_{сж}$	σ_B	
СЧ 21-40	5	—	26	—
	30	87	23	0,26
	100	20	12	0,6
	200	13	9	0,7
СЧ 24-44	5	—	28	—
	30	102	26	0,25
	100	23	17	0,7
	200	15	11	0,7
СЧ 35-56	5	—	41	—
	30	128	34	0,26
	100	36	20	0,6
	200	19	15	0,6

существенно нейтрализующее (нивелирующее) действие остаточных сжимающих напряжений на вредное проявление поверхностных дефектов (микро- и макротрещин, пригара, коррозионных, кавитационных повреждений и др.).

Одним из уже реализующихся путей в формировании и улучшении свойств отливок является модифицирование и легирование в форме. Введение в покрытие форм заданных элементов позволяет получить отливки с мелкокристаллическим строением и высокой плотностью. Применение этого метода позволяет добиваться упрочнения не

только по всей поверхности отливки, но и локально. В работах [46—51] и в данной монографии отмечаются успехи, достигнутые в этом направлении и подтвержденные в промышленных условиях.

Перечисленные выше мероприятия по упрочнению отливок дают наибольший эффект в сочетании с новыми технологическими процессами, исключающими полностью образование присущих литью грубых дефектов. К таким технологическим процессам относится получение отливок в формах из сыпучих песков, упрочняемых перепадом давления [52]. При разработке этого способа авторы предложили много новых решений по повышению качества отливок.

Как одну из прогрессивных технологий следует отметить литье в формы с газифицируемыми моделями, при котором не требуется сборка полуформ и исключается применение стержней, а восстановительная атмосфера, образующаяся при термической деструкции модели из пенополистирола, предотвращает пригорание сухого песка к отливке [53, 54].

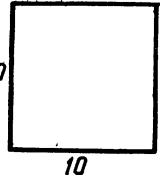
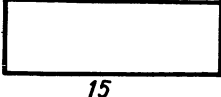
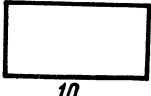



2. Аналитическое исследование параметров упрочняющего орнамента на литой поверхности

В настоящее время хорошо изучена структурная анизотропия материалов, обусловленная способом изготовления заготовок (прокаткой, ковкой, протяжкой, резанием и кристаллизацией). В зависимости от направления нагрузки изменяются жесткость и прочность заготовок при испытании на изгиб, кручение и растяжение. В то же время имеется мало данных по использованию геометрической анизотропии для улучшения свойств поверхности и поверхностного слоя деталей.

При разработке основ выбора геометрических элементов орнамента авторами принято, что размеры геометрических элементов поверхности существенно малы по сравнению с конструктивными размерами детали. Известно, что общая деформация литых деталей включает упругую и остаточную деформацию. Упругая деформация обусловлена перемещением и искажением (депланацией) сечения элемента в процессе обработки детали. При прочих равных условиях с увеличением толщины и площади сечения стенки доля упругой деформации, в том числе депланации, уменьшается. Поэтому в толстостенных литых деталях этот вид деформации практически не учитывается. Однако при уменьшении толщины и площади сечения стенки и увеличении количества сочленений различных геометрических элементов доля упругой деформации, в особенности депланации, резко возрастает. Метод литья в отличие от других методов получения заготовок имеет значительное преимущество — возможность варьировать процессом кристаллизации и получать на поверхности рациональные геометрические элементы, создавая наиболее благоприятное сочетание свойств материалов и геометрических особенностей отливок. При уменьшении поперечного сечения бруса или пластины уменьшается его статический момент, а с ним и жесткость конструкции при изгибе и кручении. Поэтому геометрические элементы в виде тонких стержней с гладкой поверхностью рационально применять для литых деталей, работающих в условиях растягивающих и сжимающих напряжений. Геометрический элемент в виде тонкостенного бруса открытого профиля, обладающего малой жесткостью при кручении, целесообразно применять для литых деталей, воспринимающих нагрузку изгибом, растяжением и сжатием. Геометрические элементы могут иметь и более сложную конфигурацию, обуславливающую анизотропию свойств в различных направлениях.

Геометрические характеристики элементов деталей машин, имеющих различные размеры и сечения, можно оценивать моментом инерции плоского сечения, определяющим долю участия каждой элементарной площадки в работе общего сечения.

Таблица 5
Геометрическая характеристика элементов литого орнамента

Геометрические элементы	Площадь, мм ²	Осевой момент инерции сечения геометрического элемента, мм ⁴
	100	3300
	75	622
	50	400
	50	1650
	25	200
	25	835

Аналитическим путем можно установить изменение момента инерции элементов сечения в зависимости от типа литого орнамента. Иллюстрацией данной зависимости могут служить рис. 9 и табл. 5. Расчеты показывают, что уменьшение толщины стенки отливки гильз с 12 до 4 мм обуславливает уменьшение момента инерции сечения $I = bh^3/12$ с 170 до 21 мм⁴, или на один порядок. При этом изгибная жесткость стенки гильзы $D = EI = Fh^3/12(1 - \mu^2)$ изменяется пропорционально моменту инерции. Следовательно, уменьшение толщины стенки приводит к изменению расположения сечения элемента ΔF по отношению к нейтральной оси и уменьшению момента инерции $I = h^2 \Delta F$ пропорционально квадрату расстояния h^2 от центральной оси сечения.

Однако вынесение за контур сечения гладкой, подвергаемой утоньшению стенки частиц материала в виде выступов литого орнамента, т. е. удаление его отдельных масс от центральной оси, позволяет компенсировать потери величины момента инерции в рациональной форме. Это реализуется при развитии поверхностей в литых деталях.

Эксперименты показали, что при изготовлении и эксплуатации тонкостенных гильз (толщина гладкой стенки менее 8 мм) возникает существенная остаточная деформация от нагрузок и по форме гильзы приобретают эллипсность. Аналогичное положение и при изготовлении отливок блоков двигателя СМД-14 и корпуса реактора, имеющих толщину гладких стенок менее 15—20 и 26—30 мм соответственно. Таким образом, конструирование и изготовление тонкостенных отливок с заданной жесткостью требуют дальнейшего совершенствования их конструкции в сочетании с использованием рациональных технологических методов.

При уменьшении толщины стенки отливки кроме изменения модуля упругости и модуля сдвига материалов большое значение имеет характер влияния различных напряженных состояний на сопротивление металла. Например, сопротивление стержней изгибу при равной площади поперечного сечения определяется

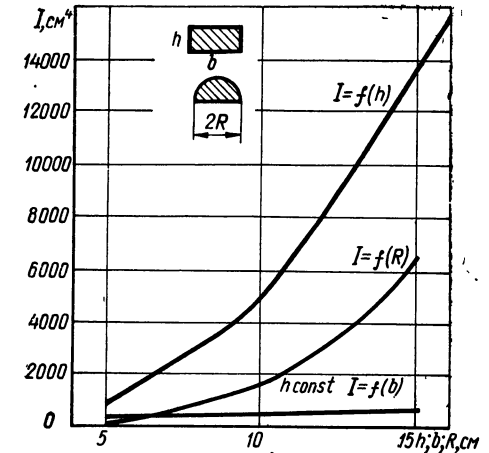


Рис. 9. Влияние параметров h , b и R на момент инерции сечения геометрического элемента орнамента.

величиной момента инерции I или момента сопротивления W сечения. Стержни квадратного, круглого и двутаврового профилей при одинаковой площади сечения значительно отличаются друг от друга по величине момента сопротивления. Из курса сопротивления материалов следует, что наиболее выгодным при изгибе является сечение, сконструированное таким образом, чтобы растягивающим напряжениям подвергались части с наибольшим моментом сопротивления. Момент сопротивления является функцией формы сечения.

Момент инерции при чистом кручении I_k литых деталей типа открытых профилей определяется как сумма моментов инерции отдельных элементов (прямоугольников), из которых состоит сечение:

$$I_k = \frac{1}{3} \eta \sum_{k=1}^n h_k \delta_k^3, \quad (5)$$

где η — коэффициент формы поперечного сечения.

Согласно лабораторным исследованиям и теоретическим расчетам, коэффициент η можно изменять, изменяя контур сечения (поверхности) специальными выступами и впадинами на поверхности. При этом значение η для деталей различной конфигурации составляет для уголка 1, швеллера и тавра — 1,12; двутавра — 1,2; двутавра с орнаментом на поверхности — 1,35.

Известно, что нормальные напряжения имеют наибольшее значение в наиболее удаленных от нулевой (осевой) линии зонах, поэтому целесообразно располагать материал по возможности дальше от нулевой линии геометрического элемента или отливки. По мере уменьшения толщины (сечения) стенки возрастает возможность коробления (искажения) размеров и конфигурации отливки. Несмотря на высокие прочностные характеристики материала (стали, чугуна и других сплавов), обычные тонкостенные литые детали характеризуются низкой жесткостью. Поэтому многие разработки направлены на увеличение жесткости конструкции отливок.

Математическое выражение жесткости представлено выражениями $EI_{из}$ и GI_k , где G и E — модули сдвига и упругости, I_k и $I_{из}$ — моменты инерции сечения, т. е. жесткость определяется природой металла (структурой и плотностью) и конструкцией отливки (расположением геометрических элементов). Из известных геометрических элементов (фигур) минимальное значение момента инерции имеют плиты и пластины. В зависимости от типа и расположения геометрических элементов орнамента плита может характеризоваться различной жесткостью в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Изгибная жесткость гладкой плиты

$$D_0 = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}; \quad (6)$$

изгибная жесткость плиты с двухсторонним орнаментом

$$D_p = D_0 \left(1 + \frac{EI}{D_0 t} \right); \quad (7)$$

момент инерции сечения геометрического элемента орнамента

$$I = \frac{b(H^3 - h^3)}{12}; \quad (8)$$

изгибающий момент плиты с орнаментом

$$M_{из} = \frac{E_{п} I_{п} + E_0 I_0}{\rho}; \quad (9)$$

момент сопротивления образца с орнаментом

$$W = F_{п} \frac{h_{п}}{6} + F_0 \frac{h_0}{8}; \quad (10)$$

крутильная жесткость плиты с односторонним орнаментом

$$D_{xy} = D_{oxy} + \frac{c}{2t}, \quad (11)$$

где D_{oxy} — крутильная жесткость гладкой плиты; $\frac{c}{2t}$ — крутильная жесткость одного элемента орнамента; c и t — соответственно толщина и шаг расположения орнамента; E_0 и $E_{п}$ — модули упругости материала в объеме и в поверхностном слое; F_0 и $F_{п}$ — площадь основания орнамента и сечения геометрического элемента; I_0 и $I_{п}$ — момент инерции сечения основания и элемента орнамента соответственно; h_0 и $h_{п}$ — высота основания и геометрического элемента соответственно.

Приведенная толщина стенки отливки

$$R' = \frac{V_0}{S} \quad \text{или} \quad R' = \frac{S_{сеч}}{\Pi_{сеч}}. \quad (12)$$

Здесь V_0 — объем отливки; $S_{сеч}$ — площадь поверхности отливки; $\Pi_{сеч}$ — периметр поперечного сечения стенки отливки.

Момент инерции сечения одной волны гофрировки гофрированной плиты (рис. 10) представляется уравнением

$$I = \frac{H^3 t h}{8} \left[1 - \frac{0,81}{1 + \frac{5}{32} \frac{H^2}{t^2}} \right]. \quad (13)$$

При одинаковом моменте инерции сечения гофрированная плита имеет толщину стенки, в два раза меньшую по сравнению с гладкой.

Расчеты показывают, что одностороннее оребрение (рис. 11) также увеличивает момент инерции сечения плиты. Таким образом, путем выбора эффективного типа геометрических элементов орнамента и рационального их расположения можно обеспечить оптимальное значение момента инерции сечения,

принимая оптимальную высоту ребра или гофрировки равной (3—6) t . Величина t определяет характер изменения механических свойств орнамента в осевом направлении. Чем меньше ее значение, тем более плавно изменяются упругие свойства плиты (рис. 12).

По значениям I и E можно определить жесткость различных плит из чугуна ($E = 10^4$ кгс/мм²). Для гладкой плиты $D = E \cdot I$,

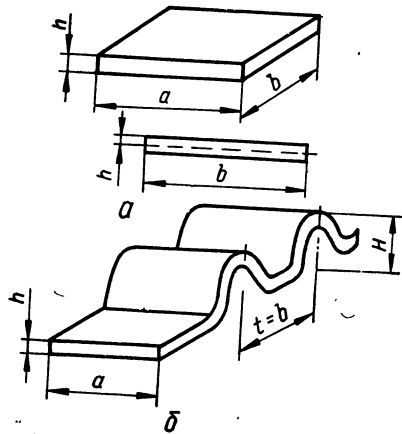


Рис. 10. Геометрия гладкой (а) и гофрированной (б) плит.

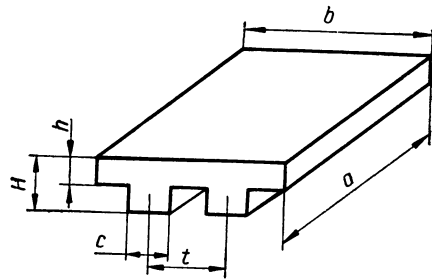


Рис. 11. Плита с односторонним орнаментом.

где D — цилиндрическая жесткость плиты (рис. 12); для фасонной плиты $D = \frac{Eh}{12(1-\mu^2)}$; для плиты гофрированной $D = E \cdot I$; для плиты с продольным орнаментом $D = D_0 + D_1$, где D_0 — изгибная жесткость гладкой плиты; D_1 — изгибная жесткость каркаса орнамента, $D_1 = \frac{E \cdot I}{t}$.

Применение одностороннего орнамента дает возможность смещать нейтральную ось по отношению к срединной плоскости, что обуславливает увеличение момента инерции и перераспределение напряжений растяжения и сжатия. В этом случае момент инерции сечения элемента орнамента увеличивается (например, для прямоугольника $I = \frac{bh^3}{3}$ вместо $I = \frac{bh^3}{12}$), так как нейтральная ось проходит на границе стыка элементов орнамента и плиты (рис. 13).

Уменьшение массы металла на единицу поверхности контакта отливки с формой является одним из главных факторов повышения удельной прочности литой детали (рис. 14). Улучшение несущей способности путем увеличения удельной поверхности литой детали позволяет выполнить конструктивные изме-

нения отливок в пределах толщин стенок. Поверхность можно увеличить путем размещения различных геометрических элементов — пирамид, полушаров, конусов, выступов, впадин — и их сочетания (рис. 15). При определении сравнительных характеристик отливок с орнаментом большую роль играют экспериментальные исследования.

Механические свойства изучались на специальных (полых и сплошных) образцах с литым орнаментом (рис. 16). Модели образцов изготавливались из воска на подложке из дерева. На восковой поверхности с помощью шаблонов заданного профиля вырезали орнамент. Одна серия образцов была испытана в условиях работы орнамента на растяжение, другая — в условиях работы на сжатие. Запись и регистрацию результатов проводили автоматически на диаграммной ленте. Площадь сечения в месте разрыва образца определялась планиметром.

Геометрические элементы орнамента располагались в пределах толщины исходных гладких образцов. Все образцы заформовывались в одной

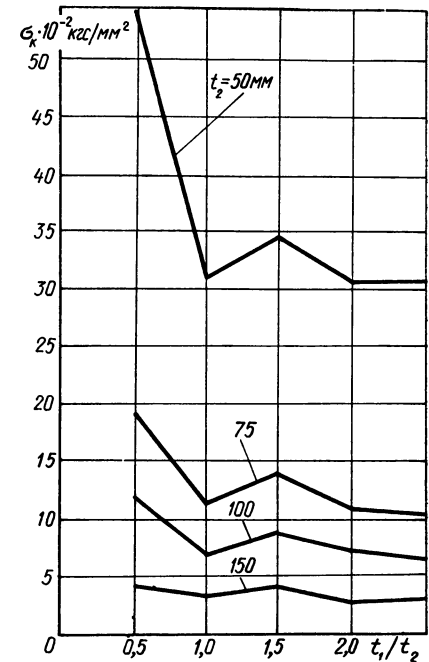


Рис. 12. Влияние шага орнамента на критическое напряжение плиты с орнаментом: t_1, t_2 — шаг в двух направлениях.

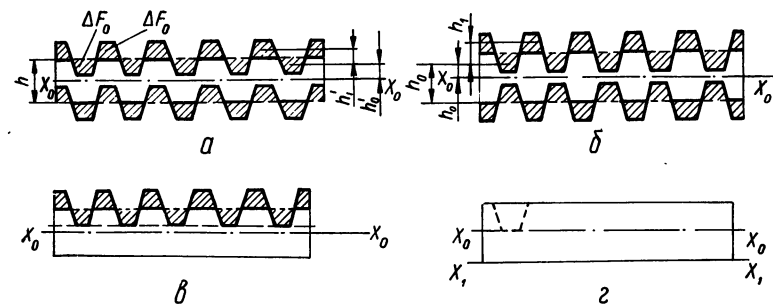


Рис. 13. Типы сечений стенок отливок:

а, б — двусторонний орнамент; в — односторонний орнамент; г — плита гладкая.

опоке и заливались металлом одной плавки через общий стояк. Заливка производилась жидким чугуном при температуре 1370—1380° С, химический состав чугуна был следующим (%): С — 3,2—3,4; Si — 2,14—2,22; Mn — 0,7—0,8; S — 0,10—0,11.

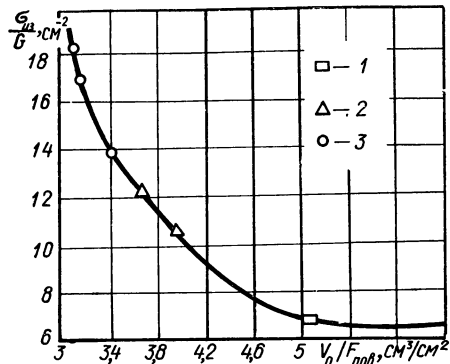


Рис. 14. Зависимость удельной прочности литых образцов от геометрии поверхности: 1 — гладкая поверхность; 2 — синусоидальный односторонний гофр; 3 — синусоидальный двусторонний гофр.

В табл. 6 приведены средние значения прочности образцов с различной геометрической формой поверхности при испытании на изгиб и на разрыв. Из таблицы видно, что увеличение литой поверхности образцов путем изменения конфигурации

Таблица 6
Влияние геометрии поверхности на несущую способность чугунных образцов

Конфигурация поверхности образца	Объем образца, см³	Площадь литой поверхности, см²	Приведенная толщина образца, см-1	Прочность образцов			
				на изгиб		на разрыв	
				$\sigma_{из}^{пр}$, кгс/мм²	$\sigma_{из}^{пр}$, кгс/мм² / г	$\sigma_{в}^{пр}$, кгс/мм²	$\sigma_{в}^{пр}$, кгс/мм² / г
Прямоугольная (исходная)	9,4	13,8	1,468	37,1	7,85	—	—
Полушаровые выступы	7,73	13,0	1,681	41,0	10,10	—	—
Выступы шестигранной усеченной пирамиды	7,05	13,25	1,879	43,1	12,30	—	—
Сетка шестигранника на поверхности	6,7	14,5	2,128	45,0	13,20	—	—
Продольные синусоидальные выступы	6,27	14,1	2,261	47,9	14,2	—	—
Круглая (исходная) гладкая	9,8	12,36	1,274	37,0	6,80	—	—
Цилиндрическая	1,4	3,39	2,421	—	—	22,6	10,0
Цилиндрическая продольнорифленая	0,67	3,19	4,74	—	—	24,5	15,3
Цилиндрическая косорифленая	0,71	3,44	4,84	—	—	23,8	14,8

повышает их прочность при испытании как на изгиб, так и на разрыв. Для определения степени влияния величины литой поверхности на прочность были вычислены удельные значения прочности (по отношению к единице объема и массы металла соответственно). Из каждого образца были вырезаны темплеты разной длины, у которых отношение литой поверхности к массе

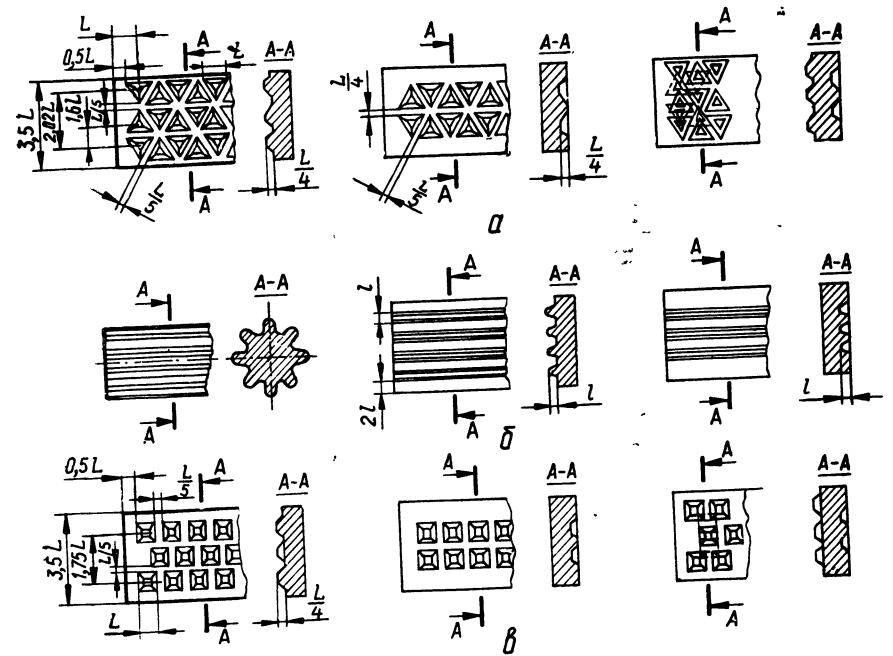


Рис. 15. Геометрические элементы поверхности литых образцов, дающие увеличение поверхности в 1,3 раза (а, б) и в 1,45 раза (в).

металла сохранилось приблизительно таким же, как у исходного гладкого образца. Удельные величины литой поверхности и прочности были определены по следующим формулам:

$$R' = \frac{S}{V}; \quad \sigma_{из}^{пр} = \frac{\sigma_{из}}{g}; \quad \sigma_{в}^{пр} = \frac{\sigma_{в}}{g}, \quad (14)$$

где g — масса образца, г; $\sigma_{из}^{пр}$ — удельная прочность на изгиб, кгс/мм²; $\sigma_{в}^{пр}$ — удельная прочность на разрыв, кгс/мм² / г.

Данные о влиянии величины удельной литой поверхности на удельную прочность при изгибе и при разрыве приведены в табл. 6 и на рис. 17—20. С увеличением литой поверхности наблюдается увеличение приведенной толщины, степень которого зависит от геометрической формы литой поверхности. Наиболее

рациональной конфигурацией представляется винтовой гофр, как не имеющий прямых и острых углов, стыков столбчатой структуры металла и обладающий минимальными концентраторами напряжений.

Определение модуля упругости различных структурных зон проводили на образцах (диаметром 5 и 8 мм, длиной 80 и 100 мм соответственно), вырезанных из орнаментированных гофром чугуновых отливок (размером 350×35×15 мм, но с различной приведенной толщиной) таким образом, чтобы в образцах наблюдалось последовательное увеличение

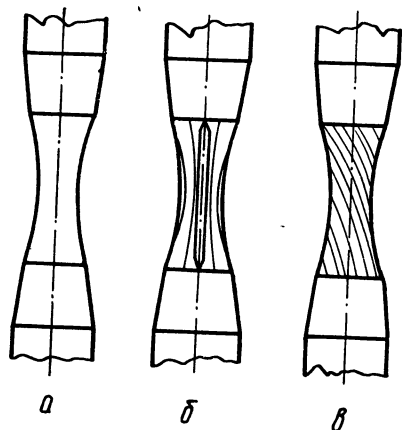


Рис. 16. Конструкция литых образцов с различной формой поверхности для определения прочности на разрыв: а — гладкая; б — продольнорифленая; в — корифленая.

мелкокристаллического слоя. Испытания производились на пьезоэлектрической установке с измерением резонансной частоты продольных колебаний. Средние значения модулей упру-

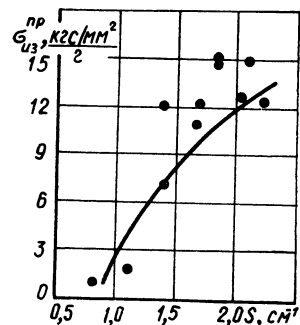


Рис. 17. Зависимость удельной прочности на изгиб от удельной литой поверхности образцов из серого чугуна.

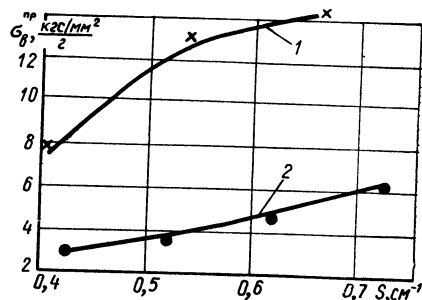


Рис. 18. Зависимость удельной прочности на разрыв от удельной литой поверхности образцов из стали (1) и чугуна (2).

ги чугуновых образцов при продольном E' и крутильных E'' колебаниях приведены в табл. 7.

Мелкокристаллическая структура поверхностного слоя литой плиты с орнаментом обуславливает повышение модуля упругости плиты из стали 35Л на 12—17%, из легированных сталей — на 15—20%, из чугуна — на 12—17%. При этом объем

мелкокристаллической зоны в тонкостенных чугуновых отливках с орнаментом достигает 30—50% (табл. 8, 9).

Увеличение коэффициента изгибной жесткости плиты с орнаментом только за счет мелкокристаллической структуры может достигать 17%. Для многих конструкций литых деталей особенно большое значение имеет жесткость при кручении. Расчеты показывают, что соотношение коэффициентов жесткости при кручении для плит гладких и с двусто-

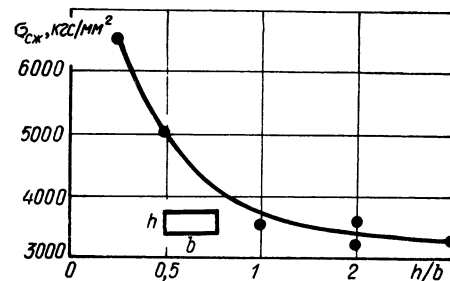


Рис. 19. Влияние отношения h/b ячейки орнамента на несущую способность образца.

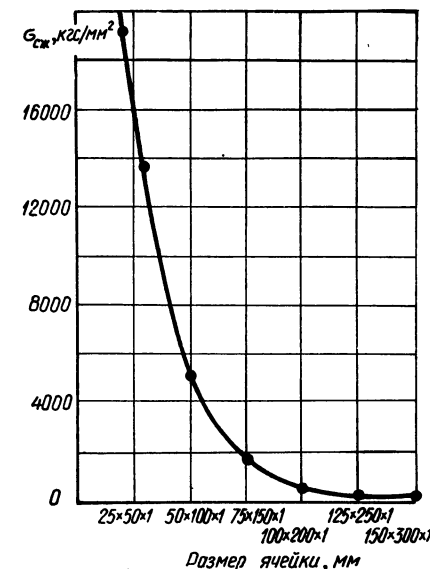


Рис. 20. Влияние размера ячейки орнамента на несущую способность образца.

ронным орнаментом при взаимно перпендикулярном расположении геометрических элементов составляет 1 : 2 и более. Для плит гладких, а также с двусторонним и односторонним орнаментом с параллельным расположением геометрических элементов значения коэффициентов жесткости при кручении одинаковы.

Таблица 7

Модуль упругости чугуновых образцов при продольном и крутильном колебаниях

Место вырезки образца	Структура	Приведенная толщина литого образца, см ² /см ³	Модуль упругости, кгс/мм ² ·10 ⁴		
			E'	E''	$\frac{E''}{E'}$
Сердцевина	Крупнокристаллическая	1,9	1,12	0,145	0,125
	То же	2,32	1,18	0,160	0,136
Поверхностный слой	Мелкокристаллическая	2,56	1,24	0,170	0,136
	То же	2,70	1,33	0,183	0,137
	» »	3,22	1,40	0,193	0,137

и литого орнамента, обуславливающей образование концентраторов напряжений на поверхности. Для экспериментального изучения распределения напряжений в деталях с литым орнаментом рационально применять поляризационно-оптический метод и специальные двухслойные образцы из прозрачных оптически активных материалов, моделирующие по упругим свойствам слой отливки¹. Поляризационно-оптический метод позволяет

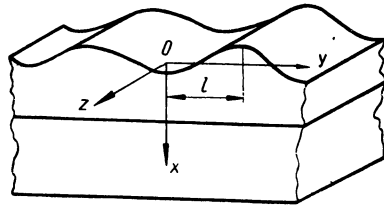


Рис. 21. Двухслойная модель с волнистой поверхностью.

экспериментально определить влияние структурной и геометрической неоднородности поверхности и поверхностного слоя на величину напряжений в отливках. Выполняя условия деформационного подобия при исследовании плоского напряженного состояния составных плоских тел оптическим методом [56], сохраняем равенство коэффициентов подобия для природы и модели.

Например, во взятом натурном литом чугуном образце с орнаментом модуль упругости поверхностного слоя, имеющего мелкокристаллическую структуру, $E_n = 1,55 \cdot 10^4$ кгс/мм², а нижнего с крупнокристаллической структурой — $E_n = 1 \cdot 10^4$ кгс/мм². На модели необходимо выдержать равенство отношения модулей упругости слоев из оптически активного материала при выполнении геометрического и силового подобия (рис. 21).

Модели представляли собой пластины размером 200×200 мм, толщиной 3 мм (однослойные) и 6 мм (двухслойные), в центральной части которых (50×50 мм) выполнены заданные геометрические элементы орнамента (рис. 22). Такая конструкция позволяет исключить влияние краевого эффекта.

Модели изготавливались путем заливки расплавленного материала ($t = 60 \div 70^\circ \text{C}$) в стержневой металлический ящик, на одной или двух стенках которого предусмотрены специальные вставки с обратным изображением изучаемого орнамента (рис. 23). Двухслойную модель получали при повторной заливке расплава на затвердевший первый слой, так как при склеивании слоев в образце возникают недопустимые напряжения.

Температуру замораживания T_3' и T_3'' , модули упругости E_1 и E_2 , коэффициенты оптической чувствительности C_1 и C_2 слоев определяли на замороженных тарированных образцах с базисными отметками при заданном нагружении по термооптическим кривым и приращению деформации. Характер распределения напряжений при нагружении модели иллюстрирует интерференционная картина, полученная на полярископе «Меорпа».

¹ Исследования напряженного состояния двухслойных образцов с орнаментом проводились под руководством А. Г. Чеберяк.

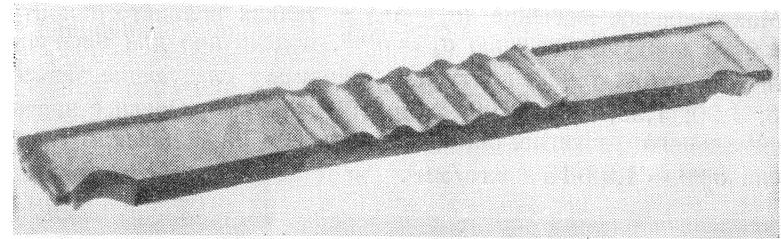


Рис. 22. Размещение орнамента на оптической модели.

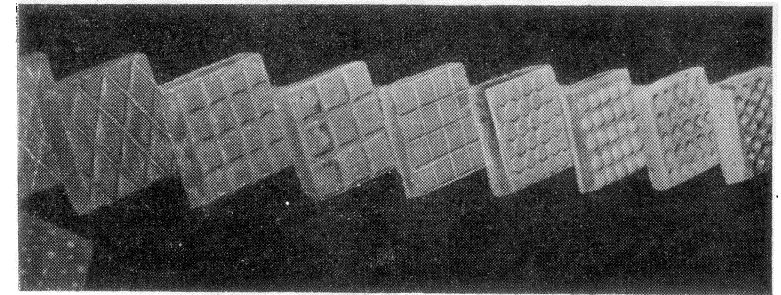


Рис. 23. Контрмодели (вставки).

Для модели, фотография среза которой в поляризованном свете представлена на рис. 24, а, приняты следующие значения параметров: толщина верхнего слоя 9 мм; толщина нижнего слоя 10 мм; амплитуда волны $\lambda = 1$ мм; длина волны 10 мм; $n = \frac{E_n}{E_n} = 1,55$.

Изучение картины полос в срезе этой модели показывает, что основную нагрузку при растяжении двухслойной пластины с различными модулями упругости слоев воспринимает более жесткий слой, напряжения в котором распределяются неравномерно — наиболее напряженными являются точки по контуру волнистой поверхности в наименьшем сечении среза растягиваемой модели. Распределение напряжений в слое с модулем упругости $E_n < E_n$ равномерное, о чем свидетельствует одинаковая освещенность нижней части среза. По измеренным разностям хода σ в точках этих сечений, зная коэффициент оптической чувствительности слоев C_1 и C_2 , можно подсчитать значения разностей главных напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)$ в этих точках. Распределение напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)\sigma_0$, где σ_0 — приложенное растягивающее напряжение ($\sigma_0 = 9,9 \cdot 10^{-3}$ кгс/мм²), приведено на рис. 24, б.

Можно отметить, что напряжения в слое I возрастают от минимальных значений в вершине гребня волны до наибольших значений, смещенных от контура в глубь слоя.

Максимальное значение $(\sigma_1 - \sigma_2)$ в точках волнистого контура, равное на контуре значению $\sigma_1 = \sigma_y^{\max}$, подсчитано для нескольких соответствующих точек контура и принимает следующие значения: (1,18; 1,90; 1,98; 2,07; 1,98; 2,09) · 10⁻² кгс/мм². Среднее значение максимального растягивающего напряжения на волнистом контуре модели $\sigma_y^{\max} = 1,98 \cdot 10^{-2}$ кгс/мм².

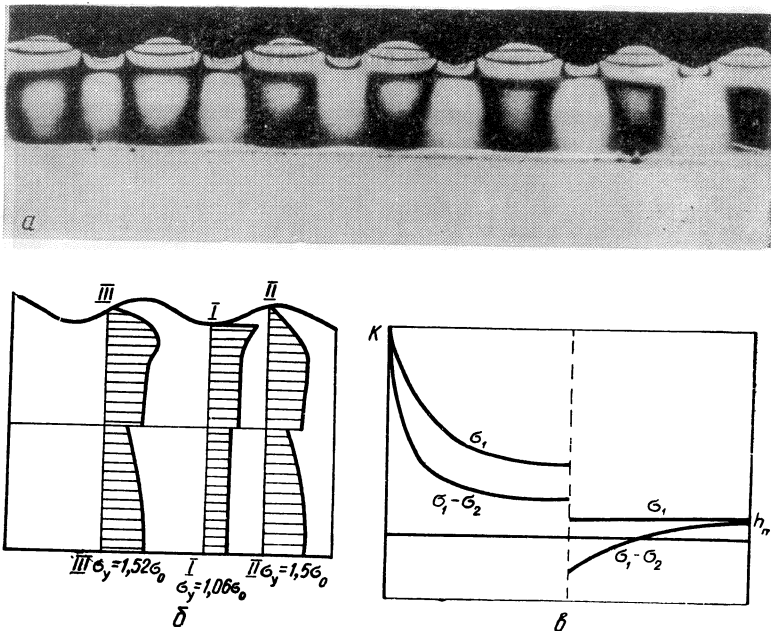


Рис. 24. Распределение напряжений в сечении среза двухслойной модели со слабой волнистостью поверхности:
 а — срез модели; б — распределение напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_0$ в сечениях I, II, III среза; в — распределение напряжений σ_x и σ_y в опасном сечении среза.

Концентрация напряжений в этих точках равна отношению максимального значения σ_y^{\max} к приложенному растягивающему напряжению: $K = \frac{\sigma_y^{\max}}{\sigma_0} = \frac{1,98}{0,99} = 2,0$. После обработки результатов измерений получаем значения разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$. Для того чтобы получить значения напряжений в плоскости xOy , необходимо произвести разделение напряжений.

Из существующих методов разделения напряжений [57] в данном случае удобно воспользоваться упрощенными графическими построениями по методу «Рапид» [58] для определения главных напряжений в точках, лежащих в плоскости симметрии. Для срезов изучаемых моделей сечения I и III являются осями симметрии и положение экстремальных точек легко отмечается

при проведении поляризационно-оптических измерений. Можно отметить, что напряжения в слое I возрастают от минимальных значений в вершине гребня волны до наибольших значений, смещенных от контура в глубь слоя.

На рис. 24, в показаны кривые напряжений в опасном сечении среза исследуемой модели, построенные в результате разделения $\sigma_1 - \sigma_2$. Эти кривые, так же как и картина полос (рис. 24, а), показывают, что наибольшие растягивающие на-

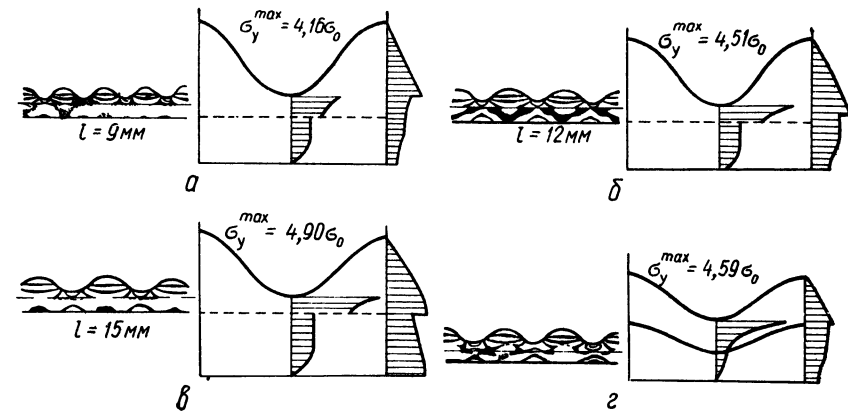


Рис. 25. Распределение напряжений в сечениях среза двухслойной модели под действием растяжения:

а — в — срезы моделей и распределение напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_0$ по сечениям срезов с различной длиной волны при контактировании по плоской поверхности; г — срез модели и распределение напряжений при контактировании слоев по волнистой поверхности.

пряжения действуют в более жестком слое, причем концентрация напряжений в опасной точке сечения I на контуре достигает величины $K=2,0$. Уровень растягивающих напряжений во втором, менее жестком слое ниже, и распределение их по толщине слоя равномерно.

Были исследованы модели, у которых амплитуда волновой поверхности соизмерима с толщиной отливки: $h_n = 2,5 \text{ мм}$; $h_n = 3 \text{ мм}$; $x = 1,5 \text{ мм}$; $n = \frac{E_n}{E_n} = 1,55$ при значениях длины волны волнистой поверхности 2l, равной 9; 12; 15 мм.

На рис. 25 представлены фотографии срезов таких моделей с картинками полос в них, возникающих под действием растягивающего напряжения σ_0 . Результаты поляризационно-оптических измерений обрабатывались методом компенсации в сечениях этих срезов. Измерения, проведенные компенсационным методом, дают возможность построить кривые изменения значения $\sigma_1 - \sigma_2/\sigma_0$ по сечениям рассматриваемых срезов.

Согласно теории максимальных касательных напряжений, для проведения оценки прочности конструкции достаточно знать разность главных напряжений, поэтому в последующих исследованиях от разделения напряжений можно отказаться.

С изменением длины волны наблюдается незначительное качественное изменение распределения напряжений в сечении II. Так, в модулях с длиной волны $2l$, равной 9; 12; 15 мм, безразмерные напряжения σ_1/σ_0 на свободном контуре нижнего, менее жесткого слоя принимают соответственно значения 0,8; 1,2; 1,6.

Несмотря на увеличение кривизны волнистой поверхности в зоне опасных сечений, при уменьшении длины волны (1,5; 1,2; 0,9 мм) коэффициент концентрации напряжений K в опасных точках сечений рассматриваемых моделей снижается и принимает соответственно значения 4,90; 4,51; 4,16. Это объясняется следующим образом. При растяжении образцов с поверхностным орнаментом определенную роль играют напряжения от местного изгиба в местах уменьшения толщины моделей, влияние которых сказывается сильнее для более пологой волнистой поверхности. При уменьшении длины волны сближение гребней волн играет подкрепляющую роль и способствует снижению концентрации напряжений для двухслойных моделей на 15% (для однослойных на 16%).

Гильзы и блоки двигателей в условиях эксплуатации могут испытывать изгибающие нагрузки. В связи с этим представляет интерес изучение распределения напряжений в модели двухслойной пластины при действии чистого изгиба. Модель была загружена в резивер для создания напряжения чистого изгиба с моментом $M = pa = 8,2$ кгс · мм и заморожена. Срез такой замороженной модели и график распределения напряжений в срезе в условиях чистого изгиба, построенный для безразмерных напряжений $\sigma = \sigma \frac{Mh}{I}$, приведены на рис. 26. В этом случае наибольшее растягивающее напряжение действует во впадине ($\sigma = 8,2 \cdot 10^{-2}$ кгс/мм²).

К натурному распределению структурных слоев отливок больше приближается модель с волнистой поверхностью, у которой разномодульные слои соединяются не по плоскости, а по некоторой волнистой поверхности с той же длиной волны, но с меньшей амплитудой.

Ввиду наличия технических сложностей, существующих при изготовлении таких моделей, ограничимся рассмотрением модели с соединением слоев по волнистой поверхности для длины волны $2l = 12$ мм. Распределение напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$)/ σ_0 показано соответственно на рис. 27. Коэффициент концентрации напряжений в этом случае ($K = 4,59$) мало отличается от коэффициента концентрации напряжений для модели с соответствующими параметрами (см. рис. 25, б).

Для рассматриваемых моделей характерно, что нейтральная

линия существенно смещается к нижнему, менее жесткому слою и, следовательно, ее расположение зависит от типа орнамента. Сравнительные исследования распределения напряжений в двухслойных моделях, слои в которых контактировали по плоской и волнистой поверхностям, показали, что значения коэффици-

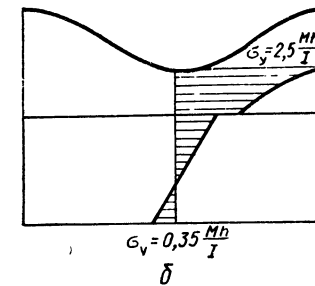
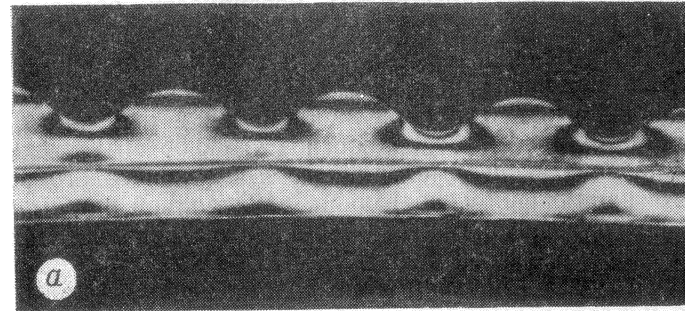


Рис. 26. Распределение напряжений в двухслойной модели под действием чистого изгиба: а — срез модели; б — распределение напряжений для безразмерных значений $\sigma = \sigma \frac{Mh}{I}$.

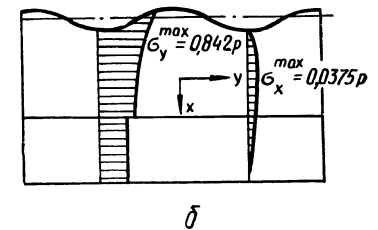
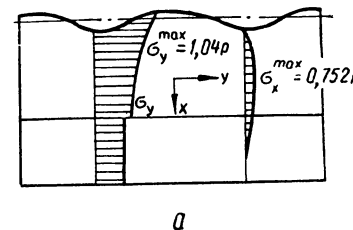


Рис. 27. Распределение напряжений в двухслойной модели с контуром поверхности с различной амплитудой волны: а — амплитуда волны 0,1 см; б — амплитуда волны 0,05 см.

ентов напряжений мало отличаются друг от друга. Во всех случаях нанесение на поверхность различных геометрических элементов приводит к неравномерному распределению напряжений в поверхностном слое. Увеличение напряжений сжатия вблизи волнистой поверхности достигает 30%.

Таким образом, экспериментально установлено, что внешний, более жесткий слой с волнистой поверхностью, модели-

рующей литой слой отливки с орнаментом, играет упрочняющую роль при работе двухслойной пластины и воспринимает большую часть приложенной растягивающей (сжимающей) нагрузки. При уменьшении толщины контактирующих слоев значение коэффициента концентрации напряжений возрастает, а при уменьшении длины волны поверхности образца — снижается.

В рассматриваемых случаях орнаментирование поверхности приводит к неравномерному распределению напряжений около этой поверхности. Увеличение напряжений в отдельных областях вблизи волнистой поверхности ($\lambda = 0,05$ мм) доходит до 30%. Сравнение экспериментального и теоретического решений задачи о напряженном состоянии двухслойной плиты с волнистой поверхностью подтверждает достаточную надежность полученных ранее результатов [18].

Такой метод исследования позволяет выбрать более сложные тип и расположение геометрических элементов на поверхности отливок при оптимальных решениях несущей способности деталей.

1. Зарождение центров кристаллизации и рост кристаллов

Структура отливок зависит от параметров процесса кристаллизации жидкого металла в литейной форме. Гетерогенное зарождение центров кристаллизации и большая скорость охлаждения жидкого металла в форме обуславливают неравновесный характер кристаллизации отливок и получение метастабильной (квазикристаллической) и мелкокристаллической структуры. Формирование поверхностного слоя отливок в условиях реальной литейной формы происходит под влиянием следующих факторов и закономерностей:

- активные участки или элементарные плоскости скола кристаллической решетки порошков, которые по кристаллохимическим параметрам близки к твердой фазе кристаллизующегося металла, служат готовыми центрами кристаллизации. Активность (скорость образования) центров кристаллизации на поверхности покрытий приобретает существенное значение в случае, когда температура контакта значительно ниже температуры солидуса. Чем меньше шероховатость покрытия, тем большее переохлаждение необходимо для зарождения центров кристаллизации;

- поверхностные дефекты покрытий (трещины, впадины, выступы) характеризуются повышенной поверхностной энергией и оказывают ориентирующее влияние на кристаллизацию жидкого металла;

- наличие оборванных (некомпенсированных) химических связей, химически активных адсорбированных атомно-молекулярных группировок и радикалов ОН, физико-химическая неоднородность поверхности покрытий обуславливают пристеночный эффект. Скорость зарождения центров и роста кристаллов в контактной зоне отливки значительно превышает скорость объемной кристаллизации;

- эрозия формы и вторичное окисление металла вызывают образование активных нерастворимых металлофильных примесей в жидком металле;

сверхбыстрое охлаждение и существенное переохлаждение жидкого металла к началу кристаллизации обеспечивается интенсивным теплопереносом и контактным отводом физического тепла и тепла кристаллизации поверхностным слоем формы;

образование пересыщенного твердого раствора в контактном пристеночном слое жидкого металла приводит к концентрационному переохлаждению;

предельное переохлаждение жидкого металла при контакте с поверхностью покрытий из окислов металла в 2,5—3 раза меньше, чем при контакте с поверхностью формы из того же металла;

наличие конвективных потоков вблизи фронта кристаллизации способствует очистке поверхностного слоя от газовых и неметаллических включений. Скорость потоков пропорциональна температуре переохлаждения жидкого металла.

Таким образом, роль формовочных покрытий в образовании центров кристаллизации жидкого металла определяется химическими и кристаллографическими характеристиками материалов и геометрическими параметрами поверхности.

При разрушении материалов происходит разрыв химических связей между атомами смежных плоских сеток. Преимущественное разделение (разрушение) кристалла должно происходить между теми плоскими сетками (элементарными слоями), между которыми действуют сравнительно меньшие силы взаимного притяжения (сцепления).

Известно, что устойчивость центра кристаллизации зависит от критического радиуса кривизны $r_{кр}$ и отношения $\frac{\sigma_{пж} - \sigma_{пк}}{\sigma_{кж}} \cos \Theta$,

где Θ — равновесный краевой угол смачивания; $\sigma_{пж}$, $\sigma_{пк}$ и $\sigma_{кж}$ — свободные энергии поверхностей раздела покрытий и жидкого металла, покрытия и кристалла, кристалла и жидкого металла соответственно. Взаимосвязь между $r_{кр}$, Θ и ΔT показана на рис. 28. При увеличении шероховатости поверхности покрытий уменьшается краевой угол Θ согласно уравнению

$$\frac{(\sigma_{пж} - \sigma_{пк}) N_{ш}}{\sigma_{кж}} = \cos \Theta,$$

где $N_{ш}$ — коэффициент шероховатости покрытий (отношение истинной поверхности к гладкой). Увеличение шероховатости ($N_{ш} \rightarrow 1$) обуславливает зарождение центров кристаллизации при очень малых значениях Θ и ΔT .

Критерием кристаллизационной эффективности покрытий может быть отношение $\frac{\sigma_{пк}}{\sigma_{пж}}$. При кристаллохимическом соответствии твердых фаз оно меньше единицы или $\sigma_{пк} < \sigma_{пж}$. Эти положения подтверждаются анализом процесса зарождения центров кристаллизации на поверхности покрытия формы (рис. 29).

Интенсивность образования центров кристаллизации можно определить уравнением

$$\Delta Z_n = \Phi \Delta Z_c$$

где ΔZ_n — общее количество энергии, необходимое для образования устойчивого центра кристаллизации, или работа образования этого центра в зоне контакта отливки с формой (покрытием); ΔZ_c — количество энергии, необходимое для образования устойчивого центра кристаллизации при самопроизвольном процессе; Φ —

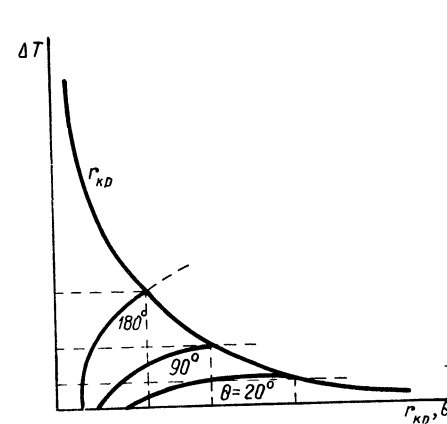


Рис. 28. Условие гетерогенного зарождения кристалла.

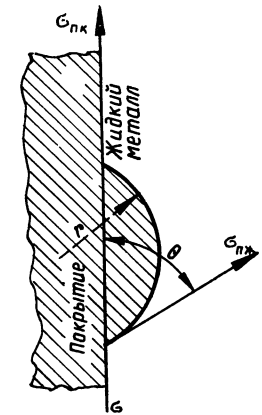


Рис. 29. Схема процесса смачивания покрытия жидким металлом.

постоянная величина для данной системы, зависящая от свойств покрытий и жидкого металла, $\Phi = \frac{(2 + \cos \Theta)(1 - \cos \Theta)^2}{4}$.

Если $\Theta = 180^\circ$, $\Delta Z_n = \Delta Z_c$, образование новой фазы происходит самопроизвольно. При $0 < \Theta < 180^\circ$, $\Delta Z_n < \Delta Z_c$ покрытие или неметаллические включения способствуют образованию центра кристаллизации в контактной зоне жидкого металла. При $\Theta = 0$, $\Delta Z_n = 0$, т. е. при полном химическом сродстве покрытия и образующейся кристаллической фазы, требуется минимальная затрата свободной энергии на образование центра кристаллизации в жидком металле.

Таким образом, при уменьшении краевого угла смачивания уменьшается поверхностная энергия на границе раздела между твердой фазой и покрытием и увеличивается вероятность образования центров кристаллизации на поверхности покрытий. Важность этого технологического положения заключается в том, что, регулируя количество активных центров, геометрию и плотность поверхности покрытий или облицовки литейной формы, можно стимулировать или тормозить рост кристаллов в поверхностном слое отливки.

Гомогенное зарождение центра кристаллизации требует температурного переохлаждения, которое составляет около $0,2 T_{пл}$ (табл. 10).

Возможное температурное переохлаждение до начала кристаллизации определяется выражением $\Delta T_{max} = \frac{Q}{c_p}$, где Q — скрытая теплота кристаллизации; c_p — теплоемкость твердой фазы при температуре плавления.

Таблица 10

Константа максимального переохлаждения металлов

Металл	$T_{пл}, ^\circ C$	$\Delta T_{max},$ град	$\frac{\Delta T_{max}}{T_{пл}}$	Металл	$T_{пл}, ^\circ C$	$\Delta T_{max},$ град	$\frac{\Delta T_{max}}{T_{пл}}$
Железо	1539	295	0,16	Никель	1455	319	0,18
Сурьма	630	140	0,16	Палладий	1563	332	0,18
Медь	1083	236	0,17	Платина	1773	370	0,18
Серебро	960	227	0,17	Германий	959	227	0,18
Золото	1067	230	0,17	Олово	232	115	0,2
Висмут	271	90	0,17	Алюминий	660	195	0,2
Кобальт	1495	330	0,18				

По современным представлениям, мелкокристаллическая зона поверхностного слоя отливки образуется на поверхности литейной формы из переохлажденного жидкого металла, размер ее тесно связан с температурой переохлаждения (табл. 11).

Величина переохлаждения жидкого металла вблизи поверхности покрытий зависит главным образом от их кристалличе-

Таблица 11

Влияние условий кристаллизации на переохлаждение и размер зерен металлов (диаметр образца 10 мм)

Металл	Условия кристаллизации	Переохлаждение, град	Размер зерна, мм
Висмут	Объемная	35—40	3,5×4*
	На подложке из трехокси висмута	12—13	0,3×0,5*
Свинец	Объемная	7—8	4×4*
	На подложке из окиси свинца	3—4	0,4×0,7*
Свинцово-сурьмянистый сплав	Объемная	10—12	4×4
	На подложке из окиси свинца	3—4	0,5×0,7
Сурьма	Объемная	30—36	3,8×4
	На подложке из сурьяного ангидрида	4—5	0,6×0,6
Железо (армко)	На подложке из окиси циркония	—	0,04×0,04
	циркона	—	0,32×0,32

* Данные Д. Е. Овсиенко [68].

ской характеристики: чем больше кристаллохимическое сродство металла и покрытия, тем меньше переохлаждение кристаллизующегося металла.

Исследование процессов кристаллизации поверхностного слоя отливок в контакте с покрытиями рационально производить на автоматизированной вакуумной высокотемпературной

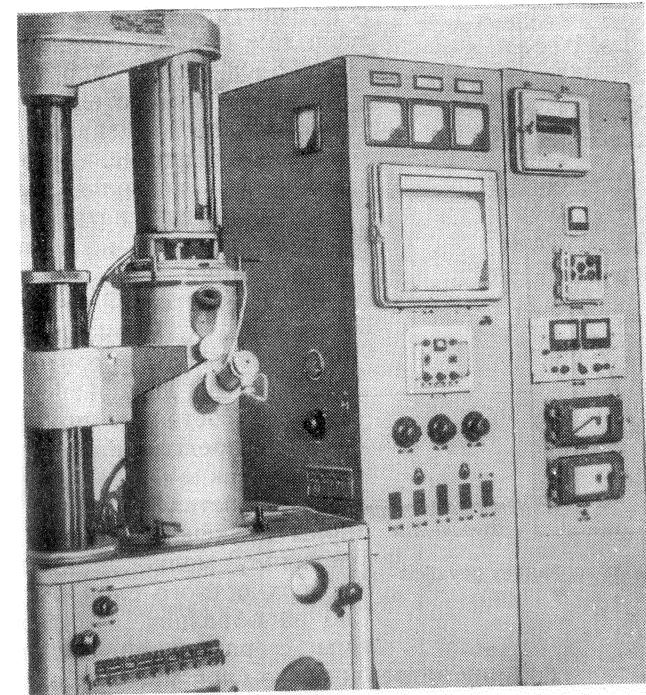


Рис. 30. Вакуумная высокотемпературная установка «Редмет-1».

установке «Редмет-1», состоящей из вакуумной электропечи с нагревателем сопротивления, системы вакуумных насосов и системы управления процессом (рис. 30). Покрытие толщиной 0,5—1 мм напыляется на графитовую пластину (зонд), которая автоматически по заданной программе вынимается из расплавленного металла, имеющего температуру на 35 град выше температуры его плавления. При охлаждении на поверхности покрытия кристаллизуется металл.

Запись кривых плавления и охлаждения металла производится на диаграммную ленту электронного потенциометра. Было изучено влияние переохлаждения жидкого металла на макро- и микронеоднородность, образование продуктов взаимодействия и поверхностных дефектов, а также на другие характеристики.

Выбор покрытий основан на изучении кристаллической структуры, размерного соответствия параметров решетки, природы поверхности кристаллов, формы и размера зерна, влагоемкости и других факторов, влияющих на кристаллизацию поверхностного слоя литого образца [11, 64—66].

Изменение теплофизических свойств материала формы значительно влияет на температурный градиент ΔT и продолжительность затвердевания τ_3 металла; при затвердевании в песочно-глинистой форме τ_3 больше, а ΔT значительно меньше, чем при затвердевании в металлической форме. Применение покрытий позволяет регулировать кинетику затвердевания и переохлаждение на фронте кристаллизации.

В соответствии с исследованиями Д. К. Чернова [67], продолжительность перехода сплавов через двухфазное жидкотвердое состояние при затвердевании определяет основные технологические и эксплуатационные свойства отливок. Влияние зоны двухфазного состояния на величину мелкокристаллического поверхностного слоя было изучено на образцах, отлитых в формы с различной охлаждающей

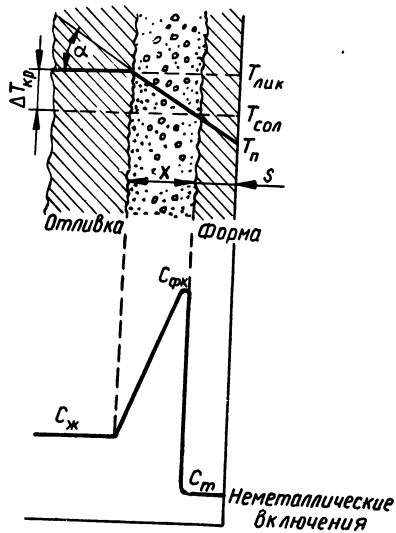


Рис. 31. Формирование двухфазной зоны.

способностью. Толщину затвердевшего слоя металла определяли методом выливания незатвердевшего остатка жидкого металла, используя зависимость $\delta_{км} = k_3 \beta$, где $\delta_{км}$ — толщина затвердевшей корки металла, мм; k_3 — коэффициент затвердевания, для сухих форм $k_3 = 0,008$ м/ч^{1/2}; для сырых — 0,045 м/ч^{1/2}; для металлических — 0,255 м/ч^{1/2}; β — коэффициент охлаждающей способности, ккал/м² · °С · ч^{1/2}.

По толщине слоя затвердевшего металла и его температуре на поверхности контакта с формой можно графически определить угол наклона кривой равновесной температуры затвердевающего металла. Пересечение этой кривой с фронтом кристаллизации дает точку солидус, а пересечение этой линии с температурой ликвидус определяет размер двухфазной зоны (рис. 31).

Увеличение коэффициента тепловой аккумуляции покрытий начинает оказывать влияние на размер двухфазной зоны металла со 2—3-й минуты затвердевания, т. е. главным образом в период формирования столбчатой структуры. В период обра-

зования мелкокристаллического слоя отливки размер двухфазной зоны металла стремится к нулю. Для тонкостенного литья главным фактором, влияющим на уменьшение зоны двухфазного состояния металла, являются кристаллохимические свойства покрытий. Скорость кристаллизации отливок из стали в формах с различной теплоаккумуляционной способностью по данным различных исследователей приведена в табл. 12.

Таблица 12

Скорость кристаллизации стали, м/ч

Литейная форма	Экспериментальная	Расчетная	Литературный источник	
Песочная (сухая)	0,031	0,045	[28]	
	0,031	—	[69]	
	0,055	—	[70]	
	0,054	—	[71]	
Песочная (сырая)	0,044—0,06	0,081	[28]	
	0,045	—	[69]	
	0,095	—	[30]	
	0,070	—	[72]	
Пеноглинистая и перлитовая	0,01—0,015	—	[28]	
Комбинированная (чугунный кокиль со стержнем)	0,12—0,18	0,15	[70]	
	0,17—0,20	—	[73]	
Металлическая			[28]	
	медная	0,13—0,38	—	
	алюминиевая	0,34	—	
	стальная	0,28—0,30	—	
Чугунная изложница	0,024	0,055	[71]	
	0,24—0,25	0,25	[25]	
	0,23	—	[30]	
	0,25	—	[74]	

Жидкий металл содержит в растворенном состоянии углерод, кремний, марганец, фосфор, серу, хром, алюминий, водород, азот, кислород и их соединения. Все компоненты жидкого металла находятся в атомарно-ионном состоянии и обладают большой кинетической энергией колебательного и поступательного движения. При тепловом взаимодействии с формой температура жидкого металла снижается и вследствие уменьшения растворимости из металла выделяются газы, количество которых зависит от исходных материалов и режима плавки. Например, при электроплавке выделяется водорода 0,00005—0,082%, азота 0,002—0,20%, кислорода 0,0008—0,1%.

При высокой температуре атомарные и ионизированные газы имеют повышенную активность химического взаимодействия с материалом формы. Нашими исследованиями установлено, что при взаимодействии валентно-насыщенных центров покрытий, имеющих отрицательный заряд, с катионами железа.

марганца, хрома, никеля и других металлов образуются химические соединения, при взаимодействии с анионами этих металлов — твердые растворы и механические смеси.

Субмикроскопические и микроскопические продукты взаимодействия типа нитридов, окислов, гидридов, сульфидов и других химических соединений, имеющие большую прочность и высокую температуру плавления, образуются в первый период кристаллизации и во многих случаях благоприятно влияют на формирование мелкокристаллической структуры поверхностного слоя и, следовательно, на нейтрализацию и уменьшение вредного влияния дислокаций и вакансий на свойства отливки. Поскольку в первый период кристаллизации в жидком металле имеются интенсивные потоки, т. е. сильно развита диффузия элементов, в зоне контакта создаются исключительно благоприятные условия для протекания избирательной кристаллизации. В этих условиях центрами кристаллизации могут быть кроме активных участков покрытий тугоплавкие компоненты жидкого металла и химические соединения (MeN, MeS, MeO и др.), образовавшиеся при взаимодействии жидкого металла с покрытием формы.

Образование и рост центров кристаллизации под влиянием химически активных центров, обуславливающих протекание поверхностных реакций, описывается уравнением Аррениуса

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{E}{RT^2},$$

или

$$\ln K_m = \ln A - \frac{E_{ак}}{RT},$$

где K_m — коэффициент массопереноса, $K_m = K_d - K_p$; K_d — коэффициент массопереноса диффузией; K_p — константа скорости поверхностной реакции; T — абсолютная температура, при которой протекает образование или рост центров кристаллизации; $E_{ак}$ — энергия активации процесса образования и роста центров кристаллизации.

На форму и размер кристаллов большое влияние оказывает ориентационный эффект, т. е. кристаллографическая ориентация кристаллов, обусловленная природой и типом решетки кристаллических порошков, наполнителей и добавок, входящих в состав покрытий (табл. 13). Экспериментально доказано, что ориентационный эффект проявляется с большей силой при уменьшении разницы параметров кристаллических решеток контактирующих материалов (рис. 32). Наличие в составе покрытий катионов Al^{3+} , Cr^{3+} , Zr^{4+} , Ti^{4+} и др. эффективно влияет на модифицирование зерна металла. Большое количество активных центров на поверхности покрытий способствует образованию мелких кристаллов. При уменьшении дисперсности искусствен-

ных центров кристаллизации резко уменьшается размер кристаллов. При контакте затвердевающего металла отливки с покрытием формы компоненты покрытия и образующиеся продукты взаимодействия интенсивно адсорбируются поверхностью или диффундируют в глубь поверхностного слоя отливки. Адсорбция поверхностно-активных веществ разупрочняет поверхностный слой металла (эффект Ребиндера). Образование мел-

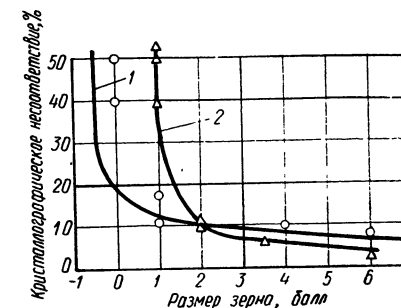


Рис. 32. Зависимость структуры литых образцов от несоответствия параметров кристаллических решеток покрытий и металла отливки:
1 — армо-железо; 2 — хромоникелевая сталь.

Изменение химического состава поверхностного слоя по отношению к внутренним слоям отливки происходит, кроме того, под влиянием избирательной кристаллизации, которая преобладает в начальный период затвердевания.

Наиболее активное каталитическое воздействие на зародышеобразование при кристаллизации армо-железа оказывают бадделит, магнезит и в несколько меньшей степени — циркон

Таблица 13

Влияние кристаллохимических свойств материалов формовочных покрытий на размер зерна в поверхностном слое отливки

Материал покрытия	Удельная поверхность, см ² /см ³ ·10 ⁴	Кристаллографическое несоответствие, %	Средний размер зерна образцов		
			Армо-железо, балл	Сталь, балл	Сплав ЮНДК25БА, см
Магнезит	3,42	1,36	5—6	4	0,07
Бадделит	2,90	7,1	5—6	6	0,1
Карборунд	0,89	10,0	4	3	0,11
Циркон	3,14	12,1	2	2	0,28
Дистен	2,84	39,0	—1	1	—
Корунд	3,0	—	0	0	0,34
Маршалит	3,21	—	0	2	0,31
Оксид хрома	11,5	—	0	1	0,32

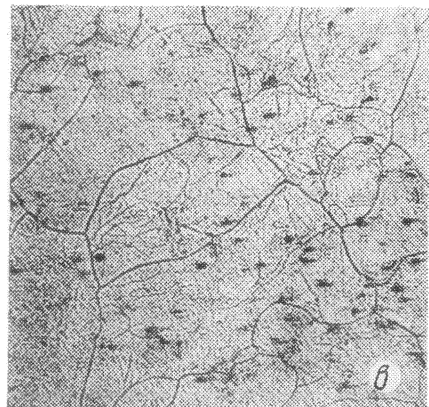
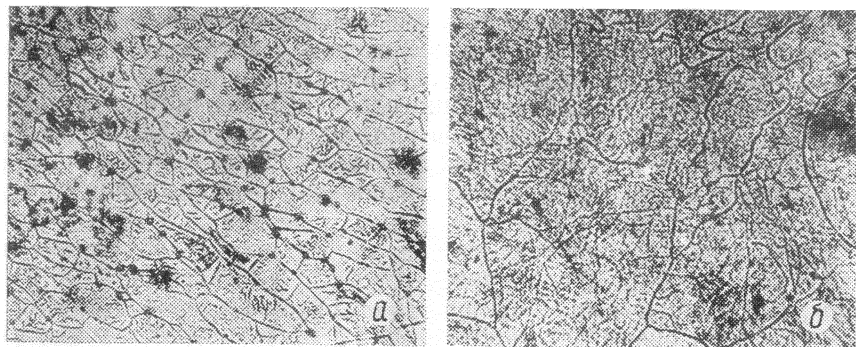


Рис. 33. Микроструктура поверхностного слоя образцов из армо-железа, полученных в формах из различных материалов ($\times 100$):
а — бадделейт; б — магнезит; в — циркон.

(рис. 33). Такое же влияние оказывают эти материалы на формирование поверхностного слоя отливок из стали (табл. 14).

Дисперсность компонентов специальных добавок играет важную роль в протекании физико-химических процессов; наиболее оптимальной является дисперсность менее 50 мкм.

Таблица 14

Влияние материала покрытий форм на свойства структурных зон стальных отливок

Материал покрытий	Поверхностная зона			Равноосная зона	
	Толщина, мм	Твердость, HRC	Величина зерна, балл	Твердость, HRC	Величина зерна, балл
Графит	5	90	8	88	7
Бадделейт	5	90	8	87	7
Магнезит	5	89	8	87	7
Циркон	5	88	7—6	86	6
Корунд	4	86	7	86	7—6
Маршалит	3,5	87	6	87	6—5
Асбест	3	85	6	87	7

Добавка легирующе-модифицирующих компонентов в состав формовочных покрытий оказывает значительное влияние на интенсивность кристаллизации и свойства поверхностного слоя отливки (табл. 15).

Таблица 15

Влияние легирующих добавок в состав цирконовых покрытий на кристаллизацию отливок

Элемент	Содержание в отливке, %	Изменение свойств поверхностного слоя отливки	Толщина поверхностного слоя металла, мм
Цирконий	0,2	Интенсифицируется кристаллизация, повышаются жаростойкость, износостойчивость и сопротивление коррозии	0,2
Церий	0,1—0,2	Улучшается структура и повышается прочность металла	0,2
Бериллий	0,2—0,5	Интенсифицируется кристаллизация, повышаются жаростойкость, механическая прочность и сопротивление коррозии	0,55
Теллур	0,004—0,15	Интенсифицируется кристаллизация	1,5

Теллур является поверхностно-активным элементом по отношению к железу, значительно измельчает дендритную структуру и способствует равноосности дендритов (табл. 16). Модифицирующее действие теллура проявляется даже при минимальном его содержании в покрытиях (меньше 0,0003%). Эффект увеличения плотности структуры поверхностного слоя отливки

Таблица 16

Влияние добавок теллура в состав цирконовых покрытий на структуру отливок из серого чугуна

Количество теллура в покрытии, %	Изменение структуры поверхностного слоя отливки	Толщина поверхностного слоя, мм	Твердость поверхностного слоя, HB
25,0	Устраняются усадочные раковины и образуется отбел	До 50	670
5,0	То же	До 15	675
1,0	Увеличивается плотность структуры	5—8	420
0,2	То же	1,5	420
0,04	» »	0,5—1,0	415
0,08	» »	0,1—0,2	283
0,0016	» »	0,03	251
0,0003	» »	0,01	237

заметно проявляется уже при содержании теллура 0,08% (твердость 283 *HВ*) и достигает наибольшего значения при содержании 0,04—0,2% (твердость 415—420 *HВ*).

Хром, ванадий и вольфрам повышают жаростойкость, теплоустойчивость и коррозионную стойкость изделий (табл. 17). Цирконий также повышает жаростойкость и теплоустойчивость, интенсифицирует процесс кристаллизации, увеличивает сопротивление коррозии.

Таблица 17

Влияние цирконового покрытия, содержащего редкие металлы, на структуру и свойства отливок из серого чугуна

Элемент	Содержание, %	Изменение свойств поверхностного слоя отливок	Глубина поверхностной зоны, мм
Цирконий	0,05—0,2	Интенсифицируется кристаллизация, повышаются жаростойкость, износоустойчивость и сопротивление коррозии	До 0,2
Бериллий	0,1—0,5	То же	До 0,2
Церий	0,05—0,2	Улучшается структура и повышается прочность металла	До 0,2
Алюминий	0,1—1,0	Повышаются прочность и коррозионная стойкость (окалиностойкость)	До 1,5
Хром	0,2—2,0		
Ванадий	0,2—2,0		
Вольфрам	0,2—2,0		
Никель	1,0—2,0		
Титан	0,2—2,0		
Медь	1,0—2,0		
Теллур	0,0003	Интенсифицируется кристаллизация, образуются тонкая цементитная сетка или мелкие вкрапления цементита	До 1,5
Сера	0,0025		

Физико-химический анализ реакций взаимодействия редкоземельных металлов (РЗМ) и других легирующе-модифицирующих добавок, входящих в состав покрытий форм, с жидким металлом дает возможность выяснить условия, которые способствуют или препятствуют их протеканию.

Обладая высоким сродством к сере, кислороду и водороду, РЗМ связывают их в тугоплавкие соединения и способствуют удалению из металла. Часть окислов в виде микроскопических кристаллов может служить дополнительными центрами кристаллизации, остальные офлюсовываются, образуя силикаты и другие соединения. Взаимодействие РЗМ с серой, газами и прочими примесями, находящимися в жидком металле, определяет их положительное влияние на дисперсность, форму и распределение неметаллических включений.

При получении отливок магнитов из высокоэрицидных сплавов требуется формирование направленной крупнозернистой структуры с минимальным слоем мелких кристаллов. В результате изучения керамических форм при получении отливок из

высокоэрицидных сплавов установлено, что формы на основе электрокорунда и магнезита характеризуются максимальной прочностью и обеспечивают минимальный слой мелкозернистой структуры (рис. 34).

При взаимодействии отливки с формой большое значение имеет диффузия элементов. Опыты А. Н. Цибрика по изучению диффузионного насыщения образцов из армо-железа в специ-

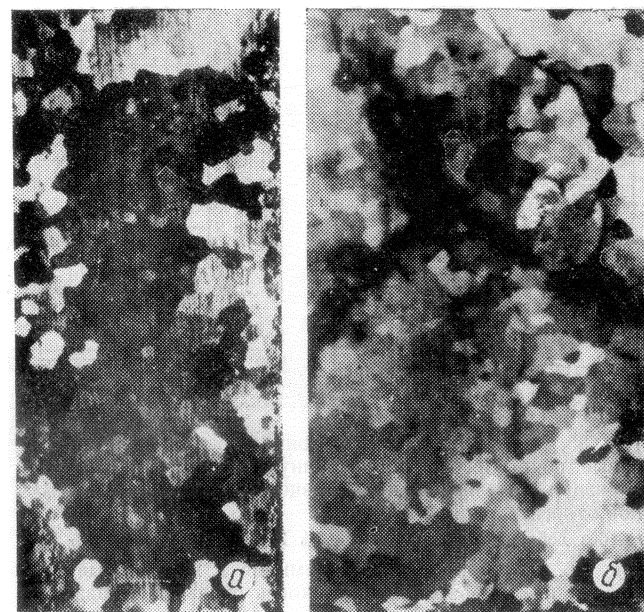


Рис. 34. Микроструктура отливок из сплава ЮНДК25БА в сечении, перпендикулярном к направленности кристаллов, полученных в маршалитовых (а) и цирконовых (б) формах.

альных контейнерах с индукционным нагревом и регулируемой средой показали, что в условиях высокой температуры (1000—1300° С) происходит чрезвычайно быстрое насыщение образцов газами (табл. 18). При насыщении воздуха парами воды и добавлении азота в газовую среду скорость газового насыщения образцов увеличивается в пять-шесть раз.

Результаты экспериментов позволяют объяснить природу и высокие антикоррозионные свойства литого поверхностного слоя отливок гильз и реакторов. Дело в том, что самозащита металла от внешней агрессивной среды обеспечивается во многих случаях еще при формировании отливки путем образования на ее поверхности защитного химического (окисного или нитридного) покрытия. Использование покрытий с заданными свойствами

улучшает прочностные и другие свойства поверхностного слоя отливок гильз и реакторов и исключает коррозию охлаждаемых поверхностей (рис. 35—38). Путем изменения состава и строения контактирующих с металлом слоев формы представляется

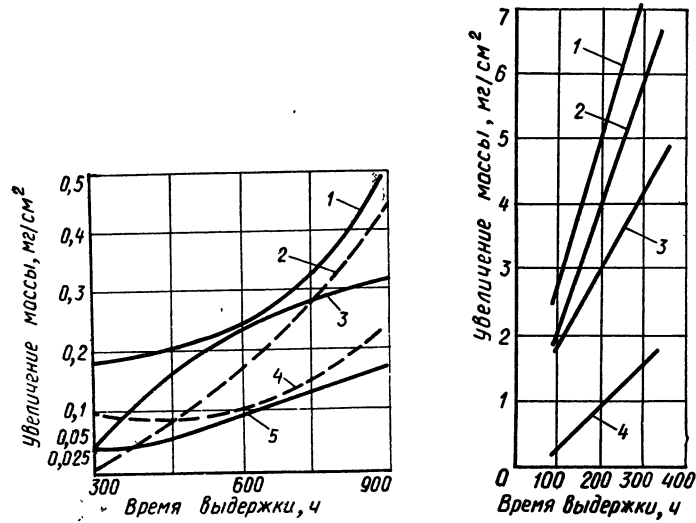


Рис. 35. Влияние добавок циркония и бериллия в цирконовые покрытия на коррозионную стойкость стальных образцов при выдержке образцов в атмосфере 100%-ной относительной влажности:
1 — без добавки; 2 — 2% Be; 3 — 2% Zr; 4 — 4% Be; 5 — 4% Zr.

Рис. 36. Влияние добавок алюминия в цирконовые покрытия на коррозионную стойкость стальных образцов, при выдержке в 3%-ном растворе NaCl:
1 — без добавки; 2 — 2% Al; 3 — 4% Al; 4 — 8% Al.

возможным осуществлять регулирование процессов физико-химического взаимодействия в контактной зоне для получения отливок с заданными свойствами [75, 76].

Согласно современным представлениям перед фронтом кристаллизации имеется зона жидкого металла, в которой увели-

Таблица 18

Растворимость газов в чистом железе

Газ	Температура, °С	Содержание в железе	Уменьшение растворимости в железе при кристаллизации
Кислород	1250	0,160	В 2,9 раза
Азот	1535	0,0394	» 3,17 »
Водород	1550	0,0025	» 3,5 »
Сера	1540	1,260	—
Углерод	1540	6,0	—

чено содержание примесей (рис. 39). По данным У. Вайнгарда [77], при скорости кристаллизации более 20 см/ч скорость образования загрязненной зоны металла на один порядок больше, чем при скорости кристаллизации 2 см/ч. Перед плоским фронтом кристаллизации указанный слой более обогащен примесями, чем перед ячейисто-дендритным [68, 77], причем плоский

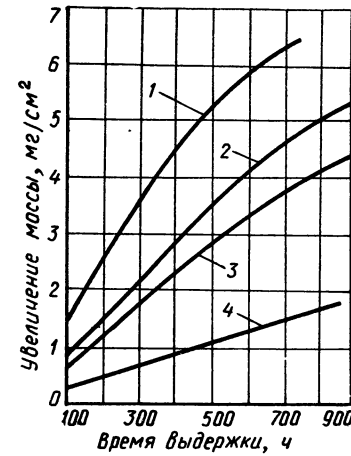


Рис. 37. Влияние добавок циркония в цирконовые покрытия на коррозионную стойкость стальных образцов:
1 — без добавки; 2 — 2% Zr; 3 — 4% Zr; 4 — 8% Zr.

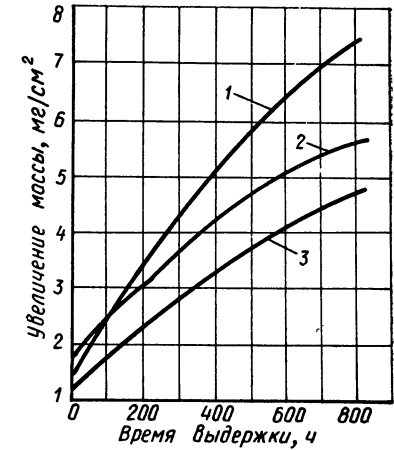


Рис. 38. Влияние добавок никеля в цирконовые покрытия на коррозионную стойкость стальных образцов при выдержке образцов в 3%-ном растворе NaCl:
1 — без добавки; 2 — 6% Ni; 3 — 10% Ni.

фронт устойчив только при определенном соотношении градиента температур жидкого металла и скорости кристаллизации.

Особенно большой температурный градиент в жидком металле создается в период формирования поверхностной мелкокристаллической зоны. В сочетании с высоким коэффициентом диффузии конвективные потоки обеспечивают обильное питание фронта кристаллизации жидким металлом и интенсивный отвод оттесненных макро- и микропримесей. Это положение подтверждается минимальным количеством неметаллических и газовых включений в поверхностном слое отливки (рис. 40).

Известно, что при образовании поверхностного слоя в нем возникают растягивающие напряжения и возможно образование микротрещин. Но при кристаллизации последующих глубинных слоев отливки указанные дефекты зачищаются, что обусловлено образованием в поверхностном слое на этих стадиях напряжений сжатия (эффект Иоффе).

Однако при увеличении двухфазной зоны и формировании

плотного диффузионного (загрязненного макро- и микропримесями) слоя поступление жидкого металла к фронту кристаллизации затруднено и, следовательно, рост мелкокристаллического слоя отливки сдерживается или приостанавливается. Экспериментальными исследованиями в этой области было установлено,

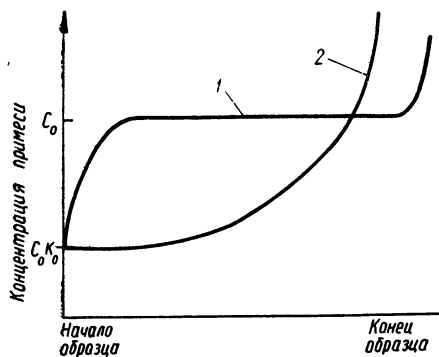


Рис. 39. Распределение концентрации примеси вдоль образца, закристаллизовавшегося в различных условиях [23]:

1 — при переносе жидкости только в результате диффузии; 2 — при полном перемешивании жидкости.

что при увеличении скорости разливки и повышении интенсивности конвективных потоков жидкого металла в форме происходит увеличение мелкокристаллической поверхностной зоны отливки (см. рис. 31).

По-видимому, большая скорость разливки и турбулентный режим движения жидкого металла создают мощные конвективные потоки вблизи фронта кристаллизации, которые смывают (разрывают) блокирующий диффузионный слой, уменьшают ширину двухфазной зоны и таким образом увеличивают зону мелких кристаллов. Как показали опыты, повышение температуры жидкого металла уменьшает, а повышение скорости разливки увеличивает количество центров кристаллизации перед фронтом кристаллизации. Применение теплоизоляционных и металлофобных покрытий и облицовок снижает температурный градиент в жидком металле, а применение теплопроводных и металлофильных — повышает его.

По данным В. А. Ефимова [78], процесс формирования кристаллических зон отливки сопровождается интенсивным движением расплава в ее незатвердевшей части. Это положение вытекает из основных представлений о кристаллизации, поскольку перераспределение и выделение примесей является основой процессов тепломассопереноса (диффузии) и кристаллизации жидкого металла.

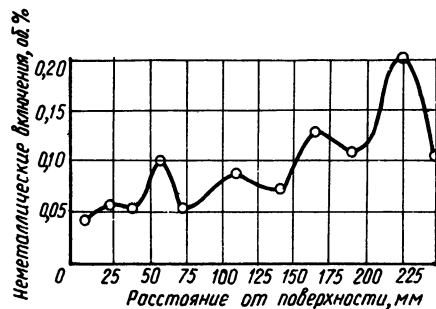


Рис. 40. Распределение неметаллических включений в поперечном сечении слитка из спокойной стали [25].

2. Отвод тепла при кристаллизации металла

Зарождение центров кристаллизации, рост кристаллов, вязкость, степень насыщения компонентами жидкого металла определяются энергическим состоянием системы отливка — форма и в большей степени теплообменом между отливкой и формой.

В работах Г. П. Иванцова [74], Б. Б. Гуляева [30] и других исследователей отмечается, что точное аналитическое решение задачи кристаллизации принадлежит к числу так называемых нелинейных задач, методы решения которых еще недостаточно разработаны современной математикой.

Температурное поле в отливке и форме описывается дифференциальными уравнениями теплопроводности:

в твердой части отливки ($x < \zeta$)

$$\frac{\partial T_{\tau}}{\partial t} = a_{\tau} \frac{\partial^2 T_{\tau}}{\partial x^2}; \quad (15)$$

в стенке литейной формы ($x < 0$)

$$\frac{\partial T_{\phi}}{\partial t} = a_{\phi} \frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial x^2}; \quad (16)$$

на поверхности формы и отливки ($x = 0, t = 0$)

$$T_{\tau} = T_{\pi} = T_{\phi};$$

$$\lambda_{\tau} \left(\frac{\partial T_{\tau}}{\partial x} \right)_{x < \zeta} = \lambda_{\phi} \left(\frac{\partial T_{\phi}}{\partial x} \right)_{x < 0}; \quad (17)$$

на границе затвердевания ($x = \zeta, t = 0$)

$$T_{\text{ж}} = T_{\text{к}} = T_{\tau}.$$

В этих уравнениях a_{ϕ}, a_{τ} — коэффициенты теплопроводности формы и отливки, $\text{м}^2/\text{ч}$; $\frac{\partial T_{\tau}}{\partial t}, \frac{\partial T_{\phi}}{\partial t}$ — производные, характеризующие

скорость изменения температуры во времени; $\frac{\partial T_{\tau}}{\partial x}, \frac{\partial T_{\phi}}{\partial x}$ — тем-

пературные градиенты по толщине; $\frac{\partial^2 T_{\tau}}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial x^2}$ — производные из-

менения температурного градиента в пространстве; x — координата (нормаль) по толщине; $\lambda_{\phi}, \lambda_{\tau}$ — коэффициенты теплопроводности формы и отливки, $\text{ккал}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$; T_{π} — температура поверхности контакта отливки и формы, °C ; $T_{\text{к}}$ — температура кристаллизации металла, °C ; T_{ϕ} — температура литейной формы, °C ; T_{τ} — температура в затвердевшей корке металла, °C .

В результате аналитического решения указанных дифференциальных уравнений теплопроводности получаем следующие значения температурных градиентов:

в затвердевшей части отливки

$$\left(\frac{\partial T_T}{\partial x}\right)_{x < \xi} = \frac{T_K - T_H}{\Phi} \frac{k}{\sqrt{4a_T}} \frac{e^{-\frac{K^2}{4a_T}}}{\sqrt{\pi a_T t}}; \quad (18)$$

в стенке литейной формы

$$\left(\frac{\partial T_\Phi}{\partial x}\right)_{x \leq 0} = T_H - T_H \frac{e^{-\frac{K^2}{4a_\Phi}}}{\sqrt{\pi a_\Phi t}}, \quad (19)$$

где $\frac{K}{\sqrt{4a_T}}$ — функция Гаусса; T_H — начальная температура стенки формы, °C.

Количество тепла, проходящее через корку к поверхности контакта отливки и формы:

$$dQ_0 = -\frac{\lambda_T}{\sqrt{\pi a_T}} \frac{T_K - T_H}{\Phi \left(\frac{K}{\sqrt{4a_T}}\right)} F_K \frac{dt}{\sqrt{t}}. \quad (20)$$

Количество тепла, отдаваемое отливкой с поверхности контакта в течение конечного промежутка времени, находится интегрированием в пределах от нуля до t :

$$\begin{aligned} Q_0 &= \frac{2\lambda_T}{\sqrt{\pi a_T}} \frac{T_K - T_H}{\Phi \left(\frac{K}{\sqrt{4a_T}}\right)} F_K \sqrt{t} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\lambda_T}{\sqrt{a_T}} \frac{T_K - T_H}{\Phi \left(\frac{K}{\sqrt{4a_T}}\right)} F_K \sqrt{t} = \\ &= 1,13b_0 \frac{T_K - T_H}{\Phi \left(\frac{K}{\sqrt{4a_T}}\right)} F_K \sqrt{t}, \end{aligned} \quad (21)$$

где b_0 — коэффициент тепловой аккумуляции материала отливки, ккал/м²·°C·ч^{1/2}, $b_0 = \frac{\lambda_T}{\sqrt{a_T}} = \sqrt{c_T \gamma_T \lambda_T}$; c_T — теплоемкость металла, ккал/кг·°C; γ_T — плотность металла отливки, кг/м³; F_K — поверхность контакта отливки и литейной формы, м².

Анализ уравнения [60] показывает, что чем больше значение коэффициента b_0 , тем больше будет отведено тепла от границы затвердевания жидкого металла и передано к поверхности контакта отливки и формы, тем при прочих равных условиях будет больше тепловой напор на поверхность контакта и тем быстрее будет происходить выравнивание тепла в металлической корке (стенке) отливки.

Количество тепла, поступающее в глубь плоской стенки литейной формы за время затвердевания и охлаждения отливки,

находится аналогично изложенному выше:

$$\begin{aligned} Q_\Phi &= \frac{\lambda_\Phi}{\sqrt{\pi a_\Phi}} (T_H - T_H) F_K \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\lambda_\Phi}{\sqrt{a_\Phi}} (T_H - T_H) F_K \sqrt{t} = \\ &= 1,13b_\Phi (T_H - T_H) F_K \sqrt{t}. \end{aligned} \quad (22)$$

Наши опыты показали, что при прочих равных условиях увеличение глубины и скорости прогрева стенки формы может быть достигнуто в результате увеличения коэффициента b_0 . Принимаем, что чем больше значение указанного коэффициента, тем глубже, равномернее и быстрее прогревается форма, тем больше скорость затвердевания и охлаждения отливки.

Как известно, на поверхности контакта отливки и формы справедливо уравнение теплового баланса $Q_0 = Q_\Phi$. Подставляя их значения и решая уравнение относительно перепада температур, будем иметь

$$\frac{T_K - T_H}{T_H - T_H} = \frac{b_\Phi \Phi \left(\frac{K}{\sqrt{4a_T}}\right)}{b_0}. \quad (23)$$

Из уравнения вытекает интересное и очень важное для практики положение о температурных перепадах. Как видно из уравнения (23), значение температурных перепадов в отливке ($T_K - T_H$) и в форме ($T_H - T_H$) устанавливается в зависимости от их теплофизических свойств, т. е. величина их обратно пропорциональна значениям коэффициентов b_Φ (рис. 41).

Математическое преобразование уравнения позволяет определить среднее значение температуры поверхности контакта отливки и литейной формы. Температура поверхности контакта отливки и формы T_H имеет большое значение для практики: чем ниже T_H , тем быстрее происходит затвердевание и охлаждение отливки.

Как отмечалось выше, теплообмен между отливкой и формой в большой мере зависит от совместного влияния их теплофизических свойств:

$$\beta = \frac{b_0 b_\Phi}{b_0 + b_\Phi \Phi \left(\frac{K}{\sqrt{4a_T}}\right)}. \quad (24)$$

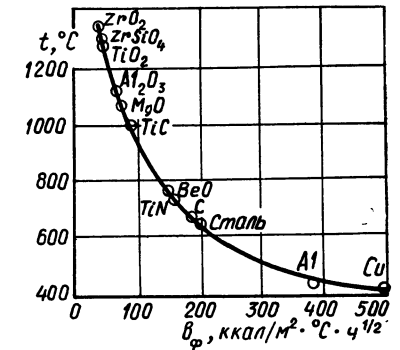


Рис. 41. Зависимость температуры контакта титана с формой от теплоаккумулирующей способности формы.

Точные расчеты показали, что для условий $b_o \gg b_\phi$ материал отливки и функция $\Phi\left(\frac{K}{\sqrt{4a_T}}\right)$, характеризующая процесс кристаллизации, не влияют на величину β . Анализируя эту величину, видим, что она представляет собой соотношение коэффициентов, определяющих тепловой поток при затвердевании и охлаждении отливок, поэтому β можно принять за коэффициент, определяющий теплообмен между отливкой и формой и учитывающий комплексное влияние свойств материала отливки и формы. Коэффициент β характеризует интенсивность отвода тепла от поверхности отливки и литейной формы. Поэтому он может быть мерой охлаждающей способности литейной формы.

Аналитический анализ уравнений показывает, что значение коэффициента β всегда будет меньше самого малого из коэффициентов b_o и b_ϕ . Из зависимости $\beta=f(b_o, b_\phi)$ можно видеть, что эффективное увеличение коэффициента происходит путем изменения значений меньшего коэффициента и лишь до тех пор, пока оба коэффициента не станут равными. Практически величину коэффициента охлаждающей способности формы можно регулировать, варьируя состав формовочно-стержневых смесей и исходных материалов формы (см. рис. 41).

Рассмотренные закономерности охлаждения отливок в условиях литейных форм являются исходными и распространяются на однослойные литейные формы, т. е. на формы без покрытий, копоти, припыла и других защитных (изоляционных) поверхностных прослоек.

Как известно, металлические и сухие неметаллические литейные формы всегда имеют поверхностный защитный слой (припыл, сажевую копоть или специальные покрытия), который резко изменяет характер теплообмена между отливкой и формой. Поэтому при рассмотрении процессов теплообмена и охлаждающей способности литейной формы необходимо учитывать термическое сопротивление

$$\frac{\beta_x}{\beta} = \frac{1}{1 + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \beta},$$

где δ_n — толщина покрытия формы, м; λ_n — коэффициент теплопроводности покрытия, ккал/м·ч·°С; $\frac{\delta_n}{\lambda_n}$ — термическое сопротивление защитного слоя формы.

Из данного уравнения видно, что с возрастанием термического сопротивления защитного слоя коэффициент охлаждающей способности формы снижается.

Анализ показывает, что поток тепла в поверхностном слое формы в начале взаимодействия с жидким металлом практически определяется термическим сопротивлением контактного слоя $\frac{\delta_n}{\lambda}$, так как прогрев формы в этой стадии очень мал.

Основными параметрами, определяющими тепловой поток через единицу поверхности формы в единицу времени, являются факторы интенсивности, характеризующиеся разницей температур поверхности контакта и формы ($T_n - T_\phi = \Delta T$), и емкости, характеризующиеся коэффициентом тепловой аккумуляции ($b_\phi = \sqrt{c_\phi \lambda_\phi \gamma_\phi}$) контактной зоны формы и величиной поверхности отливки.

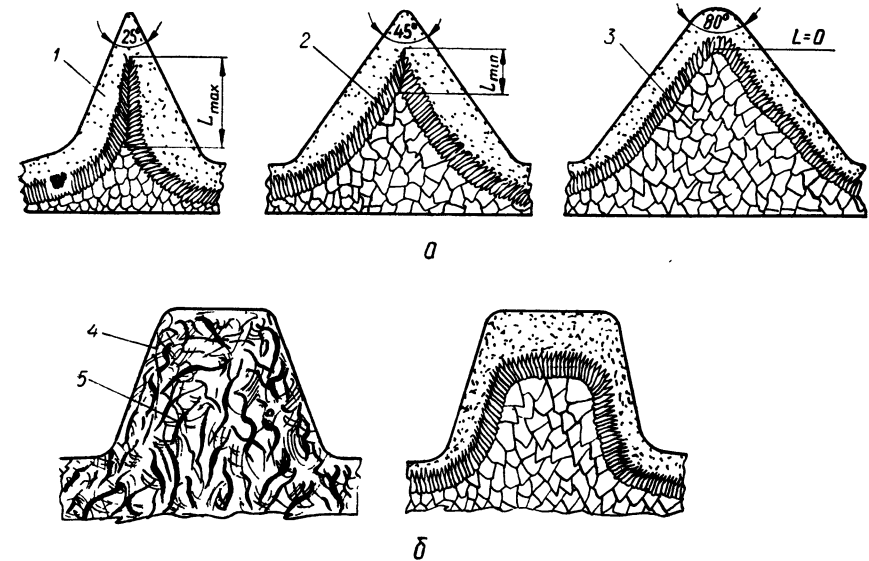


Рис. 42. Влияние профиля орнамента на структуру поверхностного слоя отливки: а — остроугольные выступы: 1 — зона мелких кристаллов; 2 — зона столбчатых кристаллов; 3 — зона равноосных кристаллов; б — усеченные выступы: 4 — феррит+графит; 5 — перлит+графит.

Согласно исследованиям [79], время охлаждения отливки обратно пропорционально удельной поверхности в первой степени, а время ее затвердевания обратно пропорционально удельной поверхности во второй степени. Следовательно, при увеличении удельной поверхности $S_{уд}$ значительно возрастает скорость затвердевания и создаются благоприятные условия для образования мелкокристаллической зоны. При увеличении удельной поверхности отливок путем образования на плоской поверхности многогранников, овальных впадин, выступов и других геометрических фигур увеличивается удельное количество зоны отливки с характерной мелкозернистой структурой. С изменением угла профиля выступов от 25 до 80° величина мелкозернистой зоны уменьшается от 60 до 25%. Зона стыка столбчатых кристаллов также уменьшается, а при угле более 80° и усеченном профиле полностью исчезает (рис. 42, 43).

Подбирая материалы с различной тепловой аккумуляцией, можно создать высокоэффективные теплопроводные ($b \geq 30$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}) или теплоизоляционные ($b \leq 5$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}) покрытия литейных форм, позволяющие для каждого значения $S_{уд}$ обеспечить оптимальную скорость охлаждения, затвердевания и протекания заданных термодиффузионных про-

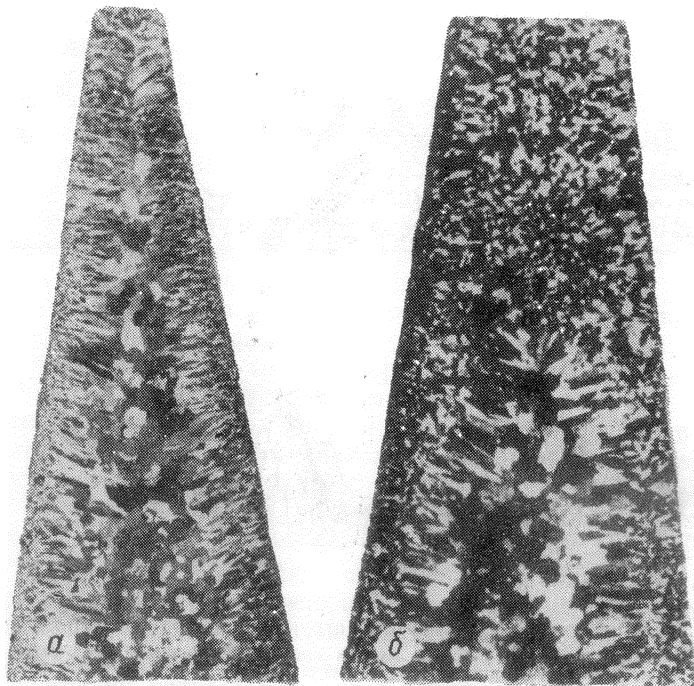


Рис. 43. Макроструктура литых образцов из нейзильбера различной конструкции:
а — с острым углом; б — с усеченным углом.

цессов на границе металл — форма и на фронте кристаллизации.

Ускорить аккумуляцию тепла отливки можно, применяя в контактной зоне формы более плотные формовочные смеси и покрытия с большим удельным весом и теплоемкостью. Следовательно, управление тепловым взаимодействием отливки с формой в начальной его стадии возможно путем изменения тепловой аккумуляции формы и покрытия.

Для выяснения влияния охлаждающей способности формы на структуру отливки были испытаны различные материалы. Характеристика форм и образцов приведена в табл. 19. При уменьшении охлаждающей способности формы увеличивается размер зерен (рис. 44, 45).

Для серого чугуна установлена такая закономерность: чем меньше коэффициент охлаждающей способности формы, тем крупнее зерна графита и феррита (табл. 20). Известно, что чем крупнее графитовые включения в чугуне, тем ниже плотность и прочность отливок, особенно поверхностного слоя.

При увеличении коэффициента тепловой аккумуляции покрытий и форм размер графитовых включений в поверхностном

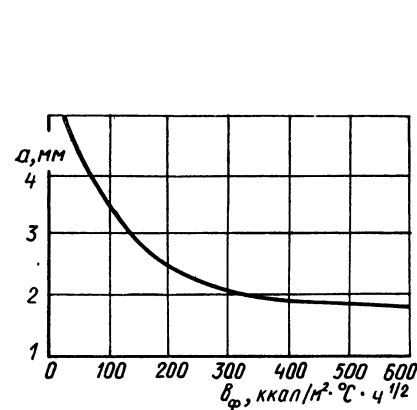


Рис. 44. Влияние теплоаккумулирующей способности материала форм на величину зерна a отливок из титана.

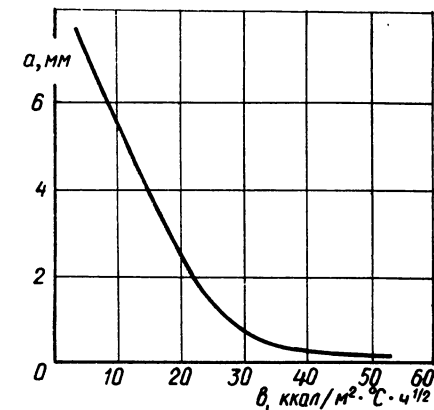


Рис. 45. Влияние теплоаккумулирующей способности покрытия на величину зерна a поверхностного слоя отливки из нейзильбера.

Таблица 19

Характеристика форм для изучения структуры слитков (отливок)

Материал	Масса, кг	Масса слитков, кг			
		Сталь	Нейзильбер	Серебро	Чугун
<i>Форма</i>					
Медь	9,30	8,40	8,96	11,04	—
Медь, охлаждаемая водой*	—	—	60,0	—	—
Алюминий	3,92	5,40	5,63	6,72	—
Сталь	13,30	7,50	8,28	9,98	—
Графит	9,30	8,00	8,50	9,61	—
Чугун	12,00	—	—	—	1,54—1,44
Бронза	15,00	—	—	—	1,54—1,44
<i>Холодильник</i>					
Медь	15,90	36,0	38,9	—	—
Сталь	11,67	36,0	38,9	—	—
Чугун	10,56	36,0	38,9	—	—

*Толщина стенки 12 мм.

Влияние коэффициента тепловой аккумуляции формы на микроструктуру образцов чугуна

Коэффициент тепловой аккумуляции, ккал/м ² ·°С·ч ^{1/2}	Зона	Структура	Толщина поверхностного слоя, мм
15—20	Поверхностный слой	Графит мелкопластинчатый	15
	Сердцевина	Графит пластинчатый	
8—10	Поверхностный слой	Графит пластинчатый и точечный	10
	Сердцевина	Графит пластинчатый	
3—5	Поверхностный слой	Графит пластинчатый и точечный	6
	Сердцевина	То же	

слое отливки уменьшается. Это дает возможность значительно увеличить ее плотность. Перлитовая структура с мелкопластинчатым графитом имеет большое значение модуля упругости, высокую плотность и другие важные преимущества, поэтому необходимо стремиться к ее получению в отливке, особенно в поверхностном слое. Однако в обычных формах этому препятствует образование ледебурита, количество которого зависит от скорости охлаждения и затвердевания поверхностного слоя отливки (рис. 46). Разработанная нами технология получения отливок в формах из сыпучих песков и порошков, упрочняемых перепадом давления воздуха, позволяет исключить образование ледебурита и получить высококачественную перлитовую структуру в отливках.

Степень дисперсности перлита, характеризуемая расстоянием между пластинками цементита, колеблется от 0,3 до 6,7 мкм (рис. 46, а) [29]. Однако получение чугуна перлитного класса связано с большими трудностями, что обусловлено строгим соотношением феррита и цементита в перлите (рис. 47). При недостаточной жидкотекучести и малом содержании кремния в структуре образуется свободный цементит, что дает большой брак отливок по недоливу.

Высокая температура перегрева и повышенное содержание кремния ($Si \geq 2\%$) улучшают жидкотекучесть жидкого чугуна и исключают отбел отливок, но при этом образуется тонкая феррито-перлитная эвтектика, которая резко снижает механические свойства отливки. В этом случае в структуре отливки появляется свободный феррит. Опыты показали, что такая структура образуется главным образом в поверхностном слое и в тонкостенных отливках, поэтому тонкая феррито-перлитная эвтектика, обладающая низкими механическими свойствами, на многих заводах страны удаляется путем механической обработки.

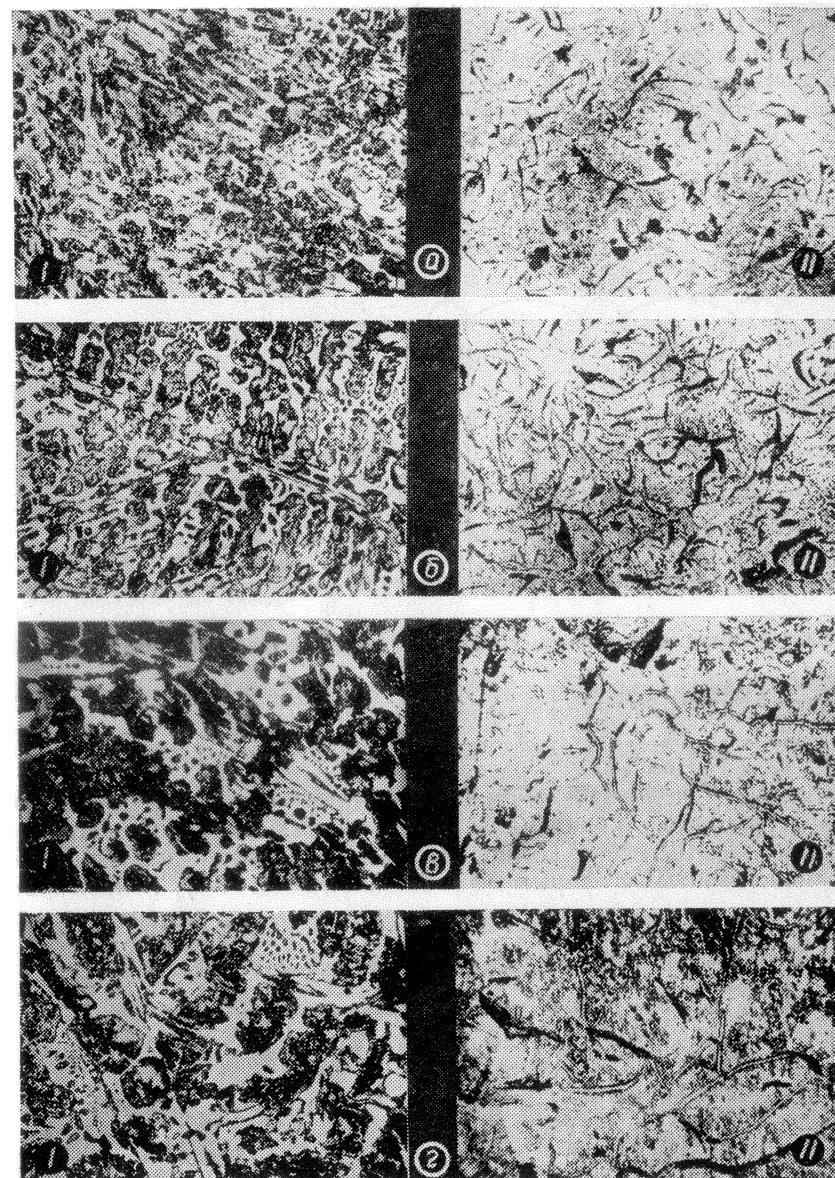


Рис. 46. Структура и микротвердость отливок из чугуна, полученных в обычных формах (I) и в формах из сыпучих песков и порошков (II) при различной толщине стенки:

а — 5 мм; б — 10 мм; в — 20 мм; г — 30 мм.

В период затвердевания отливки тепловой поток в покрытии и форме достигает больших значений ($800 \cdot 10^3$ ккал/м²·ч) (рис. 48). Величина и характер теплового потока зависят главным образом от теплофизических свойств и толщины (0,1—1 мм) покрытий форм, поэтому максимально возможный тепловой поток в слое покрытия ограничен не массой и тепловым напором отливки, а тепловой аккумуляцией покрытия и формы (рис. 48, табл. 21).

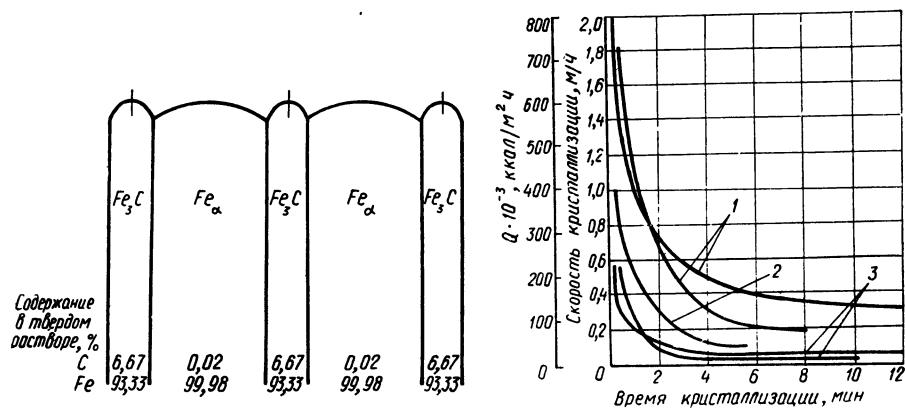


Рис. 47. Схема распределения структурных составляющих в перлите.

Рис. 48. Зависимость теплового потока в стенке литейной формы и скорости кристаллизации отливки от времени кристаллизации:

1 — металлическая форма; 2 — окрашенная металлическая форма; 3 — песочная форма.

Влияние покрытий форм с различным значением тепловой аккумуляции на кристаллизацию чугунных образцов показано на рис. 49—51. Металлографическое исследование структур образцов, отлитых в формы ($b = 35$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}), показывает,

Таблица 21

Зависимость скорости затвердевания отливки от теплофизических свойств покрытий форм

Плотность покрытия, кг/см ³	Коэффициент тепловой аккумуляции, ккал/м ² ·°С·ч ^{1/2}	Толщина корки, мм*		Коэффициент затвердевания, м/ч ^{1/2}	
		Сталь	Силумин	Сталь	Силумин
500	3,05	3,0	3,5	0,034	0,027
600	3,9	3,6	3,8	0,039	0,029
700	4,65	4,0	3,9	0,045	0,030
800	5,4	4,3	4,7	0,047	0,036
1400	11,0	10,0	11,5	0,111	0,088
1600	13,3	12,0	15,5	0,137	0,117

*Время выдержки стали 0,5 мин, силумина—1,0 мин.

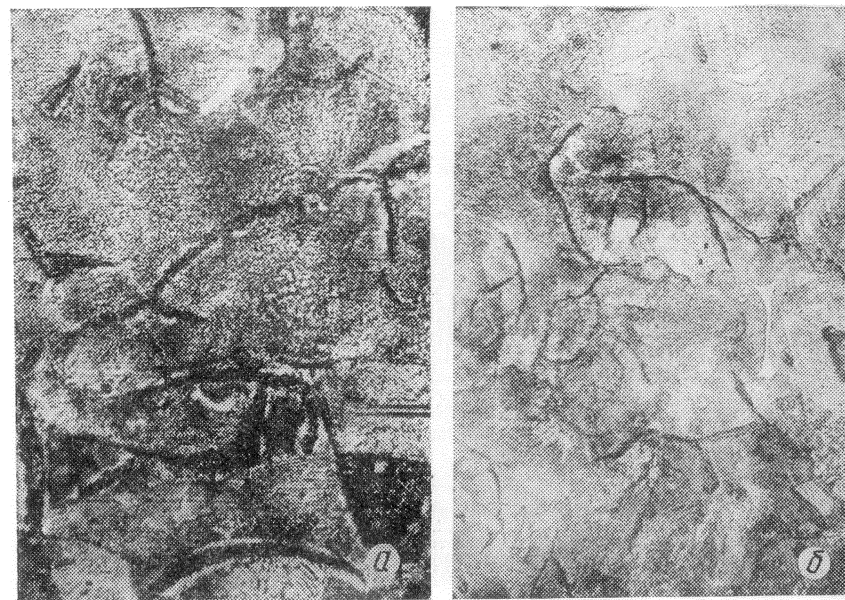


Рис. 49. Микроструктура чугунных образцов, отлитых в формы с покрытием ($\times 300$, $b = 35$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}): а — сердцевина образца, б — край образца.

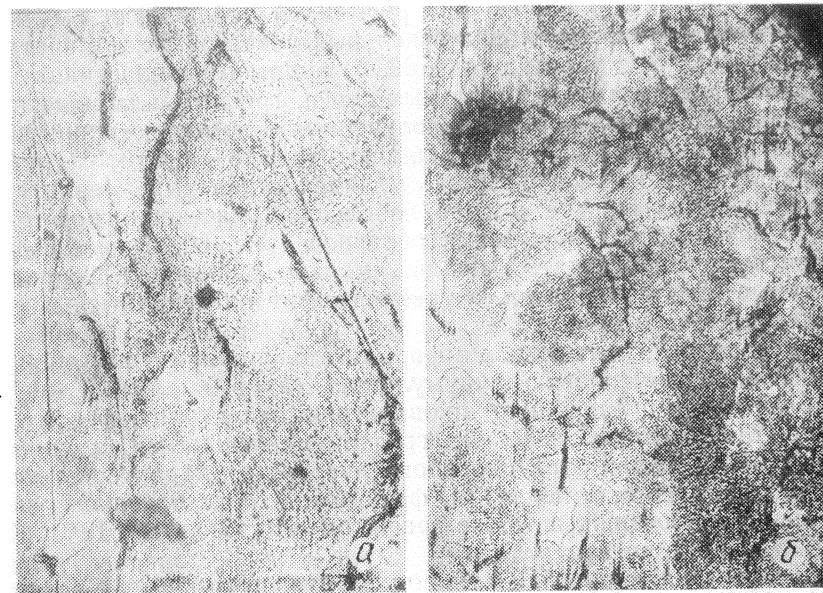


Рис. 50. Микроструктура чугунных образцов, отлитых в формы с покрытием ($\times 300$, $b = 15$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}): а, б — то же, что на рис. 49. 5 — 9-246

Влияние технологии получения отливок на структуру чугуна

Толщина стенки образца, мм	Компоненты структуры и твердость образца	Характеристика образцов, полученных в формах	
		песочно-глинистых	из сыпучих песков и порошков
5	Перлит, %	30	90
	Ледебурит, %	70	10
	<i>HV</i> , кгс/мм ²	474—497	235—248
10	Перлит, %	50	100
	Ледебурит, %	50	—
	<i>HV</i> , кгс/мм ²	444—475	230
20	Перлит, %	60	100
	Ледебурит, %	40	—
	<i>HV</i> , кгс/мм ²	429—444	223—229
25	Перлит, %	70	100
	Ледебурит, %	30	—
	<i>HV</i> , кгс/мм ²	311	223—229

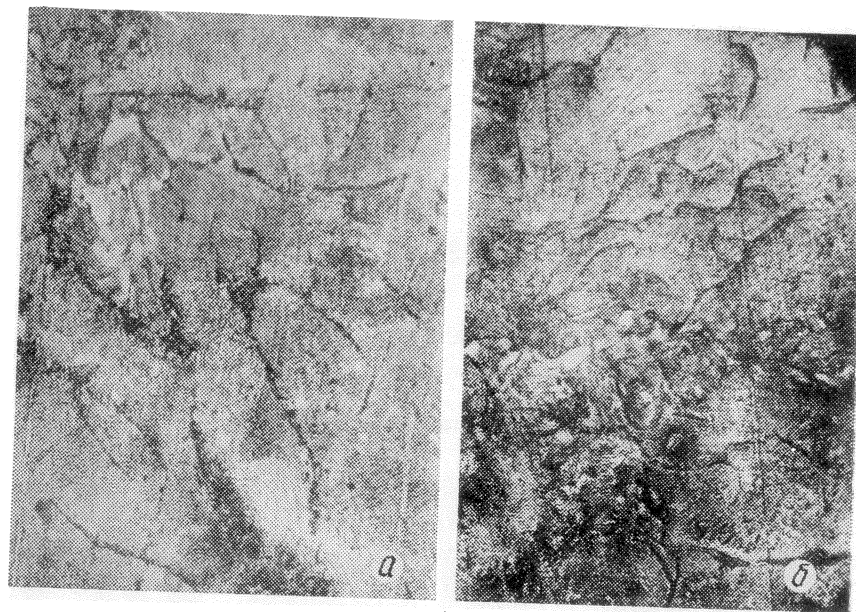


Рис. 51. Микроструктура чугуновых образцов, отлитых в формы с покрытием ($\times 300$, $b=5$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}):
а, б — то же, что на рис. 49.

что в сердцевине образцов (см. рис. 49, а) наблюдаются мелкопластинчатый перлит в виде отдельных участков, пластинчатый графит. На краю образца (рис. 49, б) видны тонкопластинчатый перлит, феррит в виде отдельных зерен, графит мелкопластинчатый. Сердцевина образцов, полученных с помощью покрытий, имеющих меньшую аккумуляцию ($b=15$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}) (рис. 50, а), характеризуется мелкопластинчатым перлитом, включениями феррита в виде небольших участков, графитом пластинчатым. На периферии образцов (рис. 50, б) наблюдаются мелкопластинчатый перлит, мелкие включения феррита, которые имеют вид гнезд, а также графит пластинчатый и точечный.

В образцах, полученных в формах с покрытиями, имеющими минимальную тепловую аккумуляцию ($b=5$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}), наблюдаются средне- и крупнопластинчатый перлит, феррит в виде отдельных включений, графит пластинчатый крупный (рис. 51, а). Край этих образцов (рис. 51, б) характеризуется мелкопластинчатым перлитом, ферритом в виде отдельных небольших включений, а также графитом пластинчатым Г10-Гр6-Г97.

Технология получения отливок из низкокремнистого чугуна ($Si \leq 2,0\%$) в формах из сыпучих песков и порошков, разработанная в Институте проблем литья (ИПЛ) АН УССР, обеспе-

чивает образование высококачественной однородной перлитовой структуры (табл. 22, рис. 46).

Большое влияние на глубину мелкокристаллической поверхностной зоны отливки оказывает температура заливки жидкого металла. опыты проводились на образцах (диаметр 50 мм, длина 200 мм) из нейзильбера и углеродистой стали, полученных в металлических формах с перлитным покрытием (табл. 23). В зависимости от температуры перегрева при заливке глубина мелкокристаллической зоны колеблется от 4,5 до 15 мм для нейзильбера и от 3,5 до 6 мм для углеродистой стали. Уменьшение глубины мелкокристаллической зоны при увеличении температуры заливки жидкого металла происходит в определенном интервале температур, при котором получают максимальное развитие ликвационные процессы и происходит быстрое образование плотного термодиффузионного (загрязненного примесями) слоя на фронте кристаллизации. Термодиффузионный слой блокирует рост мелкокристаллической зоны и способствует формированию столбчатых кристаллов. При дальнейшем увеличении температуры возникают мощные конвективные потоки жидкого металла, размывающие термодиффузионный слой и обеспечивающие обильное питание мелкокристаллической зоны. Особенно интенсивно эти процессы протекают при кристаллизации нейзильбера, в меньшей мере — при кристаллизации углеродистой стали (табл. 24). При увеличении металлостатического напора и скорости разлива глубина мелкокристаллической зоны в образцах из стали 35Л увеличивается (табл. 25).

Таблица 23

Влияние температуры заливки жидкого металла на структуру отливок, полученных в металлических формах с перлитным покрытием

Металл	Температура заливки металла, °С	Глубина мелкокристаллической зоны отливки, мм
Нейзильбер	1180	15
	1200	12
	1250	4,5
	1300	4,6
Сталь 35Л	1350	10—11
	1500	5
	1550	3,5
	1600	6

ния свойств форм и покрытий. При возрастании коэффициента тепловой аккумуляции и толщины металлического холодильника увеличиваются толщина затвердевшей корки и размер транс-кристаллической зоны стальных образцов (табл. 26, рис. 52), а также глубина отбеленной зоны чугунных образцов (табл. 27). При уменьшении коэффициента тепловой аккумуляции покрытий увеличивается размер зерна в поверхностном слое отливки (табл. 28, рис. 53, 54). Таким образом, получение конструктивно

Таблица 24

Величина структурных зон отливки, %

Характеристика зоны	Ней-вильбер, масса 50 кг	Углеродистая сталь	
		Масса 25—50 кг	Масса 3000—5000 кг
Мелкие кристаллы	10—22	7,6—10	6—13
Столбчатые кристаллы	75—88	60—90	22—42
Равноосные кристаллы	2,5—3	15—32	45—61

Как показали опыты, характер затвердевания поверхностного слоя отливки можно регулировать путем дифференцирования

Таблица 25

Влияние метода и скорости заливки на размер мелкокристаллической зоны и количество неметаллических включений

Показатель	Размер мелкокристаллической зоны		Количество неметаллических включений, %
	мм	%	
Метод заливки обычный	3—5	7—10	9,0
с перепуском металла	12—13	30	4,8
с наличием прибыли	10—13	30	5,0
плавка и заливка в вакууме	12—15	50	1,5
Скорость заливки, кг/мин			
838	20	11,1	4,9
2333	25	14,0	3,7
6700	30	16,4	2,65

Таблица 26

Влияние материала и толщины холодильника на затвердевание образцов из стали

Толщина холодильника, мм	Толщина затвердевшей корки, мм			Размер транскристаллической зоны, мм
	в песочной форме $\delta_{\text{км}}$	со стороны холодильника $\delta_{\text{км}}$	$\frac{\delta_{\text{км}}}{\delta_{\text{км}}}$	
<i>Чугун</i>				
30	45	58	1,28	60
50	45	68	1,50	70
100	46	73	1,58	75
120	46	74	1,60	75
<i>Сталь</i>				
30	45	65	1,44	67
50	44	71	1,60	73
100	44	76	1,73	80
125	44	76	1,73	80
<i>Медь</i>				
30	45	65	1,44	68
50	46	70	1,51	73
100	50	89	1,78	92
125	50	89	1,78	92
150	60	89	1,78	92

Таблица 27

Влияние материала формы и покрытий на структуру образцов из чугуна

Материал формы	Наполнитель покрытий	Структура
Алюминий	—	Зона отбела 3—4 мм, центральная часть — перлитный чугун
Бронза	—	Зона отбела 4—5 мм, переходная зона 15 мм, центральная часть — перлитный чугун
Чугун	—	Зона отбела 2—3 мм, переходная зона 15 мм, центральная часть — перлитный чугун
»	Пирофиллит	Мелкопластинчатые перлит, графит и феррит
»	Маршалит	То же
»	Асбест	Среднепластинчатый перлит, феррит в виде гнезд
»	Перлит	Крупнопластинчатые перлит и графит, феррит в виде отдельных включений, включения фосфидной эвтектики

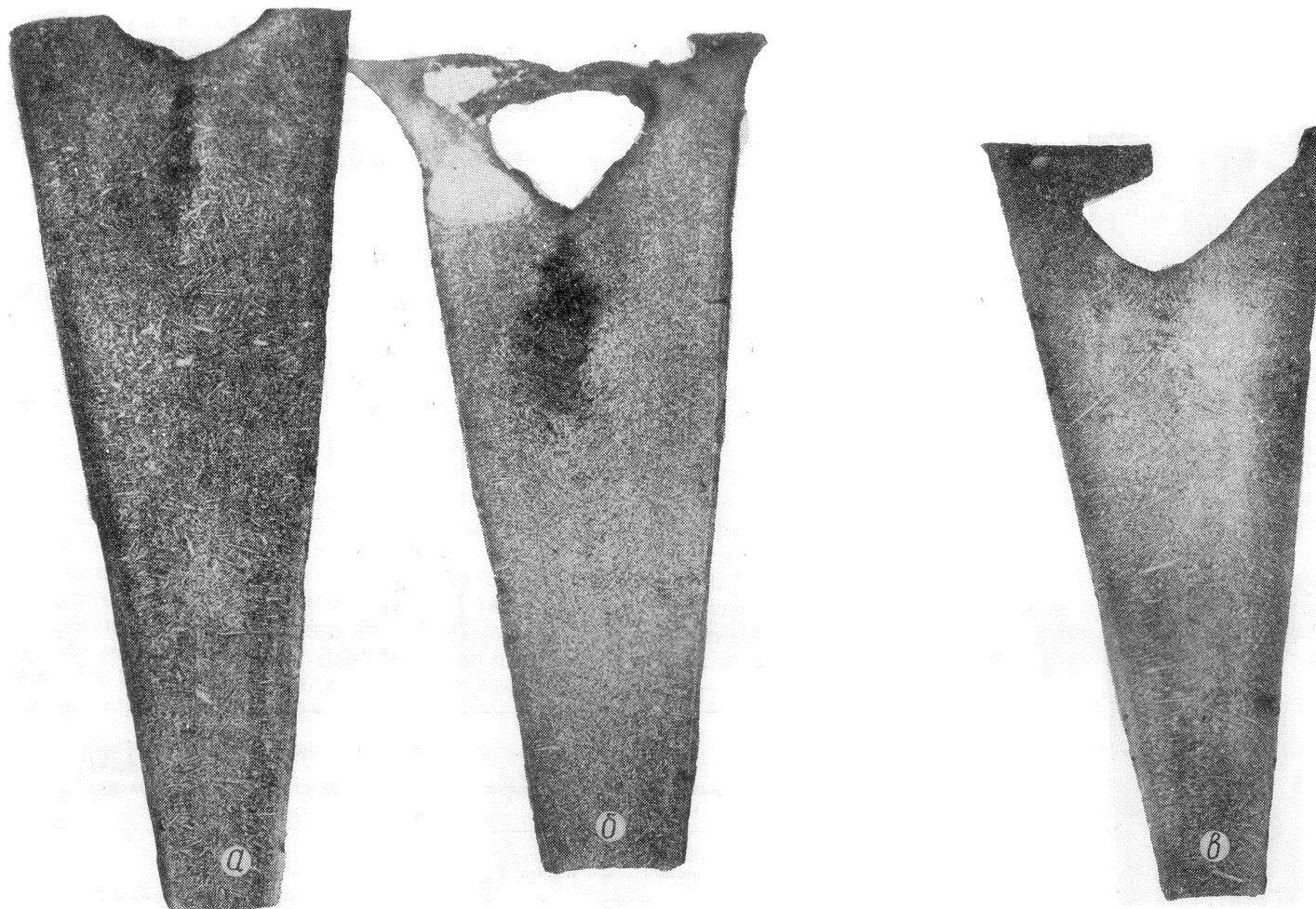


Рис. 52. Исходная литая структура стальных образцов, отлитых в различных
 а — стальная; б — алюминиевая; в — медная.

сложных отливок с высококачественным поверхностным слоем и заданной структурой возможно при использовании покрытий литейных форм, обладающих необходимым сочетанием теплофизических и кристаллохимических свойств.

3. Заполняемость форм жидким металлом

Заполнение литейной формы определяется свойствами формовочных материалов и жидкого металла, геометрическими характеристиками полости форм и способом ее заполнения (заливки). Эффективность питания тонкостенных и фа-

сонных отливок ограничивается не только сечением полости форм, а главным образом протяженностью твердо-жидкой зоны и характером сечения (фильтрации) жидкого металла через капилляры и каналы переменного сечения, образующиеся в междендритном пространстве, скоростью и характером затвердевания отливки.

Гидродинамические свойства жидкого металла характеризуются коэффициентом вязкости, который можно выразить уравнением [1]

$$\eta_v = C_v e^{\frac{E_{ак}}{RT}},$$

где η_v — коэффициент динамической или абсолютной вязкости жидкого металла; C_v — постоянная (эмпирическая) величина; $E_{ак}$ — энергия элементарной активации вязкого течения; R — универсальная газовая постоянная.

Из данного уравнения видно, что при повышении температуры степенной показатель убывает и коэффициент вязкости уменьшается.

формах:

При турбулентном движении жидкости, практически часто наблюдаемом при заливке жидкого металла в литейные формы, кроме сил внутреннего трения большое значение приобретают силы инерции элементарных частиц, пропорциональные плотности металла. Поэтому при прочих равных условиях турбулентное движение жидкого металла определяется отношением η_v/ρ_m , которое имеет большое значение для практики и определяется как коэффициент кинематической вязкости.

В табл. 29 приведены значения кинематической вязкости воды и жидких металлов по данным [80]. Из таблицы видно, что вязкость жидких технических металлов (чугуна, стали и медных сплавов) при температуре заливки в литейные формы приближается к вязкости воды при 50—100° С. С увеличением



Рис. 53. Микроструктура отливки из титана (×400).

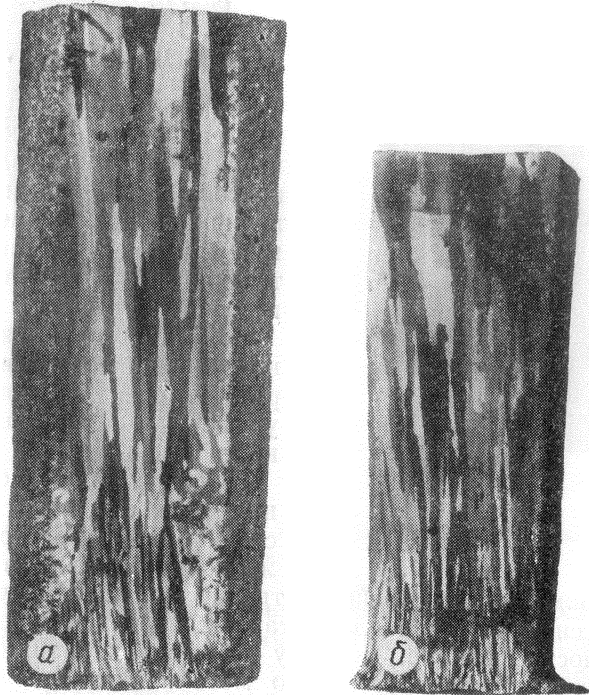


Рис. 54. Структура литых магнитов из сплава ЮНДК25ВА, полученных в магнетитовых (а) и цирконовых (б) керамических формах.

Таблица 28

Влияние состава покрытий и облицовок форм на глубину структурных зон литых образцов

Составы покрытий и облицовок, %	Глубина структурных зон, мм		
	Мелкокристаллическая	Столбчатая	Равноосная
Кварцевая мука — 90; жидкое стекло — 10	1,5	4,5	38
Графит коллоидальный — 90; жидкое стекло — 10	1,5	6	35
Циркон — 90; жидкое стекло — 10	2,25	6	33,5
Ильменит — 90; жидкое стекло — 10	2	6	34
Цирконовый порошок — 100	1,5	12	20
Цирконовый концентрат — 25; кварцевый песок — 75	1,5	10	27

содержания углерода в три раза кинематическая вязкость стали уменьшается примерно на 10%, а с увеличением содержания углерода в чугуне в 1,5 раза кинематическая вязкость уменьшается в 1,17 раза. На практике регулирование вязкости жидкого металла в большинстве случаев осуществляют путем изменения температуры перегрева.

Вязкое течение металла тесно связано с его кристаллической структурой и диффузионным механизмом перемещения атомов [1]

$$\eta_v = - \frac{RT}{D_0 a} \left(\frac{L_k}{a} \right)^2,$$

Таблица 29

Вязкость жидких металлов в сравнении с вязкостью воды

Материал	Температура, °С	$\eta_v \cdot 10^{-6}$, м ² /с
Вода	30	0,80
	50	0,55
	70	0,42
	100	0,30
Сталь	низкоуглеродистая (до 0,15 % С)	1490
	среднеуглеродистая (0,35—0,50% С)	1630
	1490	0,58
	1630	0,43
Чугун	белый (2,5% С)	1490
	1630	0,54
	серый (3,0% С)	1280
	1400	0,48
	1400	0,32
	1280	0,42
Медные сплавы	» (3,5% С)	1400
	1250	0,29
	1400	0,40
	1150	0,26
	1250	0,43
	1250	0,40

где D_0' — коэффициент диффузии и самодиффузии атомов и вакансий; a — параметр решетки; L_k — характерный размер кристалла или расстояние между источником и стоком вакансий.

В реальных кристаллах источниками и стоками вакансий являются свободные поверхности, границы зерен и блоков, трещины и поры, линейные краевые дислокации и дефекты упаковки атомов, царапины на поверхности и др. При этом $\eta_v = \frac{1}{\rho_d}$ (ρ_d — плотность дислокаций), т. е. чем больше дислокаций, тем меньше вязкость и больше текучесть металла. Поскольку в жидких металлах сохраняется только ближний порядок, для вязкости жидких металлов справедливо уравнение

$$\eta_v = \frac{RT}{D_0'}$$

Согласно экспериментальным данным авторов, между температурой перегрева, вязкостью и плотностью жидких металлов в интервале температур плавления — кипения (испарения) существует определенная связь. Установлена константа вязкости жидких металлов, равная произведению приведенной температуры перегрева на вязкость при этой температуре (табл. 30). Анализ плотности металлов показывает, что отношение плотности металлов и сплавов в жидком и твердом состоянии составляет 0,9. Для металлов, находящихся в одной подгруппе таблицы Менделеева, сохраняется постоянным отношение поверхностного натяжения к температуре кипения (табл. 31).

Жидкотекучесть жидкого металла обратно пропорциональна вязкости

$$\Phi_m = \frac{1}{\eta_v}$$

Согласно исследованиям Я. И. Френкеля [1] и Ю. А. Нехензи [70], жидкотекучесть жидкого металла не является его физической константой, она определяется главным образом теплофизическими и кристаллохимическими свойствами покрытий (форм), размерами и формой полостей литейных форм, ферростатическим давлением и другими силами внешнего воздействия.

Жидкотекучесть зависит от поверхностного натяжения жидкого металла и загрязненности металла неметаллическими и шлаковыми включениями. Практический опыт показывает, что при прочих равных условиях путем рационального подбора химического состава, рафинирования, модифицирования и перегрева жидкого металла его жидкотекучесть можно увеличить более чем на 20%.

При высокой жидкотекучести металла неметаллические и газовые включения всплывают на поверхность и концентрируются

Таблица 30
Константа вязкости жидких металлов в интервале $T_{пл} - T_{кип}$

Металл	Приведенная температура перегрева	Вязкость жидкого металла, П	Постоянная вязкости
Натрий	0,32	0,0072	0,0023
	0,40	0,0050	0,0020
Калий	0,32	0,0040	0,00128
	0,45	0,0028	0,00125
Медь	0,48	0,035	0,016
	0,50	0,032	0,016
Серебро	0,53	0,030	0,016
	0,41	0,042	0,018
Цинк	0,55	0,033	0,018
	0,60	0,030	0,018
Ртуть	0,45	0,030	0,01350
	0,65	0,021	0,01365
Алюминий	0,74	0,018	0,01332
	0,83	0,016	0,01328
Олово	0,43	0,014	0,006
	0,60	0,010	0,006
Сталь 15Л—20Л	1,00	0,006	0,006
	0,33	0,013	0,0042
Сталь 35Л—45Л	0,35	0,012	0,0042
	0,38	0,011	0,0042
Чугун (3,5% С)	0,23	0,020	0,0046
	0,26	0,0175	0,0040
Чугун (3,0% С)	0,32	0,0125	0,0040
	0,36	0,0110	0,0040
Чугун (3,5% С)	0,600	0,038	0,023
	0,624	0,032	0,020
Чугун (3,0% С)	0,6	0,038	0,0228
	0,62	0,035	0,0217
Чугун (3,5% С)	0,518	0,0220	0,0114
	0,548	0,0185	0,0102
Чугун (3,0% С)	0,54	0,023	0,0122
	0,55	0,020	0,0110

в «ловушках» и в прибыльной части отливок. Согласно экспериментальным данным, жидкотекучесть заэвтектических цериевых чугунов резко возрастает по сравнению с исходными при введении модификатора в количестве до 0,38%. Жидкотекучесть эвтектических и доэвтектических чугунов снижается даже при небольших добавках цериевого модификатора. Металлографический и петрографический анализ показал наличие в шлифах и аншлифах из цериевого чугуна повышенного количества неметаллических включений (SeO_2). При введении цериевого модификатора протекает реакция $Se + 2O \rightarrow SeO_2$ с образованием дисперсного высокотемпературного окисла церия, температура плавления которого превышает $2750^\circ C$. В результате взаимодействия с серой образуются сульфиды церия. Накопление в

Таблица 31

Константа поверхностного натяжения элементов

Металл	Группа в таблице Менделеева	Поверхностное натяжение (поверхностная энергия) вблизи температуры плавления, эрг·см ⁻¹	Температура кипения, °С	$\sigma/T_{\text{кип}}$, эрг/°С·см
Медь	1б	1120	2600	0,4
Серебро	1б	923	2210	0,4
Золото	1б	1128	2600	0,4
Цинк	2б	750	907	0,8
Кадмий	2б	608	765	0,8
Алюминий	3а	840—900	2480	0,3—0,36
Галлий	3а	735	1983	0,36
Таллий	3в	446	1460	0,31
Олово	4а	538	2270	0,23
Свинец	4а	442	1740	0,25
Сурьма	5а	383	1635	0,23
Висмут	5а	376	1560	0,24

металле продуктов взаимодействия с цериевым модификатором (табл. 32) резко снижает жидкотекучесть. Поэтому добавка большого количества цериевого модификатора в чугун, в особенности при малом перегреве, вредна. Наличие в отливке стенок, резко отличающихся по толщине, затрудняет шихтовку чугуна по химическому составу, а также получение заданной структуры и необходимой жидкотекучести. Это объясняется тем, что при получении отливок с массивными стенками необходимо, чтобы содержание углерода и кремния было низким, а при получении тонкостенных отливок — более высоким. Добавка графитизаторов (ферросилиция, алюминия, графита) улучшает жидкотекучесть, но одновременно приводит к выделению точечного (эвтектического) графита, образованию неметаллических включений и других дефектов.

Таблица 32

Характеристика продуктов взаимодействия жидкого металла с цериевым модификатором

Продукт взаимодействия	$Q_{\text{обр}}/T_{\text{пл}}$, ккал/моль·°С	$\gamma_{\text{вкл}}/\gamma_{\text{ж}}$	Продукт взаимодействия	$Q_{\text{обр}}/T_{\text{пл}}$, ккал/моль·°С	$\gamma_{\text{вкл}}/\gamma_{\text{ж}}$
La ₂ O ₃	0,2	0,94	La ₂ S ₃	0,13	0,7
Ce ₂ O ₃	0,25	0,98	Nd ₂ S ₃	0,12	0,8
Pr ₂ O ₃	0,2	1,0	Ce ₂ S ₃	0,12	0,74
Nd ₂ O ₃	0,2	1,0	Al ₂ S ₃	0,15	0,3
Eu ₂ O ₃	0,2	0,74			

Примечание. Q — теплота обработки; $\gamma_{\text{вкл}}$ — плотность включения; $\gamma_{\text{ж}}$ — плотность жидкого чугуна.

В большой мере заполняемость форм жидким металлом зависит от размера и конструкции сочленений полостей литниковой системы. При этом чем больше сечение литниковой системы, тем больше влияние на заполняемость оказывают размер (форма) и конструкция литниковой системы. Этими традиционными положениями литейщики пользовались при разработке технологии на протяжении многих десятков лет. Однако, если отливка имеет очень тонкие стенки и большие размеры, первостепенное значение приобретают не параметры отдельно взятой литниковой системы, а размер и форма сечения стенки и конфигурация отливки в целом. Поэтому попытка улучшить заполняемость тонкостенных отливок только лишь изменением литниковой системы не дает положительных результатов.

Одним из путей решения проблемы получения высокопрочных тонкостенных отливок является конструктивное изменение отливок, при котором гармонично учитывается рациональное движение потоков жидкого металла в полости формы и воздействие на жидкий металл разрежения в формах.

Для единицы контактной поверхности заданного объема металла с формой тепловой баланс в единицу времени определяется уравнением $V_0 \gamma_{\text{ж}} q = 1,13 \beta (T_{\text{к}} - T_{\text{ф}})$, где V_0 — критический объем жидкого металла, м³; q — кажущаяся скрытая теплота кристаллизации, ккал/кг, $q = q_0 + c_{\text{ж}}(T_{\text{ж}} - T_{\text{к}})$; q_0 — скрытая теплота кристаллизации, ккал/кг; $c_{\text{ж}}$ — теплоемкость жидкого металла, ккал/кг; $T_{\text{к}}$ — температура кристаллизации в начале заливки, °С; $T_{\text{ж}}$ — температура жидкого металла в момент заливки, °С.

Выразив объем канала через его сечение и длину, а также подставляя значения скрытой теплоты кристаллизации, теплоты и температуры перегрева в уравнение, после соответствующего математического преобразования получим выражение жидкотекучести металла, необходимой для заполнения формы:

$$L_{\text{ж}} = 0,06 (T_{\text{к}} - T_{\text{ф}}).$$

При прочих равных условиях жидкотекучесть металла должна быть тем больше, чем больше перепад температур ($T_{\text{к}} - T_{\text{ф}}$) и значение β и чем меньше толщина стенки отливки. При установленном режиме плавки и работе с определенными марками чугуна или стали жидкотекучесть можно прогнозировать. В табл. 33 приведены данные Н. Г. Гиршовича [81], П. Н. Бидули [82] и наши расчетные данные о необходимой величине жидкотекучести чугуна для отливок с разной толщиной стенок. Данные имеют хорошую сходимость. Опытные данные по жидкотекучести металла в различных формах приведены в табл. 34 (толщина пробы 8 мм, температура перегрева стали 100°С, чугуна — 120°С).

Для изучения влияния свойств облицовки на заполняемость формы и установление закономерностей движения жидкого ме-

талла (стали 35Л) по покрытию или вдоль фронта кристаллизации были исследованы формы с облицовками и без них, с различными значениями коэффициента тепловой аккумуляции, контактного угла смачивания и термодиффузионными свойствами (табл. 35). Стержни из различных смесей высушивались, устанавливались в форму по уровню в соответствии со схемой и подключались к осциллографу К12-21. Заливка металла про-

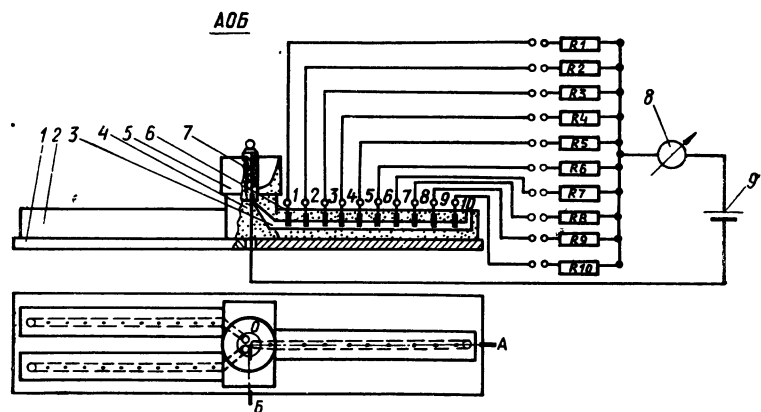


Рис. 55. Схема устройства для изучения заливки форм жидким металлом:

1 — плита; 2 — форма; 3 — канал; 4 — электрод отрицательный; 5 — чаша; 6 — электрод положительный; 7 — пробка; 8 — осциллограф; 9 — питание.

изводилась одновременно через общий литник и чашу с керамической пробкой (рис. 55). Температура перегрева жидкого металла 20—30 град; чаша с пробкой перед заливкой металла подогревалась до температуры 700—900° С. Результаты обработки осциллограммы представлены на рис. 56 в виде кривых изменения скорости заполнения металла формы во времени. Заполняемость жидким металлом зависит от коэффициента

Таблица 33
Жидкотекучесть чугуна для отливок с различной толщиной стенок, мм

Данные	Толщина стенок отливок, мм			
	3—6	6—15	16—25	25—35
Н. Г. Гиршовича [81]	500—700	400—500	300—400	200—300
П. Н. Видули [82] (по длине спирали в земляной форме)	600—700	—	—	—
Расчетные данные авторов $0,06 (T_k - T_f) \frac{\beta}{S}$	625	460	312	280

Таблица 34

Жидкотекучесть углеродистой стали и серого чугуна в различных формах

Литейная форма	Углеродистая сталь (0,3% С)		Серый чугун (3% С)	
	Температура формы, °С	Жидкотекучесть, мм	Температура формы, °С	Жидкотекучесть, мм
Алюминиевая	100	230	100	250
Стальная	100	300	100	330
Чугунная	100	425	100	490
Магнезитовая	20	650	20	665
Песочно-глинистая (сырая)	20	680	20	700
Песочно-опилочная (сухая)	20	1200	20	1250
Шлакоасбестовая (сухая)	20	1700	20	1700
Асбесто-магнезитово-бентонитовая (сухая)	20	1900	20	1980
Керамическая оболочка	900	2280	900	2300

Таблица 35

Состав и свойства облицовок форм

Материал облицовки	Содержание, об. %	Коэффициент тепловой аккумуляции, ккал/м ² ·°С·ч ^{1/2}	Средняя скорость заполнения формы, см/с	Контактный угол смачивания, град
Металлическая форма без покрытия	—	145	5,7	—
Сажа ацетиленовая	100	1,3	87	15
Перлит	93	—	—	—
Жидкое стекло	5	4,5	78	100
Глина огнеупорная	2	—	—	—
Маршалит	93	—	—	—
Жидкое стекло	5	15,2	52	110
Глина огнеупорная	2	—	—	—
Цирконовый концентрат	93	—	—	—
Жидкое стекло	5	49,6	35	130
Глина огнеупорная	2	—	—	—

тепловой аккумуляции форм и контактного угла смачивания. Скорость заполнения форм резко изменяется по времени: в начальный период она в два-три раза выше, чем в конце заливки. При этом колебания скорости заполнения выражены слабее в формах с большим коэффициентом тепловой аккумуляции (цирконовых), сильнее в формах с коэффициентом тепловой аккумуляции, меньшим 30 ккал/м²·°С·ч^{1/2} при коэффициенте затвердевания металла менее 0,03 м/ч. Это явление обусловлено образованием и разрывом тонкой металлической корки на поверх-

ности головной части потока. Неравномерность пульсирующего движения жидкого металла при заполнении форм объясняется также турбулентностью потока, так как скорость движения жидкого металла в формах с $b < 30$ ккал/м²·°С·ч^{1/2} в пять — семь раз превышает скорость ламинарного движения в том же кана-

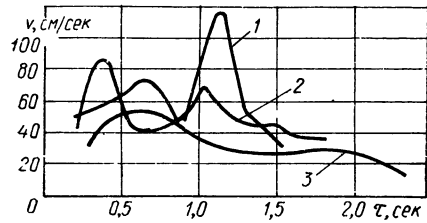


Рис. 56. Влияние тепловой аккумуляции покрытий на заполняемость формы жидким металлом:
1 — перлитовая смесь; 2 — песочная смесь; 3 — цирконовая смесь.

ле. При увеличении скорости и величины пульсации потока количество плен в образцах значительно уменьшается.

Изменение коэффициента тепловой аккумуляции припылов и покрытий позволяет в широких пределах регулировать жидкотекучесть металла и линейную скорость заполнения формы (табл. 36).

Влияние припылов (порошков) на заполняемость формы жидким металлом, мм, следующее:

Без припыла	455	Цемент М-200	603
Маршалит+порошок теллура	336	Графит серебристый	650
Циркон	380	Графит+цемент	730
Тальк	608	Ацетиленовая копоть	805

4. Питание фронта кристаллизации жидким металлом

Кристаллизация жидкого металла на поверхности формы начинается в период заливки [79]. В этот период кристаллизация особенно заметно протекает на подстилающих и нижних поверхностях формы. Движущийся поток жидкого металла захватывает и уносит кристаллики, ликвирующие элементы и легкоплавкие включения, концентрирующиеся вблизи фронта кристаллизации. Образовавшиеся между кристаллами вымытые и усадочные пустоты (рыхлости) питаются новыми порциями жидкого металла движущегося потока. При смыве загрязненного примесями слоя на фронте кристаллизации происходит интенсивное нарастание очередного плотного слоя металла. Чем полнее смывается загрязненный слой и чем дольше протекает

такой процесс кристаллизации, тем больше зона мелкокристаллической и плотной структур. Следовательно, увеличение времени и скорости заливки формы способствует получению качественного поверхностного слоя отливки. Это положение подтверждается практикой заливки форм через дождевую литниковую систему, которая удлиняет время заливки и уменьшает размер прибыли отливки. Теплоизоляционная облицовка формы уменьшает скорость кристаллизации, повышает интенсивность ликвации и диффузии примесей и легкоплавких компонентов к фронту кристаллизации, что в свою очередь увеличивает продолжительность действия интенсивных потоков жидкого металла.

Таким образом, в период заливки кристаллизующийся поверхностный слой отливки питается жидким металлом движущегося потока. Опыты показали, что после заливки формы движение жидкого металла вблизи фронта кристаллизации не прекращается. В этот период вследствие увеличения скорости кристаллизации заметно возрастает роль гравитационных сил. Опускающиеся массы металла вытесняют к оси отливки и к верху ликвирующие и легкоплавкие составляющие, имеющие малую плотность и более высокую температуру перегрева.

Как отмечалось выше, эффективность питания в период затвердевания зависит главным образом от ширины зоны двухфазного состояния, т. е. от интервала затвердевания, температуры заливки и распределения температур в жидкой сердцевине отливки. Необходимый поток жидкого металла вблизи фронта кристаллизации для увеличения мелкокристаллической зоны отливки можно обеспечить, создав некоторый температурный перепад между низом и верхом, периферийной и осевой частями отливки. Эти положения подтверждаются практикой заливки форм с последующим поворотом на 10—90° при производстве ответственного фасонного стального литья.

Непосредственными замерами температур было установлено, что при повороте залитой формы на 180° в течение 15—20 с температура верхней части отливки достигает максимального значения. Разница температур между нижней и верхней частями отливки в форме из жидкостекольной смеси, имеющей толщину стенки 30 мм и высоту 300 мм, после одного-двух поворотов составляет 60—80 град. При затвердевании 15% металла отливки кронштейна массой 500 кг температурный перепад достигает 75 град. При этом скорость движения жидкого металла в полости формы составляет около 0,5 м/с. Эти результаты свидетельствуют о наличии в затвердевающей отливке значительных вертикальных потоков. Практика работы многих сталелитейных цехов, широко применяющих заливку форм с последующим поворотом, показала, что этот способ позволяет стабильно получать отливки с увеличенной зоной плотной мелкокристаллической структуры в поверхностном слое отливки.

Температурный перепад и необходимый поток жидкого металла в период затвердевания отливки можно создать путем сосредоточения массы металла в верхней части, увеличения толщины стенки и устройства массивной прибыли [83, 84]. При проектировании прибылей в основу одних расчетов берутся приведенные толщины прибыли и отливки, в основу других — размер усадочных раковин, образующихся в отливке. Общим для расчетов является то, что для определения формы и размера прибыли скорость охлаждения прибыли принимается постоянной. Улучшение работы прибыли достигается путем необоснованного увеличения размеров, что приводит к низкому выходу годного. Специалисты [30] рекомендуют выдерживать отношение размера прибыли к диаметру вписанной в питаемый узел окружности в следующих пределах: для компактных узлов 1,25—1,33, для средних — 1,33—1,48, для узлов с развитой поверхностью — более 1,78.

Изучение эффективности работы прибылей, применяемых на практике, показало, что в питании соответствующих узлов отливки принимает участие около 33% массы прибыли, т. е. их КПД составляет 0,3. Нетрудно видеть, что увеличение размеров прибыли является технически неэффективным и экономически невыгодным.

Рациональным способом создания большого температурного перепада между верхом и низом отливки является применение теплоизоляционных облицовок прибыльной и литниковой полостей формы [85, 86]. Температурный перепад между питаемым узлом и прибылью в теплоизоляционной форме в период затвердевания отливки достигает 85—100 град. Поэтому при использовании теплоизоляционных облицовок отпадает необходимость в увеличении конусности стенки и создании технологических напусков металла, выполненных по правилу вписанных окружностей [69, 87] для обеспечения циркуляционных потоков в жидком металле. При таком температурном перепаде интенсивность циркуляции жидкого металла в отливке по сравнению с обычным увеличивается в полтора — два раза.

Большое влияние на циркуляцию жидкого металла оказывает скорость его кристаллизации. Приведем некоторые экспериментальные и расчетные данные по кристаллизации жидкой стали 35Л (табл. 37, 38, рис. 57).

Как показали опыты, перлитовые, вермикулитовые и другие теплоизоляционные покрытия, облицовки и засыпки, характеризующиеся низким значением коэффициента тепловой аккумуляции ($b < 5$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}), очень эффективны для уменьшения скорости кристаллизации жидкого металла в литниковой системе и прибылях. Замер температур и циркуляции жидкого металла показал, что конвективные потоки имеют большую интенсивность при температурном перепаде до 780 град и существуют в период затвердевания при отношении коэффициентов

Таблица 37

Расчетные значения коэффициента затвердевания стали в различных формах

Литейная форма	Коэффициент затвердевания, м/ч ^{1/2}	
	По данным А. И. Вейника [69]	По нашим данным
Чугунная	0,25*	0,24—0,25
Магнетитовая	0,14	0,12
Хромомагнетитовая	0,085	0,074
Песочно-глинистая (сырая)	0,045	0,044—0,06
Песочно-опилочная (сухая)	0,031	0,030
Перлитная	0,026	0,025

* По данным Г. П. Иванцова [74].

Таблица 38

Влияние материала формы на толщину металлической корки

Литейная форма	Коэффициент затвердевания, м/ч ^{1/2}		Толщина металлической корки, мм	
	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
Медная	0,375	0,390	0,0302	0,0310
Чугунная	0,230	0,250	0,0188	0,0202
Цирконовая	0,125	0,135	0,0100	0,0110
Песочно-глинистая (сырая)	0,045	0,051	0,0036	0,0040
Песочно-асбестовая	0,020	0,027	0,0020	0,00216
Песочно-опилочно-пенная	0,013	0,015	0,0010	0,00120

затвердевания металла прибыли и питаемого узла отливки менее 0,3. При этом фронт кристаллизации плоский, что характерно для формирования замороженной структурной зоны, загрязненный слой легко смывается с фронта кристаллизации и уносится потоком жидкого металла. При ячеистом фронте кристаллизации, характерном для более поздней стадии кристаллизации — формировании столбчатой структуры, — ликвирующие примеси располагаются в междендритных ветвях, и поэтому их удаление затрудняется.

Применение облицовок форм, содержащих теллур, алюминий, титан и другие металлы, которые в массивных узлах и в местах теплоизоляционных вставок диффундируют в металл и увеличивают количество центров кристаллизации и концентрационное переохлаждение, приводит к выравниванию скорости кристаллизации и структурной неоднородности.

На основании изучения теплофизических свойств формовочных материалов авторы разработали смеси, значительно отли-

чающиеся способностью поглощать тепло (коэффициент их тепловой аккумуляции изменяется от 1 до 100 ккал/м²·°С·ч^{1/2}). Применение этих материалов для покрытий и облицовок форм позволяет в широких пределах изменять скорость охлаждения металла (от 1 до 100 град в единицу времени). Для изготовления изотермических вставок, обладающих высокой термостабильностью в течение всего периода затвердевания отливки,

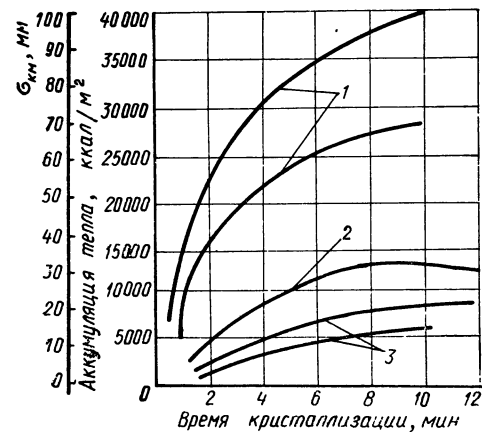


Рис. 57. Аккумуляция тепла литейной формой и нарастание металлической корки отливки:

1 — металлическая форма; 2 — окрашенная металлическая форма; 3 — песочная форма.

необходимо применять материалы с коэффициентом тепловой аккумуляции менее 5 ккал/м²·°С·ч^{1/2}. Эффективность работы изотермических прибылей повышается еще больше в случае, если форма изготовлена из материала, имеющего высокую охлаждающую способность, т. е. при большой разнице скоростей затвердевания отливки и прибылей.

Теплоизоляционная облицовка, выполненная в виде стержней или оболочек прибыльной части формы, сохраняет физическое тепло (15—20 ккал/кг) и тепло кристаллизации (65—70 ккал/кг) жидкого металла в течение длительного времени. Низкая газотворная способность облицовок практически исключает газовыделение в жидкий металл. При определении размеров прибылей необходимо исходить главным образом из учета скорости охлаждения и затвердевания жидкого металла. Для нормальной работы прибылей необходимо дифференцировать скорости охлаждения и затвердевания отливки и прибылей путем применения формовочных материалов с различной охлаждающей способностью и изменения толщины стенки формы (рис. 58). При этом необходимо учитывать, что время кристаллизации отливки прямо пропорционально квадрату толщины ее стенки и обратно пропорционально квадрату коэффициента охлаждающей способности формы ($\tau_1 = K_1 \frac{\delta_1^2}{\beta_1^2}$), а время охлаждения пропорционально толщине

стенки в первой степени.

При полном использовании жидкого металла прибылей справедливо следующее основное уравнение:

$$\frac{V_o}{m_1 S_1} = \frac{V_n}{m_2 S_2},$$

где V_o и V_n — объем отливки и прибыли; S_1 и S_2 — поверхность охлаждения отливки и прибылей; m_1 и m_2 — коэффициент скорости кристаллизации отливки и прибылей.

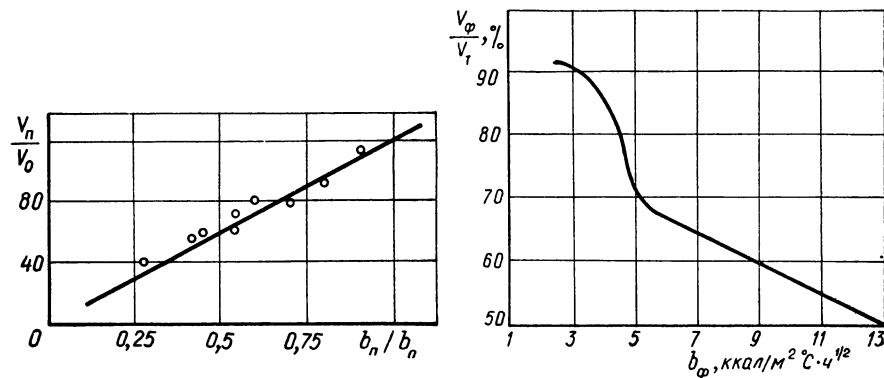


Рис. 58. Зависимость объема прибыли отливки от тепловой аккумуляции формы.

Рис. 59. Влияние теплоаккумуляционной способности прибыльной части формы на отношение фактического объема усадочной раковины V_ϕ к теоретическому V_τ .

Объем прибыли может быть определен из уравнения

$$V_n = \alpha_v \frac{V_o}{100},$$

где α_v — объемная усадка, %.

На рис. 59 показана зависимость размеров усадочной раковины от теплофизических свойств прибыльной части формы.

По данным [88], коэффициент кристаллизации металла описывается уравнением

$$m = \rho_k \beta_1,$$

где ρ_k — коэффициент, определяющий конструкцию (форму) отливки, для плоской плиты $\rho_k = 0,0027$, для цилиндра $\rho_k = 0,0055$, для шара $\rho_k = 0,008$; β_1 — коэффициент охлаждающей способности формы. Для сырых песочных форм $\beta_1 = 18—20$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}; для изотермических теплоизоляционных оболочек $\beta_1 = 3—5$ ккал/м²·°С·ч^{1/2}.

Для теплоизолированных прибылей справедливо уравнение $m_2 = (0,2—0,5)m_1$, где m_2 — коэффициент кристаллизации металла теплоизолированной прибыли; m_1 — коэффициент кристаллизации металла отливки.

Подставляя значения m_1 , m_2 , $V_{\text{п}}$ в основное уравнение и решая его, получаем

$$D_{\text{п}} = n_{\text{к}} D_0 \frac{b_{\text{ф}}}{b_{\text{ф}_0}},$$

где $D_{\text{п}}$ — приведенный размер прибыли (диаметр или толщина), $D_0 = \frac{V_{\text{п}}}{S_{\text{п}}}$; $n_{\text{к}}$ — постоянный коэффициент, зависящий от формы прибыли.

Из полученного уравнения видно, что объем прибыльной части отливки определяется скоростью охлаждения лимитирующей части отливки и величиной усадки металла.

Применение пеноглинистых, перлито-вермикулитовых и других теплоизоляционных материалов для прибыльной части форм в виде засыпок, стержневых оболочек и тонких покрытий позволяет снизить расход металла на прибыли, повысить выход годного и дает значительный экономический эффект (табл. 39, 40).

Оболочки, изготовленные из пеноглинистых смесей, проходят сушку и обжиг в печах по такому режиму: нагрев до температуры 380° С, выдержка при этой температуре 1—2 ч с последующим охлаждением вместе с печью до 100° С. При температуре 300—320° С происходит выгорание опилок и удаление газов, оболочка принимает вид пеноглинистого теплоизоляционного материала, имеющего плотность 0,3—0,5 г/см³.

Применение теплоизолированных прибылей значительно повышает коэффициент использования металла и выход годного литья. Малый размер изотермических прибылей позволяет уменьшить высоту верхней опоки, снизить трудоемкость изготовления форм и уменьшить расход формовочных материалов (рис. 60).

В настоящее время такие прибыли применяются на многих заводах страны. Изотермические прибыли эффективно применяются взамен обычных и экзотермических при производстве стальных отливок массой от 2 кг до 100 т и отливок из цветных сплавов массой до 1 т. Описание типичных отливок, полученных с применением теплоизоляционных оболочек, приведено ниже.

Колесный центр электровоза (сталь 35Л) по старой технологии отливался с одной открытой центральной прибылью и четырьмя закрытыми, расположенными по ободу (рис. 61, а, б). Новая технология предусматривает исключение технологических напусков (рис. 61, в) и установку изотермических прибылей (рис. 61, г). Исследования показали, что новая технология обеспечивает получение плотной структуры во всех сечениях отливки.

Применение изотермических прибылей для стального литья в среднем снижает расход металла на прибыли до 50% и повышает выход годного литья до 70%.

Применение перлитовых оболочек (рис. 62) для стального литья на Коммунарском металлургическом заводе позволило значительно улучшить качество отливок и получить экономию металла 420 т/год, что в денежном выражении превышает 15 800 руб./год. Особенно благоприятные условия питания отливок достигнуты при установке теплоизоляционных оболочек и

Таблица 39

Снижение расхода жидкого металла и повышение выхода годного стального литья при внедрении теплоизоляционных прибыльных оболочек

Деталь	Масса отливки, кг	Обычные закрытые и открытые прибыли			Изотермические прибыли		
		Масса прибыли, кг	Расход металла на прибыль, %	Выход годного, %	Масса прибыли, кг	Расход металла на прибыль, %	Выход годного, %
Колесный центр	325	279	80,0	47,0	92	26,0	65,0
Головка Альбина	78,7	8,2	107,0	39,5	2,5	34,0	59,0
Корпус скользяна	6,9	4,5	65,0	46,6	1,4	20,0	72,5
Крышка	20,5	12,0	60,0	49,0	22,5	22,5	61,3
Пятник нижний	44,3	24,0	54,4	52,7	14,2	14,2	69,2
Пятник верхний	105,0	45,6	44,0	57,0	13,6	13,0	73,5
Кронштейн	15,6	9,4	60,0	49,5	3,6	23,0	64,0
Колесный центр трамвая	124,0	55,0	44,4	57,0	16,0	14,5	72,0
Стакан	136,0	106,0	80,0	47,0	21,0	15,6	71,6
Корпус верхний	130,0	68,0	52,3	57,0	57,8	44,3	60,0
Крышка упорная	22,0	16,0	73,0	45,7	4,8	22,0	61,5
Кронштейн буксы средний	15,6	7,65	49,0	52,6	1,95	13,0	78,0
Кронштейн буксы крайний	20,0	6,3	31,5	62,0	1,90	9,5	74,0
Коническая шестерня	60,0	75,0	125,0	40,0	18,0	30,0	67,0
Румпель	60,0	14,0	23,0	70,0	10,0	17,0	76,0
Винт	83,0	21,0	25,0	75,0	16,0	19,6	76,0
Холодное колесо	780,0	430,0	50,0	48,0	347,0	44,0	55,0
	600,0	286,0	47,0	65,0	196,0	33,0	70,0
	480,0	225,0	46,0	63,0	172,0	35,0	63,0
Хобот завалочной машины	4560,0	600,0	13,0	82,0	515,0	11,0	84,0
Цилиндр	3700,0	1154,0	31,0	70,0	800,0	21,0	77,0
Звездочка	1960,0	800,0	40,0	65,0	380,0	19,0	77,0
	100,0	170,0	64,8	35,2	81,0	49,0	51,0
Клещевина	2720,0	1320,0	27,0	62,0	594,0	21,0	78,0
Полузвездочка	115,0	60,0	39,5	60,5	31,5	24,6	75,4
Стойка станка	120,0	64,2	42,0	58,0	20,0	25,0	75,0
Блок грейфера	152,0	130,8	51,6	48,4	44,6	29,6	70,4
Вибрационная плита	202,0	203,0	48,0	52,0	32,8	17,8	82,2
Колесо зубчатое	250,0	—	—	—	108,0	32,0	68,0
	331,0	320,0	54,2	45,8	130,0	35,0	65,0
	1900,0	2000,0	51,7	48,3	1300,0	40,9	59,1
Каток	400,0	522,0	57,6	42,5	194,0	35,0	65,0
Ходовое колесо	550,0	560,0	60,2	39,8	350,0	40,0	60,0
Венец зубчатый	690,0	540,0	48,0	52,0	220,0	26,9	73,1
Скат	700,0	550,0	48,2	51,8	230,0	28,5	71,5
Станина люнета	900,0	350,0	29,5	70,5	100,0	12,6	87,4
Шестерня молота	1000,0	890,0	50,6	49,4	520,0	38,0	62,0
Бандаж	1390,0	1300,0	50,3	49,7	800,0	39,5	60,5

Таблица 40

Эффективность применения перлитовых прибыльных облицовок

Отливка	Черновая масса отливки, кг	Масса прибылей, кг		Общая стоимость прибылей, руб.		Экономия на 1 т годового, руб.
		по существующей технологии	утепленной перлитом	по существующей технологии	утепленной перлитом	
Стальное литье						
Шкворневая балка	1060,0	172	99,0	7,10	5,41	1,60
Корпус буксы	95,0	65	27,0	2,68	1,48	12,60
	95,0	56	19,3	2,32	1,22	11,50
<i>Средняя экономия на 1 т годового 6,0 руб.</i>						
Цветное литье						
Подпятник	105,0	42	21,0	25,6	13,14	118,0
Венец	62,0	18	10,5	11,0	6,59	72,0
	46,0	16	10,5	8,8	6,59	70,0
	58,0	20	13,5	15,2	8,53	115,0
<i>Средняя экономия на 1 т годового 94,0 руб.</i>						
Высокопрочный чугун						
Крышка	84,0	50	13,5	2,5	1,11	16,0
	18,0	18	10,5	0,9	0,71	10,5
	14,0	14	5,8	0,7	0,41	20,7
	15,0	11	5,8	0,65	0,41	9,3
	38,0	21	10,5	1,06	0,71	9,0
	400,0	110	52,0	5,5	3,28	5,5
<i>Средняя экономия на 1 т годового 11,8 руб.</i>						

использовании засыпок для сырых форм. Лабораторные испытания показали, что, несмотря на уменьшение размеров прибылей, прочность проб увеличилась на 5—10%, количество неметаллических включений в поверхностном слое отливок значительно уменьшилось. Разработаны нормативы на изготовление изотермических оболочек для круглых (сферических), овальных, квадратных и отводных прибылей, которые могут быть использованы при литье различных сплавов.

Опытно-промышленная проверка показала эффективность применения перлитовых покрытий и засыпок для надставок изложниц и засыпки зеркала металла 10-тонных слитков. Слитки, утепленные перлитовыми покрытиями с засыпкой, имеют концентрированную открытую усадочную раковину, расположенную на 150 мм выше линии отреза прибыли, что на 100 мм выше, чем у слитков, полученных по заводской технологии. Слитки характеризуются удовлетворительной структурой и полным отсутствием обратной ликвации. Неоднородность распределения не-

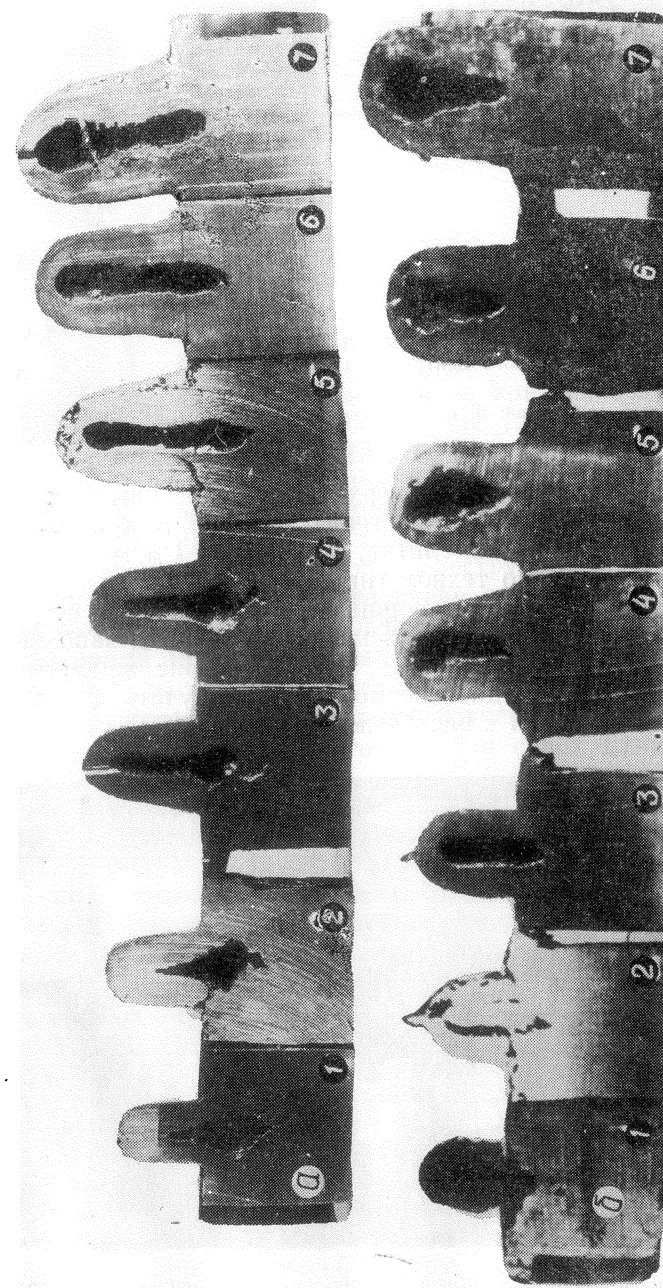


Рис. 60. Литые образцы из стали 35Л для исследования работы прибылей: а — изготовленные в формах из теплоизоляционных материалов; б — изготовленные в формах из песчано-глинистых формовочных смесей; 1—7 — номера образцов.



Рис. 61. Отливка колесного центра электроваза:
а, б — по старой технологии; в, г — по новой технологии.

металлических включений в поверхностном слое опытных слитков на 2—3 балла ниже, чем у обычных слитков. Масса прибыли составляет 12—15% массы слитка, что на 0,5—1% меньше, чем слитков, полученных по технологии завода.

Применение перлитового порошка и специальных перлитовых плиток для защиты зеркала металла в период заполнения изложницы позволяет исключить взаимодействие жидкого металла с изложницей и дает возможность получать 20-тонные слитки рельсовой стали с чистой поверхностью [89].

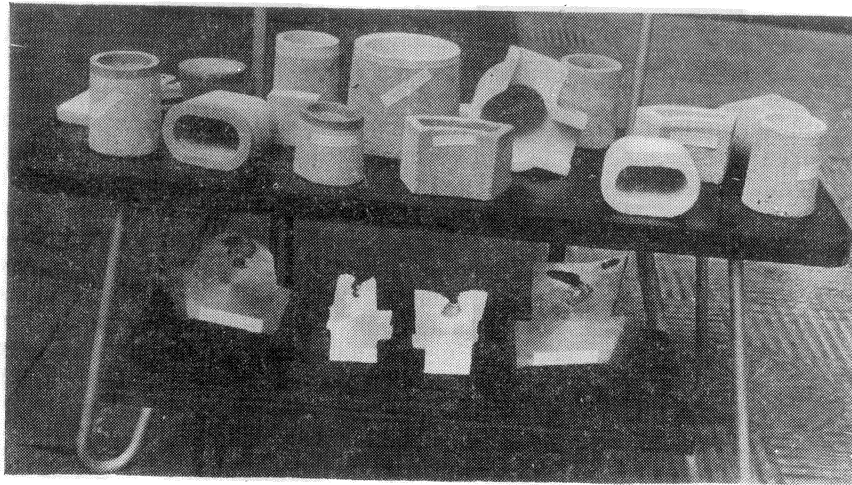


Рис. 62. Теплоизоляционные прибыльные оболочки из вспученного перлита.

1. Параметры поверхностных дефектов

В процессе заливки и кристаллизации жидкого металла поверхностный слой формы (облицовка и покрытие) подвергается тепловому и гидродинамическому удару, механическому и химическому воздействию, в результате которых происходят растрескивание зерен, дегидратация и полиморфные превращения наполнителя покрытий (смесей), отвердевание плен неорганических связующих, деструкция и выгорание органических связующих и образование продуктов взаимодействия (дефектов) на поверхности и в поверхностном слое отливки.

Авторами монографии выполнен большой объем научно-исследовательских работ в области повышения качества и чистоты поверхностного слоя отливки, изучения процессов и продуктов взаимодействия жидкого металла с покрытиями литейных форм [28, 90, 91].

Продукты взаимодействия — твердые частицы, пары воды и газы — проникают в тело отливки, оттесняются к поверхности и фиксируются там при кристаллизации металла в виде неметаллических и газовых включений. В период охлаждения жидкого металла под действием ферростатического давления капиллярных сил и интенсивного смачивания формы жидкий металл просачивается в поры, трещины и другие несплошности форм на глубину до 1,5 мм. Такое просачивание оказывает расклинивающее действие и обуславливает образование микронеровности (шероховатости) на поверхности и неметаллических включений в теле отливки.

На формирование структуры и образование дефектов поверхностного слоя отливки влияет множество факторов, обусловленных большим разнообразием исходных (часто некондиционных) материалов, составов и технологических процессов, применяемых на каждом заводе при плавке металла и приготовлении покрытий, смесей и форм. Может быть несколько причин образования дефектов одного и того же вида, и наоборот, одна причина может вызвать образование дефектов нескольких

видов вследствие различного сочетания физико-химических процессов, протекающих в контактной зоне жидкий металл — форма.

Результаты микроскопического, электронномикроскопического и рентгеноструктурного исследований поверхностного слоя отливок показывают, что многие отливки, полученные в различных литейных формах, характеризуются несовершенной структурой и большой неоднородностью в поверхностном слое. Анализ производственных данных многих заводов подтверждает, что брак и снижение качества отливок в большинстве случаев обусловлены наличием поверхностных дефектов.

Обобщение теоретических положений, экспериментальных и промышленных данных изучения влияния дефектов на прочностные, антикоррозионные и эксплуатационные свойства литых деталей дает возможность классифицировать поверхностные дефекты следующим образом. По размерам: субмикроскопические — менее 1 мкм, микроскопические — от 1 мкм до 1 мм, макроскопические — более 1 мм. По видам: макро- и микровключения — неметаллические (шлаковые, силикатные, окисные, графитовые и др.), газовые, металлокерамические (пригар, ужимины); макро- и микронесплошности — усадочные раковины (впадины) и рыхлости (осевая, междендритная), усадочно-газовая пористость и раковины, трещины холодные и кристаллизационные, неслитины (спаи) и др.; химическая неоднородность — обезуглероживание, ликвационная неоднородность примесей и др.; физическая неоднородность — вакансии (дефекты Шоттки), межузельные атомы (дефекты Френкеля), границы зерен и двойников и др.; искажение конфигурации и геометрических размеров — коробление, наросты, заливы, перекося, разностенность и др. По форме и характеру распределения: точечные, линейные, плоскостные, объемные, сосредоточенные, изолированные и т. п.

Из теории прочности известно, что влияние поверхностных дефектов на прочностные и эксплуатационные свойства литых деталей определяется в значительной степени их геометрическими размерами. Поэтому целесообразно рассматривать поверхностные дефекты как макро-, микро- и субмикроскопические независимо от их вида и причин возникновения. Эти категории охватывают в основном всю гамму известных дефектов поверхностного слоя отливок, формирование которых определяется характером контактных процессов на границе жидкий металл — форма, природой кристаллизующегося металла и материала формы.

Деление дефектов на макро-, микро- и субмикроскопические является в определенной мере условным. По отношению к объему отливки поверхностные дефекты (надрезы, царапины и другие следы механической обработки, отпечатки зерен наполнителя и выступы, соответствующие порам формы) относятся к мик-

роскопическим, по отношению к поверхностному слою — к макроскопическим.

Концентрация и размер дефектов зависят от диффузионных процессов, скорость которых на внешних поверхностях раздела больше, чем на внутренних, и существенно больше, чем в объеме (массе) зерен. Поэтому влияние включений, несплошностей и других фаз на физико-механические свойства поверхностного слоя проявляется значительно сильнее, чем на свойства остального объема отливки.

На практике большое внимание уделяется учету макродефектов отливок, которые выявляются в основном при визуальном контроле. В зависимости от конструкции и назначения отливки макродефекты во многих случаях могут частично или полностью устраняться путем механической и термической обработки, заварки, заливки, замазки, окрашивания и другими методами. Брак отливок по макродефектам в настоящее время составляет около 90% общего брака, или 3—5% общего выпуска отливок.

Микроскопические дефекты определяются только в отливках специального назначения и в случаях, оговоренных ТУ, при механических испытаниях, а также при химическом, микроскопическом и рентгеноструктурном анализе. Для более четкого и правильного представления о природе дефектов категорию субмикроскопических дефектов целесообразно выделить в самостоятельную группу. Контроль субмикроскопических дефектов поверхностного слоя отливок в настоящее время почти не производится. Они выявляются при глубоком изучении структуры электронномикроскопическим и рентгенографическим методами, при изучении напряженного состояния, испытаниях микрообразцов и т. п.

Трещины. Макро-, микро- и субмикроскопические трещины являются характерными дефектами фасонных отливок из легированных и углеродистых сталей, цветных сплавов и высокопрочных чугунов. Природа и механизм образования некоторых видов трещин еще полностью не изучены, особенно слабо изучены микро- и субмикроскопические трещины. Этот вид дефектов обусловлен главным образом технологическими особенностями приготовления, заливки и кристаллизации жидкого металла, условиями охлаждения и взаимодействия жидкого металла и отливки с литейной формой, учет которых представляет большие трудности. В настоящее время наиболее полно изучены кристаллизационные трещины, зарождение и развитие которых происходят в эффективном интервале кристаллизации.

В твердо-жидком состоянии трещины локализуются в месте стыка зерен и расклинивающей жидкой фазы, размер которых обусловлен термическим сжатием, ферростатическим и газовым давлением. По современным представлениям, в кристаллической решетке реальных металлов неизбежно наличие вакансий,

дислокаций и других несовершенств, которые способствуют образованию и росту трещин.

Интенсивность образования поверхностных дефектов (вакансий) описывается уравнением

$$V_v = C \exp\left(-\frac{E_v}{RT}\right),$$

где $V_v = \frac{n_v}{N'}$ — плотность вакансий; n_v — число вакансий; N' — число атомов в поверхностном слое; $C = 10^3 - 10^4$ — постоянная величина; E_v — энергия образования вакансий.

Из уравнения видно, что с увеличением температуры число дефектов Шоттки растет по экспоненциальному закону.

Трещины могут возникнуть в местах взаимного пересечения винтовых дислокаций с сопутствующей им концентрацией вакансий и в местах с повышенным содержанием различных включений, характеризующихся концентрацией напряжений и ускоренным образованием. Экспериментально было установлено, что в некоторых случаях трещины образуются на внутренней поверхности литейной корки и развиваются затем в обоих направлениях.

Причинами образования кристаллизационных трещин в отливках во многих случаях являются затрудненная усадка и наличие термических узлов в местах скопления металла, затвердевающих медленнее, чем прилегающие сечения. Если термический узел удален от прибыли и питающая стенка затвердевает раньше, в узле образуется усадочная раковина, в которой сосредоточивается выделяющийся из металла водород. Давление в раковине может возрасти до такой степени, что приведет к образованию кристаллизационных трещин.

Усадочная раковина ослабляет сечение отливки. В области усадочной раковины развивается дендритная кристаллизация, обуславливающая возникновение междендритных неметаллических включений. Исследования показали, что чем больше усадочная раковина, тем резче выявлена ликвация. Скопление ликватов и сульфидных включений вызывает образование кристаллизационных трещин, так как ликваты выделяются из раствора в виде сетки по границам зерен.

Кристаллизационные трещины (рис. 63) могут возникнуть под действием напряжений, образующихся в процессе затвердевания или в ближайшем после затвердевания отливки интервале температур. В сером чугуна образование кристаллизационных трещин происходит в основном в период графитизации. При этом предусадочное расширение во многих случаях снижает опасность образования трещин в отливках. Уменьшение термического торможения усадки отливки или ее отдельных частей достигается различными путями: введением в формовочные и стержневые смеси выгорающих добавок; заменой

стержней сырыми болванами, а формовки по сухому — формовкой по сырому из сыпучих песков, упрочняемых вакуумированием и др.; применением рациональной конструкции отливок с небольшой разницей толщин отдельных частей отливки; нанесением на поверхность отливки литого орнамента.

Следует иметь в виду, что вероятность образования кристаллизационных трещин возрастает при увеличении размеров и

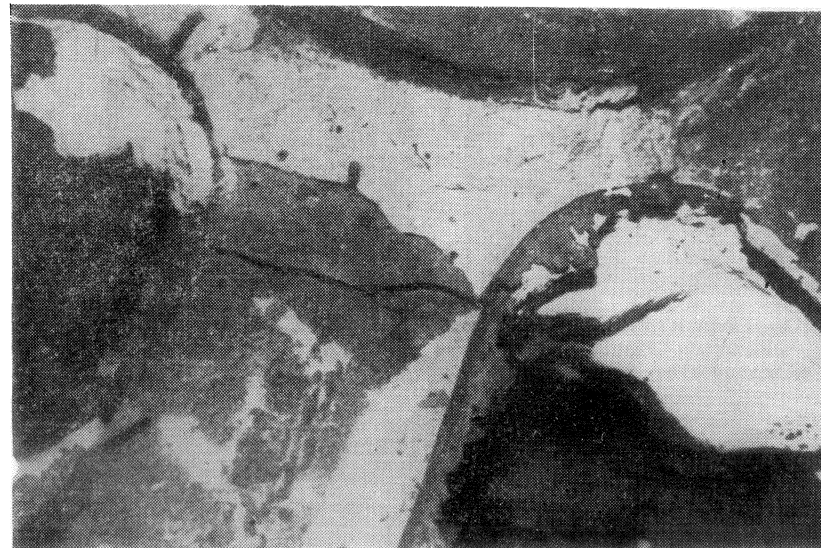


Рис. 63. Брак по кристаллизационным трещинам.

уменьшению толщины стенок отливок, так как при этом уменьшается относительная толщина податливого слоя формы, а также при использовании холодильников (особенно больших размеров), поскольку увеличиваются скорость усадки прилегающего к ним слоя металла, вероятность отбела и возникновения фазовых напряжений. В отливках, имеющих стенки, которые значительно отличаются по толщине, напряжения будут тем больше, чем больше длина, отношение общей длины к длине утолщенной части, температурный перепад и сопротивление формы усадке отливки.

Дефекты усадочного и усадочно-газового происхождения. Процесс затвердевания отливки сопровождается образованием усадочных полостей и газовых раковин, обусловленных усадкой и выделением газов затвердевающего металла.

Макро- и микропоры усадочного происхождения располагаются между ветвями разросшихся кристаллов (дендритов), преимущественно в центральной части отливки (рис. 64). Если отливка охлаждается быстро во всех сечениях, возможно пло-

хое питание массивных узлов жидким металлом, приводящее к образованию в теле усадочных дефектов. Дефект макроструктуры отливки из стали, показанный на рис. 65, вызван одновременным затвердеванием ее стенок. Усадочные микрораковины имеют в основном остроугольную форму, и поэтому такие дефектные места отливки являются сильными концентраторами напряжений и, следовательно, резко снижают прочностные и ан-

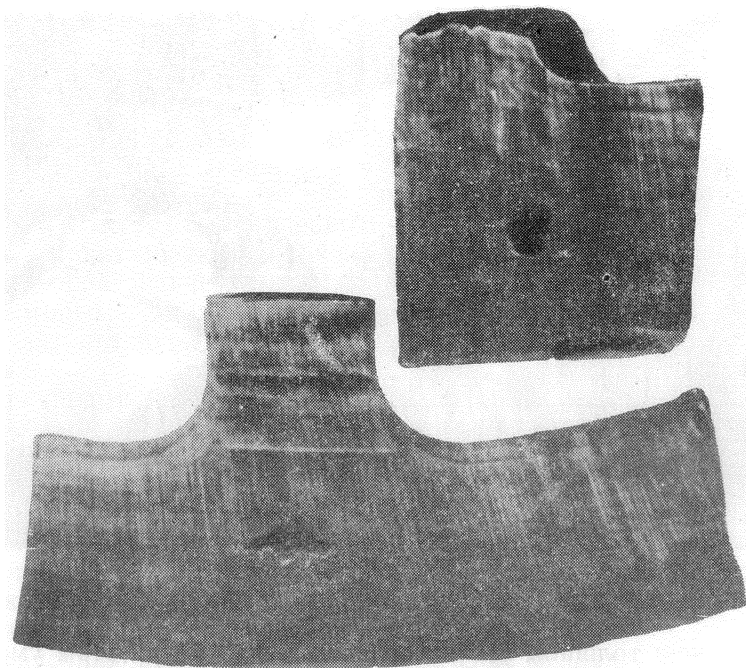


Рис. 64. Усадочные раковины в массивных узлах.

тикоррозионные свойства отливок. Поры, образованные газами в интервале малой вязкости жидкого металла, имеют форму шарообразных полостей — пузырей — и являются менее активными концентраторами напряжений.

При направленном затвердевании жидкого металла на готовой поверхности вследствие избирательного процесса микропоры отесняются фронтом кристаллизации из поверхностной зоны к центру, где они коагулируют и образуют микрораковины и пустоты. Выделяющиеся газы концентрируются в усадочных микрораковинах, щелевидная форма которых в большинстве случаев сохраняется, а значит, сохраняется большая концентрация напряжений, приводящая к снижению прочностных свойств отливок. Газовые раковины, образовавшиеся в интервале температур солидуса и ликвидуса, также имеют щелевид-

ную форму и сохраняют ее после кристаллизации жидкого металла.

Увеличение скорости кристаллизации значительно уменьшает выделение из металла газов, а создание направленного затвердевания устраняет образование усадочных раковин.

Неметаллические и газовые включения. Результаты изучения неметаллических включений объясняют не только причину и механизм их возникновения в жидком металле, но и поведение в процессе затвердевания, обработки и эксплуатации отливки. Неметаллические включения состоят из окислов, сульфидов, фосфидов, гидридов, нитридов и различных силикатов, образовавшихся из компонентов жидкого металла и материалов покрытий или смесей форм в период заливки, снятия перегрева и кристаллизации жидкого металла. По источникам образования включения разделяются на экзогенные и эндогенные. Экзогенные включения образуются при взаимодействии металла с атмосферой и огнеупорами футеровки, характеризуются большими размерами и сложным составом. Эндогенные включения образуются в основном при раскислении и десульфурации, характеризуются небольшими размерами.

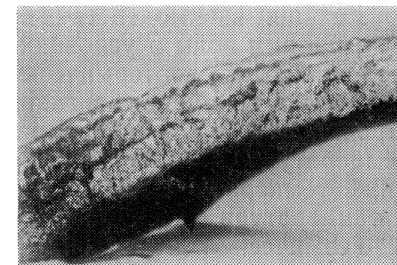
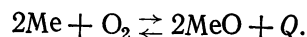


Рис. 65. Дефект макроструктуры стальной отливки, полученный при одновременном затвердевании с двух сторон.

В условиях высоких температур ($T_{\text{п}}=1500^{\circ}\text{C}$) продукты взаимодействия образуются в результате химических реакций с участием газовой фазы, состав которой зависит от исходных материалов покрытий и смесей формы и может включать O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , CO , NH_3 , N_2 , SO_2 , H_2S , CH_4 и др. Источниками поступления газов в контактную зону отливки и формы являются жидкий металл, органические и неорганические связующие, химически нестойкие наполнители, а также воздух и вода, адсорбированные поверхностью. Удаление воды из контактной зоны формы возможно только путем предварительной тепловой и химической обработки исходных материалов и покрытий форм. Температура выделения воды из неорганических материалов зависит от типа воды: при $200\text{—}550^{\circ}\text{C}$ выделяется кристаллизационная вода, при $300\text{—}500^{\circ}\text{C}$ — адсорбционная, при $300\text{—}1300^{\circ}\text{C}$ — конституционная, при 110°C — гигроскопическая и при 105°C — капиллярно-гравитационная. Вода, выделяющаяся при пиролизе и термодеструкции органических связующих, поступает в зону контакта в большинстве случаев в течение почти всего периода формирования отливки: $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 \rightarrow 5\text{H}_2\text{O} + 6\text{C}$

(из смеси, содержащей декстрин, при медленном нагреве);
 $\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{S}$ (из смеси, содержащей пек).

Взаимодействие газовой фазы с металлом в контактной зоне отливки характеризуется окислительно-восстановительными реакциями. В общем виде взаимодействие металла с кислородом можно описать реакцией



Реакции взаимодействия компонентов сплава Fe, Cr, Mn, Ti, Ni с парами воды в условиях контакта жидкого металла с формой являются экзотермическими. При повышении температуры равновесие реакций сдвигается в сторону образования окислов. Прочность окислов пропорциональна их теплоте образования и температуре плавления. Чем меньше теплота образования и ниже температура плавления окислов, тем ниже их прочность и температура диссоциации.

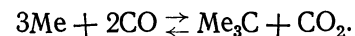
Термическая диссоциация большинства окислов металлов, содержащихся в литых сплавах (кроме окислов марганца и железа высшей валентности), в интервале температур 1000—1500°С незначительна.

Для окислов марганца и железа температура диссоциации повышается при понижении валентности катиона: MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , MnO и Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO . По данным Г. Шенка [93], термическая диссоциация окислов типа MeO при 1500°С очень низкая.

Пары воды оказывают окисляющее действие на металлы, имеющие высокие температуры плавления и контакта с формой. Термодинамический анализ реакции $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{H}_2$ показывает, что до температуры 1300°С равновесие смещено в сторону восстановления железа [94, 95]. Константа равновесия при температуре 1300°С равна 1,22, а при температуре 1380°С она возрастает [93] и становится равной 3. При этом равновесие смещается в сторону окисления железа. Для многих металлов, имеющих низкие температуры плавления и контакта с формой, окисление водяным паром в зоне контакта происходит не будет.

Реакция взаимодействия металла с углекислотой протекает в результате диссоциации окиси углерода $2\text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{O}_2$. При этом свободный кислород активно окисляет металлы, окислы которых имеют меньшую упругость диссоциации, чем парциальное давление кислорода в контактной зоне. Экспериментальные данные [93] показывают, что при температуре контакта отливки и формы давление окиси углерода в системе $\text{Fe}-\text{CO}-\text{CO}_2$ возрастает с повышением температуры, что подтверждает направление реакции в сторону окисления металла. При температурных условиях контакта отливки и формы окись углерода является устойчивым химическим соединением и поэтому не может

непосредственно окислять металл. Однако для карбидообразующих металлов уже при температурах выше 700—800°С заметно начинается протекать реакция образования карбидов

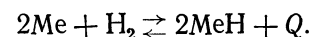
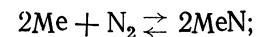
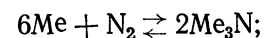


Образовавшаяся углекислота диссоциирует на CO и O_2 , последний окисляет металл по указанным выше схемам. Реакции взаимодействия металлов, образующих устойчивые карбиды и окислы, с окисью углерода при температуре заливки и контакта жидкого металла с формой смещены в сторону образования окислов и карбидов.

Двуокись серы является неустойчивым соединением и относительно легко диссоциирует на S и O_2 . Свободные S и O_2 в условиях высоких температур интенсивно реагируют с большинством металлов, образуя прочные соединения — сульфиды и окислы.

Сероводород при температуре выше 400°С диссоциирует на H_2 и S . В избытке воздуха сероводород сгорает с образованием H_2O и SO_2 , а при недостатке кислорода выделяет свободную серу: $\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{S}$. Свободная сера активно реагирует со многими металлами.

Молекулярный азот при температурах до 1200°С практически стабилен вследствие высокой теплоты диссоциации ($\text{N} + \text{N} = \text{N}_2 + 208$ кал) [93]. В присутствии примесей кремния и алюминия при повышенных температурах адсорбция азота металлом возрастает, при 1540 и 1760°С для железа она составляет соответственно 0,039% N_2 и 0,042% N_2 . Различные соединения азота, образующиеся в зоне контакта, диссоциируют на атомарные N и H , которые активно вступают во взаимодействие с металлами с образованием нитридов и гидридов по реакциям



Гидриды образуются также при взаимодействии металлов с другими водородсодержащими соединениями (H_2O , CH_4 , H_2S , PH_3 и др.).

Адсорбция водорода железом, кобальтом, никелем, медью сопровождается эндотермическим эффектом, поэтому химическое равновесие реакции взаимодействия этих металлов с водородом при повышении температуры будет смещаться в сторону образования гидридов. По данным [88], в области температур плавления металлов наблюдается резкий скачок величины адсорбции, которая для железа возрастает более чем вдвое.

Низкая прочность многих гидридов свидетельствует об их нестабильности, многие из них являются носителями активного

водорода, который легко выделяется при выдержке в форме и термической обработке отливок.

При контактных процессах ($T_k > 1500^\circ \text{C}$) компоненты жидкого металла (марганца, алюминия, хрома и др.) могут вступить во взаимодействие с содержащейся в маршалитовых покрытиях двуокисью кремния, и более вероятно, что этот процесс идет в присутствии кислорода.

В соответствии с исследованиями [44], при температуре 1400°C под влиянием углерода, выделяющегося из органических связующих и добавок, происходит восстановление двуокиси кремния по реакции $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{SiO} \uparrow + \text{CO}$. Поэтому окисление компонентов жидкого металла в дальнейшем может идти через газовую фазу CO. Наличие в жидком металле водорода, азота и кислорода, не связанных в соединения, интенсифицирует образование неметаллических включений в процессе кристаллизации жидкого металла. Количество, форма, размер и распределение неметаллических включений определяются большим количеством факторов, в том числе интервалом и фронтом кристаллизации, температурой и вязкостью, конвективными потоками и режимом питания отливки, вводом раскислителей и модификаторов. Если продукты раскисления смачиваются жидким металлом, включения имеют сплюснутую или более сложную форму, если не смачиваются, — сферическую.

Вследствие избирательной кристаллизации сплава неметаллические включения коагулируют и оттесняются в глубь отливки (табл. 41). Чем толще стенка отливки и чем медленнее происходит ее затвердевание, тем шире ликвиционная зона a_x и крупнее неметаллические включения (рис. 66, 67).

Большое влияние на образование неметаллических включений в поверхностном слое отливок оказывают пары воды. Как видно из табл. 42, чем больше влажность облицовки, тем больше включений в поверхностном слое отливки. При получении

Таблица 41

Распределение неметаллических включений по сечению образцов из армо-железа

Материал тигля	Среднее количество включений в зонах, вкл./мм ²	
	Периферийная	Центральная
Магнезит	240	303
Бадделент	270	294
Циркон	295	317
Дистен	310	331
Маршалит	322	340

Таблица 42

Влияние содержания водяных паров в песочно-глинистой облицовке формы на образование дефектов в поверхностном слое литого образца из углеродистой стали

Содержание воды в облицовке, %	Неметаллические включения, %		Газовые раковины, %	
	макро	микро	макро	микро
6	0,59	0,41	0,071	0,0068
2	0,19	0,28	0,0037	0,0060
0,5	0,15	0,21	0,002	0,0015
Менее 0,02	—	0,13	—	—

отливки в сухих (0,5% воды) и прокаленных (менее 0,02% воды) формах преобладающими являются микровключения (окислы и гидриды железа, марганца и их силикаты), а при отливке в сырые формы — макровключения.

В табл. 43 приведены данные по содержанию газов в отливках, полученных по заводской технологии. Как видно из табли-

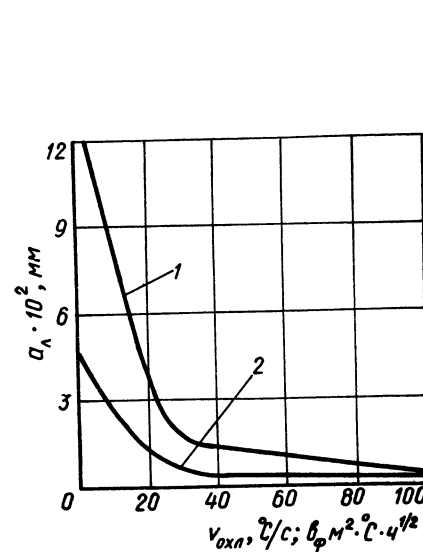


Рис. 66. Ширина пограничной зоны кристаллов в зависимости от скорости охлаждения и скорости затвердевания металла: 1 — нейзильбер; 2 — сталь 35Л.

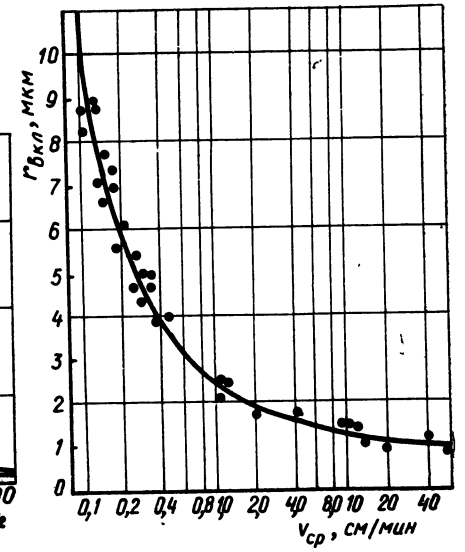


Рис. 67. Зависимость размера неметаллических включений от скорости затвердевания в металлических и неметаллических формах с покрытиями.

цы, сырая форма активно насыщает отливку азотом, кислородом и водородом. Содержание кислорода в поверхностном слое отливки, полученной в сухой форме, уменьшается в 2 раза, а в прокаленной — в 12 раз. Пары воды и эрозия поверхностного слоя формы являются главным источником возникновения микродефектов в поверхностном слое отливки.

При соприкосновении жидкого металла с формой последняя воспринимает тепловой удар, в результате которого в ней и в отдельных зернах материала возникают локальные предельные тепловые напряжения (рис. 68). Под действием этих напряжений в поверхностном слое формы образуются трещины, зерна и целые агрегаты материалов отслаиваются и в дальнейшем падают в поверхностный слой отливки.

Графито-бентонитовые и графито-талковые покрытия содержат графит пластинчатой формы, который не смачивается связующими и поэтому при взаимодействии с жидким металлом

легко отрывается (частично или полностью смывается жидким металлом) и попадает в поверхностный слой затвердевающего металла. Поскольку графит обладает высокой термостойкостью и в большинстве случаев не окисляется, то пластинки графита сохраняются в металле до полного его затвердевания. В результате на поверхности отливки образуются микротрещины, по

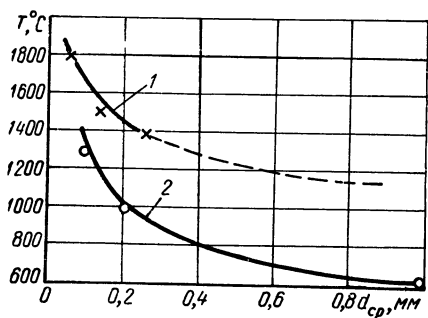


Рис. 68. Термостойкость цирконовых (1) и кварцевых (2) зерен. Выдержка теплового удара 3 с.

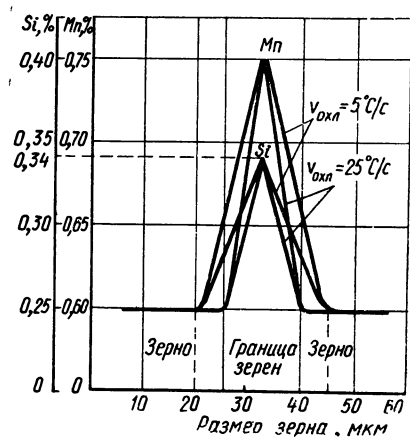


Рис. 69. Химическая микронеоднородность и структура литых образцов из стали 25Л.

ответвления, микро- и макронеровностей, трещин и неметаллических включений. Вследствие накопления примесей, выделяющихся из затвердевающего поверхностного слоя металла, на фронте кристаллизации образуется диффузионный слой, значительно увеличивающий структурную и концентрационную неоднородность и изолирующий мелкокристаллическую зону от жидкого металла (см. рис. 31).

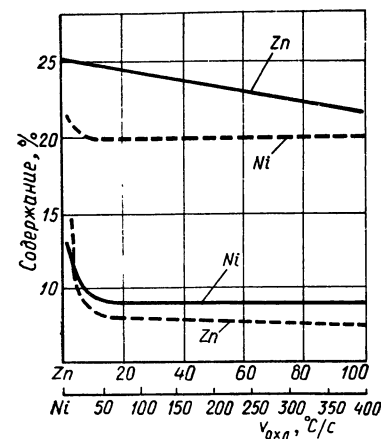


Рис. 70. Химическая микронеоднородность литых образцов из нейзильбера в зависимости от скорости охлаждения: сплошные кривые — на границе; штриховые — в зерне.

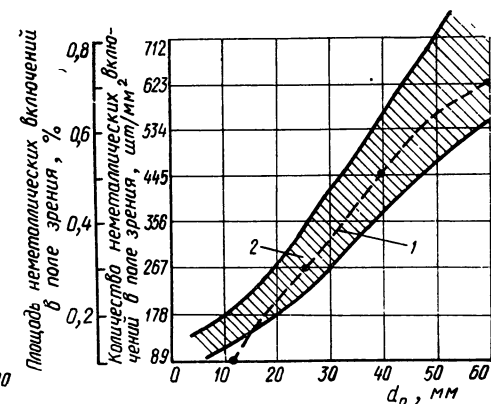


Рис. 71. Влияние размера литого образца на физическую неоднородность (сталь 35Л): 1 — количество неметаллических включений в поле зрения; 2 — площадь неметаллических включений в поле зрения, %.

форме и размерам соответствующие пластинкам графита (чугунное литье).

Продукты взаимодействия отливки и формы попадают в жидкий металл, где в зависимости от состояния металла и стадии процесса кристаллизации адсорбируются на поверхности кристаллов и образуют субмикроскопические и микроскопические дефекты.

Если в контактной зоне отливки концентрация примесей достигает перенасыщения, происходят их коагуляция и образование конгломератов неопределенной формы, имеющих острые

Таблица 43
Содержание газов, %, в поверхностном слое отливок из углеродистой стали, полученных в формах с различной влажностью

Газ	Жидкий металл	Отливка, полученная в форме		
		сырой (влажность 5%)	сухой (влажность 0,8%)	прокаленной при 1000°C
Азот	0,019	0,15	0,088	0,029
Кислород	0,005	0,075	0,032	0,006
Водород	0,008	0,0095	0,0092	0,0090

Покрyтия форм, в которых кислород, водород, пары воды и другие реакционные примеси отсутствуют или находятся в прочно связанном состоянии, уменьшают вероятность образования окислов, нитридов, гидридов, сульфидов и других продуктов взаимодействия.

В условиях литейных форм кроме неметаллических включений на поверхности отливки может образоваться полимолекулярный адсорбционный слой. При повышении температуры в контактной зоне и увеличении химического сродства взаимодействующих фаз вероятность образования этого слоя возрастает.

В результате термохимического взаимодействия с формой химический состав поверхностного слоя отливки значительно изменяется (рис. 69, 70). Большая физическая (рис. 71) и химическая неоднородность обусловлена «пленением» чужеродных частиц в замкнутых полостях кристаллизующегося металла.

Экспериментальные исследования, направленные на улучшение качества поверхности и поверхностного слоя гильз, бло-

ков и реакторов, позволили установить целесообразность применения при их производстве цирконовых покрытий и форм из сыпучих песков, не содержащих связующих.

Одним из требований к гильзам, блокам и реакторам является повышенная плотность структуры, исключаящая негерметичность (гидротечь) при испытании на стенде и в условиях эксплуатации. Согласно данным заводов брак отливок по гидротечи часто достигает 15—28% общего брака. Металлографический анализ дефектных участков показал, что негерметичность отливок обусловлена наличием микротрещин, локальных скоплений неметаллических и графитовых включений и газовой пористостью поверхностного слоя отливки.

Органические связующие и влага, входящие в состав формовочных и стержневых смесей, способствуют образованию газовой пористости и других поверхностных дефектов в отливках (табл. 44). Повышение поверхностной прочности форм путем применения упрочняющих противопригарных цирконовых покрытий и форм из сухих песков значительно снижает количество неметаллических включений, трещин и других поверхностных дефектов гильз и реакторов, улучшает герметичность.

Повышение инертности покрытий методами тепловой и химической обработки, увеличение плотности, прочности и термостойкости покрытий значительно замедляет процессы, протекающие на границе металл — форма и дает возможность получить высококачественные отливки. Изучение поверхностного слоя отливок из титана показало, что материал литейной формы

Таблица 44

Содержание газов и неметаллических включений в отливках

Технологические особенности формы	Поверхностный (наружный) слой отливки		Сердцевина	
	Неметаллические включения, г/100 г	Газы, см ³ /100 г	Неметаллические включения, г/100 г	Газы, см ³ /100 г
Комбинированная, верх — металл, низ — самотвердеющая наливная смесь	0,003	До 0,5	0,0075	8—10
Стержни, центробежная заливка (гильза и блок)	0,008	10—12	0,025	12—17
Сырая песочно-глинистая смесь (блок)	0,009	7—8	0,03	10—12
Стержни с графитовым покрытием (реактор)	0,017	10	0,03	15
Стержни с цирконовым покрытием (реактор и гильза)	0,004	0,65	0,0066	1,25
Форма из сыпучих песков и порошков (опытные гильзы)	0,0045	0,35	0,0070	0,4

в большой мере влияет на глубину загрязненного примесями поверхностного слоя отливки (мм), а именно:

Сталь	0,05—0,1
MgO, TiN	0,1—0,15
ZrO ₂	0,15—0,2
Al ₂ O ₃	0,2—0,3
ZrSiO ₄	0,5—1,0
Графит	1,0—2,0

В табл. 45 приведена характеристика контактной зоны форм и полученных в них отливок из титана. Данные по содержанию TiO₂ в поверхностном слое формы полностью согласуются со значениями интенсивность взаимодействия и ниже содержание TiO₂ в поверхностном слое формы. Графитовые формы насыщают поверхностный слой отливки карбидами, резко снижающими прочностные и антикоррозионные свойства.

Циркон при контакте с жидким титаном диссоциирует на ZrO₂ и SiO₂. Двуокись кремния активно взаимодействует с титаном и насыщает поверхностный слой отливки кремнием, увеличивая его концентрацию в 10—16 раз по сравнению с исходным металлом.

Наиболее распространенные в настоящее время связующие — жидкое стекло и этилсиликат — не могут гарантировать получение качественных отливок из титана. Применение этих связующих основано на образовании геля SiO₂, цементирующего зерна наполнителя. В условиях контакта с жидким титаном SiO₂ восстанавливается до газообразной монооксида SiO и свободного O₂ и является источником примесей и газовой пористости.

Газотворные связующие Al(H₂PO₄)₃, Al₃(OH)₈NO₃, MgTiF₆, MgCl₂, NH₄Cl не удаляются полностью при высокотемпературном обжиге форм; они разлагаются при контакте с жидким титаном и образуют газовые дефекты. Многие бескислородные тугоплавкие соединения — нитрид и карбонитрид бора, бориды титана и хрома — легко возгоняются в вакууме при высоких температурах, насыщая титан примесями и газовыми включениями.

Применение для форм материалов с высокой охлаждающей способностью (меди, стали, нитрида титана, магнетита, электрокорунда), коэффициент тепловой аккумуляции которых превышает 100 ккал/м²·°С·ч^{1/2}, позволяет ограничить физико-химическое взаимодействие титана с формой и получить качественные отливки.

Пригар. Разновидностью неметаллических включений является пригар, который состоит из продуктов взаимодействия металла и формы. На практике глубина пригарного слоя на поверхности отливки в некоторых случаях достигает 10—15 мм. Пригарные образования поражают поверхность и частично

Влияние формы на изменение свойств поверхностного слоя отливок из титана

Компоненты формы	Микротвердость, кгс/мм ² , на расстоянии от поверхности отливки, мм			
	0,05	0,5	1,0	Середина отливки
Электрокорунд+этилсиликат	890	600	430	320
Электрокорунд+фтористый кальций	530	360	290	260
Электрокорунд+фтористый титанат магния	624	410	320	270
Электрокорунд+бутилортотитанат	715	530	380	280
Магнезит+жидкое стекло	780	550	400	300
Магнезит+двуокись титана	610	400	290	240
Магнезит+бутилортотитанат	640	420	310	250
Двуокись циркония+этилсиликат	810	570	480	360
Двуокись циркония+однозамещенный фосфат алюминия	620	340	290	250
Двуокись циркония+бутилортотитанат	590	330	274	270
Чугун	430	320	300	280
Графит+органическая смола	720	570	410	300
Циркон+углерод	640	520	380	320
Сталь с покрытиями	255	274	290	280
Медь с покрытиями	274	264	300	260
Алюминий с покрытиями	800	236	322	250
Борид титана	590	370	300	240
Карбид титана	690	380	330	310
Нитрид титана	610	330	300	280
Нитрид алюминия	850	560	420	300
Нитрид бора	810	520	500	400
Нитрид циркона	630	410	350	320
Карбонитрид бора	790	570	490	380
Борид хрома	620	530	500	430
Циркон	830	690	510	320

Примечание. Содержание примесей, %, в исходной губке: С—0,06; N₂—0,06; O₂—0,10;

Содержание примесей, %			Характеристика контактной зоны формы		Контактный угол смачивания, град.
С	N ₂	O ₂	Новообразования	Содержание TiO ₂ , %	
0,17	0,030	0,40	3Al ₂ O ₃ ·3SiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ·TiO ₂ ; TiO ₂	25	100
0,19	0,032	0,24	5Al ₂ O ₃ ·CaF ₂ ; 3CaO·Al ₂ O ₃ ; Al ₂ O ₃ ·TiO ₂ ; TiO ₂	15	—
0,17	0,030	0,44	MgO; MgO·TiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ; Al ₂ O ₃ ·TiO ₂ ; TiO ₂	20	—
0,16	0,030	0,52	Al ₂ O ₃ ·TiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ ; TiO ₂	30	80
0,19	0,030	0,06	Mg·SiO ₂ ; MgO·TiO ₂ ; TiO ₂	30	—
0,19	0,030	0,32	MgO·TiO ₂ ; TiO ₂	25	—
0,18	0,031	0,42	MgO·TiO ₂ ; TiO ₂	35	60
0,19	0,032	1,16	ZrSiO ₄ ; CaO·SiO ₂ ; TiO ₂ ·SiO ₂ ; TiO ₂	25	100
0,22	0,034	0,41	ZrSiO ₄ ; CaO·SiO ₂ ; ZrO ₂ ·SiO ₂ ; TiO ₂	20	—
0,19	0,030	0,40	ZrSiO ₄ ; CaO·ZrO ₂ ; ZrO ₂ ·TiO ₂ ; TiO ₂	20	115
0,26	0,027	0,19	TiC	TiC—10	—
0,35	0,028	0,21	TiC	TiC—20	—
0,29	0,030	0,35	TiO ₂ ; TiC; SiC; Al ₂ O ₃	TiO ₂ —15; TiC—10	—
0,16	0,025	0,18	—	—	—
0,15	0,024	0,16	—	—	—
0,17	0,028	0,18	AlN	—	—
0,16	0,030	0,35	TiO ₂	40	50
0,25	0,032	0,38	TiO ₂	40	—
0,18	0,062	0,37	TiO ₂	—	—
0,20	0,073	0,40	Al ₂ O ₃ ·TiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ; TiO ₂	35	—
0,22	0,075	0,36	TiO ₂	25	—
0,19	0,071	0,33	ZrO ₂ ; TiO ₂ ; ZrTiO ₃	30	—
0,32	0,068	0,27	TiO ₂	25	—
0,24	0,037	0,30	Cr ₂ O ₃ ; TiO ₂	30	—
0,19	0,039	0,45	SiO ₂ ; TiO ₂ ; ZrO ₂	30	—

в отливке: С—0,16; N₂—0,02; O₂—0,13.

поверхностный слой отливки. Пригар является одним из наиболее распространенных и серьезных дефектов литья (рис. 72, 73). Он представляет собой неметаллический или частично металлизированный слой, прочно удерживающийся на поверхности отливки. Пригар образуется в результате сложных физико-химических процессов, протекающих в контактной зоне металл — форма.

На интенсивность пригарообразования большое влияние оказывают физико-химическая активность, пористость и термическая стойкость облицовочного слоя формы, скорость затвердевания, величина ферростатического давления и степень раскисленности жидкого металла, характер среды в контактной зоне и на-

личие катализаторов (водорода, кислорода, серы) [27, 30, 96—99].

Пригар образуется в определенный период затвердевания поверхностного слоя отливки. Поэтому этот процесс необходимо рассматривать с точки зрения химической кинетики и капиллярных явлений, обуславливающих образование продуктов взаимодействия жидкого металла с облицовкой формы. Известно, что образование химических соединений определяется подвижностью ионов и электронов взаимодействующих компонентов (фаз). Ионы железа, марганца и других компонентов жидкого металла характеризуются повышенной активностью и большими значениями коэффициентов диффузии и самодиффузии, вследствие чего интенсивно диффундируют в рабочий слой формы,

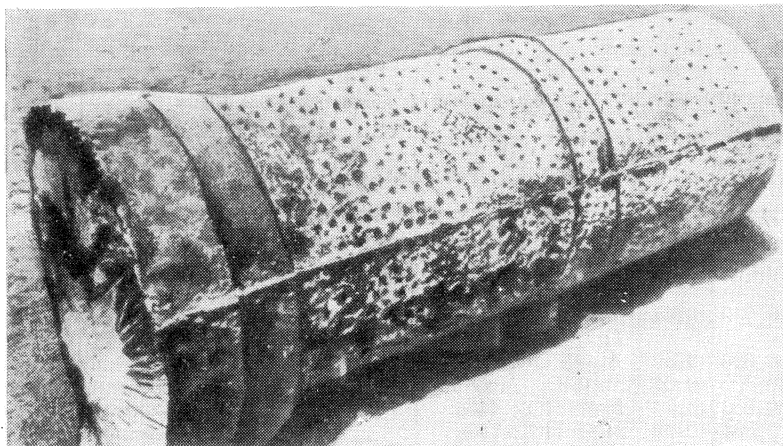


Рис. 72. Пригар на поверхности отливки из стали 35Л, полученной в песочно-глинистой форме с прошивкой гвоздями.

где с ними вступает во взаимодействие кислород; основным поставщиком кислорода в контактной зоне формы являются легкоплавкие и непрочные соединения, влага и воздух, содержащиеся в порах формы. Если изолировать рабочую зону формы из тугоплавких и безводных материалов от остальной части формы, можно получить систему с подвижными ионами металла и малоподвижными ионами кислорода.

Экспериментальная проверка влияния различных факторов на интенсивность пригарообразования была проведена на образцах, изготовленных без покрытий, а также с однослойными

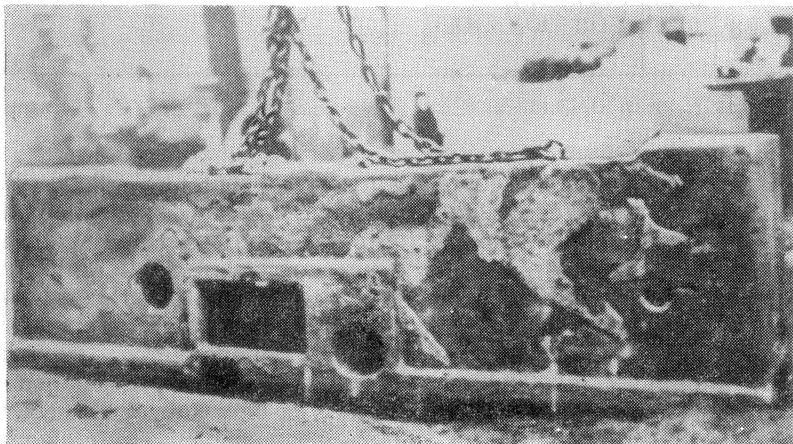


Рис. 73. Ужимины и пригар на поверхности станины шлифовального станка.

и двухслойными покрытиями. Наполнитель покрытий — цирконный порошок дисперсностью 30 мкм — подвергался предварительной прокатке при 1400°С и химической обработке плавиковой и соляной кислотами, глицерином для уменьшения содержания адсорбционной влаги, увеличения удельной поверхности зерен и повышения плотности структуры покрытий. Высушенные при температуре 300—350°С образцы устанавливали в форму и заливали углеродистой сталью при 1550—1560°С. После охлаждения отливок отбирали пробы из участков, непосредственно прилегающих к отливке и расположенных на различном расстоянии от поверхности контакта металл — форма, для петрографического и рентгеноструктурного исследований.

Покрытие фиксируется в виде слоя толщиной 0,2—0,4 мм, пористость которого достигает 15—20%. В контактной зоне формы степень спекания покрытия увеличивается, а пористость уменьшается до 9—10%. Это объясняется образованием легкоплавких эвтектик при взаимодействии легкоплавких примесей цирконового концентрата и глинистого связующего при длительном нахождении образца в условиях высоких температур.

Окислы железа FeO, Fe₂O₃ и Fe₃O₄ располагаются в виде дисперсных включений, плен, прослоек, скоплений и т. п., находящихся в цементирующем веществе. Содержание окислов железа в корке — 7—10% Fe₂O₃, на контакте с формой — 3—4% FeO. Силикаты железа располагаются в покрытии в виде изолированных зерен фаялита и сопутствующего ферросилита FeSiO₃, оси кристаллов которого ориентированы к поверхности контакта.

В контактной зоне наблюдается диссоциация циркона на ZrO₂ и SiO₂. При увеличении плотности покрытий степень диссоциации циркона значительно уменьшается, содержание фаялита уменьшается от 4,23 до 1,0—2,5%, содержание ферросилита увеличивается от 2,3—2,5 до 3,5—4,0%. Большое влияние на состояние поверхности отливки оказывает кристобалитизация кварца в контактной зоне формы, сопровождающаяся значительными объемными изменениями.

При заливке металла в форму без покрытий (рис. 74, а) в области непосредственного контакта наблюдается мощная зона чистых окислов железа (FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄) толщиной до 0,6 мм. Далее следует переходная зона (4—5 мм), отличающаяся сложным фазовым составом. Межзерновые промежутки заполнены окислами и силикатами железа, а также продуктами диссоциации компонентов смеси (муллит — 10%, стекловидная фаза — 3%). Изменяется конфигурация зерен кварца, края их округляются вследствие образования кристобалита. За переходной зоной следует периферийная, главной составляющей которой являются кристобалитизированные зерна кварца. При использовании маршалитовых покрытий характер контактной и переходной зон не изменяется, несколько уменьшается размер пери-

ферийной зоны (рис. 74, б). При использовании цирконовых покрытий наблюдается четко выраженная зона чистых окислов глубиной 0,01—0,03 мм, за которой следует неизменный слой цирконового покрытия (рис. 74, в). Применение цирконовых покрытий позволяет исключить пригарообразование (рис. 75) и сократить безвозвратные потери металла. В отливках, полученных в формах с цирконовыми покрытиями и облицовками, со-

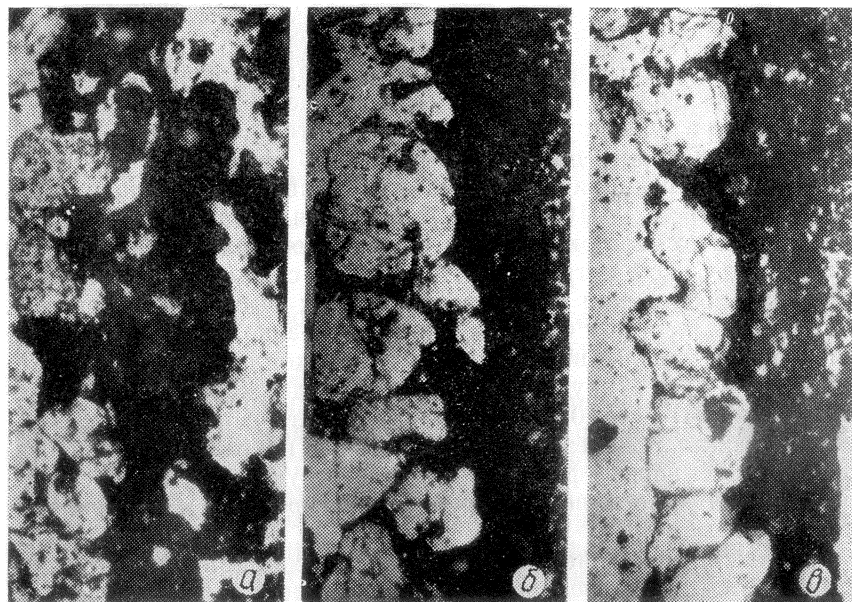


Рис. 74. Микроструктуры контактной зоны металл—форма, полученные в формах без покрытия (а), а также с маршалитовым (б) и цирконовым (в) покрытиями.

держание продуктов взаимодействия и частиц материалов формы значительно меньше, чем в отливках, полученных в формах с маршалитовыми покрытиями и облицовками (табл. 46, 47). Высокая термическая стойкость и химическая инертность цирконовых покрытий определяют их высокую прочность и сопротивление эрозии при контакте с жидким металлом. Поэтому циркон рекомендуется применять для производства точного литья, где однородность и прочность металла отливки имеют первостепенное значение.

Оксиды железа Fe_2O_3 присутствуют в контактной зоне в виде небольших скоплений между зернами и пленками на их поверхности, а FeO — в виде слоя на поверхности контакта покрытие — металл. Эти окислы представляют собой различные не только морфологические, но и генетические типы.

Поскольку диффузия кислорода, имеющего эффективный ионный радиус 1,32 Å, затруднена и требует достаточно длительного времени, более вероятно, что образование основного количества окислов железа происходит за счет поступления в контактную зону ионов железа с ионным радиусом 0,67 Å (Fe^{+3}) или 0,88 Å (Fe^{+2}), скорость диффузии которых в жидком металле более значительна.

Слой окислов образуется в результате окисления диффундировавших со стороны металла ионов Fe^{+2} . При этом кислород частично заимствуется из окружающей среды (паров воды и газовой среды подложки), частично окисление связано с процессом диссоциации циркона на SiO_2 и ZrO_2 , часть которой восстанавливается до SiO с выделением свободного кислорода. Наибольшее количество окислов железа на контактной поверхности противопригарного покрытия соответствует образцам с повышенным содержанием продуктов диссоциации.

При образовании FeO на границе металл — покрытие ограничивающим фактором является скорость диффузии ионов железа через слой окислов. Регулировать этот процесс можно, применяя бескислородные или трудноотдающие кислород покрытия.

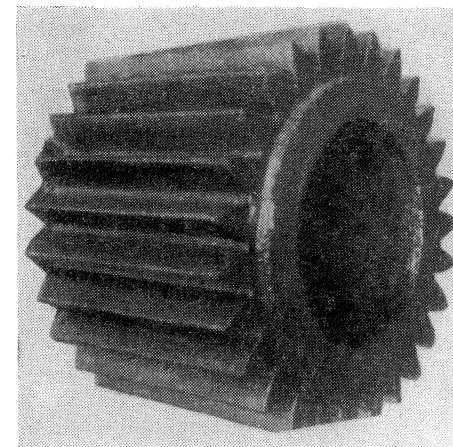


Рис. 75. Шестерня, отлитая с применением цирконового покрытия.

Таблица 46

Влияние материала покрытий и облицовок форм на загрязненность поверхностного слоя стальных отливок

Расстояние от поверхности отливки, мм	Содержание компонентов покрытий и облицовок в поверхностном слое отливки, %			
	Циркон		Маршалит	
	Облицовочная смесь	Покрытие	Облицовочная смесь	Покрытие
0,25	0,15	0,06	10,0	5,0
0,50	0,13	0,04	7,0	3,5
0,75	0,13	0,02	7,0	3,0
1,0	0,11	0,01	6,5	2,5

Таблица 47

Влияние материала покрытий форм на образование дефектов стальных отливок

Сталь	Количество дефектов (засор, плены, пригар), %	
	Маршалитовые покрытия	Цирконовые покрытия
Углеродистая	0,80	0,26
Марганцовистая	0,54	0,16
Легированная	0,81	0,20

Таблица 48

Характеристика металлов и плен, находящихся на поверхности литых образцов

Металл, пленка	Удельный объем, г/см ³	Отношение удельного объема пленки к удельному объему металла	Характеристика пленки (химического пригара)
Zr	0,154	—	—
ZrO ₂	0,150	0,197	Дырчатая
ZrN	0,140	0,91	»
ZrSiO ₄	0,200	1,30	Плотная, спекшаяся
Al	0,333	—	—
Al ₂ O ₃	0,269	0,81	Дырчатая
AlN	0,326	0,98	»
Cr	0,133	—	—
Cr ₂ O ₃	0,192	1,39	Плотная, спекшаяся
CrN	0,169	1,22	» »
Mn	0,135	—	» »
MnO	0,184	1,36	» »
MnS	0,25	1,85	» »
Fe	0,127	—	—
FeO	0,172	1,35	Плотная, спекшаяся
Fe ₂ O ₃	0,188	1,48	» »
Fe ₃ O ₄	0,192	1,51	» »
FeS	0,208	1,64	» »
FeS ₂	0,200	1,58	» »
Ni	0,112	—	—
NiO	0,135	1,20	Плотная, спекшаяся
Mg	0,57	—	—
MgO	0,277	0,485	Дырчатая
MgS	0,356	—	—
Mg ₃ N ₂	0,369	0,645	»
Ti	0,22	—	—
Ti ₂ O ₃	0,220	1,0	Дырчатая
TiO ₂	0,262	1,18	Сплошная, плотная
Ti ₃ O ₄	0,212	0,965	Дырчатая
Ti ₂ O ₅	0,187	0,85	»
Zn	0,14	—	—
ZnO	0,161	1—1,5	Сплошная, плотная

Образование Fe₃O₄ и Fe₂O₃ зависит главным образом от диффузии кислорода через слой окислов и от микропористости покрытий. Характеристика плен, образующихся на поверхности литых образцов, представлена в табл. 48. Отношение удельного объема соединения к удельному объему металла в определенной степени является критерием плотности структуры пленки: если это отношение меньше единицы — пленка дырчатая, если отношение больше единицы — пленка плотная.

Диффузия ионов жидкого металла в контактную зону определяется химическим составом, температурой и циркуляцией

жидкого металла, движение атомов (ионов) компонентов формы — силой химической связи их в соединениях и температурой нагрева формы. Диффузии кислорода в контактную зону препятствуют низкое содержание кислорода в покрытиях, большая прочность химической связи его в соединениях, низкая темпе-

Таблица 49

Критические температуры огнеупорных окислов, входящих в состав формовочных смесей и покрытий

Окисел	Температура плавления, К	Температура начала заметного испарения, К	$\frac{T_{н.и}}{T_{пл}}$
CeO ₂	2600	1875	0,7
MgO	2800	1900	0,7
CaO	2572	1702	0,7
Al ₂ O ₃	2054	1727	0,8
ZrO ₂	3027	2327	0,77
SrO	2460	1597	0,67
BeO	2560	2100	0,8
ThO ₂	3327	2400	0,72
TiO ₂	1640	1177	0,75
SiO ₂	1710	1187	0,73

Таблица 50

Влияние массы отливки и влажности облицовочной смеси на образование поверхностных дефектов стальной отливки

Наименование отливки	Толщина стенки, мм	Масса, кг	Характеристика отливки при влажности смеси, %		
			3	5	7,5
Корпус стального редуктора	10—40	20	Отливка чистая, имеется очень незначительный пригар у литников	Отливка чистая, имеется местный пригар в углах термических узлов и у литников	Отливка имеет пригар
Ступица трамвайного вагона	25—60	60	Отливка чистая	Отливка чистая, имеется местный пригар у литников	Отливка чистая, имеется местный пригар в углах термических узлов и у литников
Специальная арматура	30	80	То же	Отливка чистая	Отливка чистая, имеется местный пригар у литников
Шестерня с литым зубом	80	1000	»	»	Отливка чистая

ратура контакта и высокая плотность покрытий. При использовании в качестве наполнителей покрытий тугоплавких соединений поставщиком кислорода являются пары воды и непрочные соединения, поступающие из формы. Использование в качестве наполнителей покрытий высокотемпературных окислов ограничивает диффузию кислорода в металл, так как температура начала их заметного испарения $T_{н.и}$ значительно превышает температуру жидкого металла $T_{пл}$ (табл. 49).

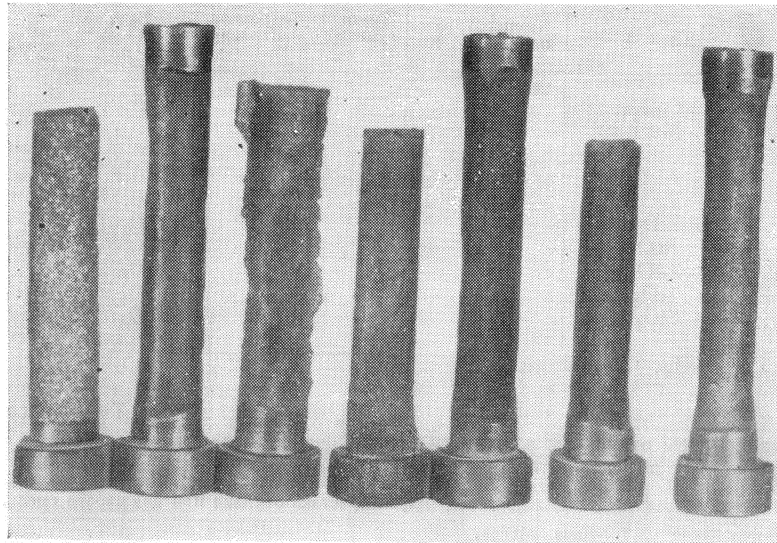


Рис. 76. Дефекты поверхности отливок типа намывов.

Большое влияние на пригарообразование оказывают влажность формы, толщина стенок и масса отливок (табл. 50). Для отливок с толщиной стенок 10—30 мм и массой до 60 кг пригарообразование увеличивается при повышении влажности. При одинаковой влажности форм пригарообразование уменьшается при увеличении толщины и массы отливок. Это объясняется более быстрым удалением воды из поверхностного слоя формы.

В образовании дефектов отливки большую роль играют газовая фаза и пористость формы. Так, большая газопроницаемость формы способствует капиллярному подосу жидкого металла и образованию механического и химического пригара (табл. 51). Малая газопроницаемость и большая газотворная способность формы вызывают образование на поверхности отливки ужимин и других дефектов. Недостаточная поверхностная прочность и слишком слабая набивка формы (нарушение технологии заливки формы) являются причинами образования намывов (рис. 76). При большой газотворности форм образуются

Таблица 51

Влияние материала формы и размера пор на глубину просачивания жидкой стали, мм

Наполнитель покрытия	Глубина просачивания при диаметре пор, мм					
	0,55	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0
Циркон	—	0,3	0,9	1,3	2,5	2,5
Муллит	—	0,2	0,4	0,9	2,0	2,5
Кварц	0,5	0,7	2,3	3,2	3,7	Более 5

газовые «подушки», которые препятствуют плотному соприкосновению жидкого металла со стенками формы и приводят к образованию недоливов. Регулируя количество и характер газотворных составляющих покрытий, можно в значительной степени управлять поверхностными процессами в нужном для практики направлении.

2. Микрогеометрия поверхности

Структура и геометрия поверхности деталей определяются природой металла, технологией изготовления и режимами обработки. Степень взаимосвязи этих факторов и их влияние на формирование свойств машиностроительных деталей в настоящее время изучены недостаточно. Сравнительное исследование состояния поверхностей (поверхностного слоя) деталей, полученных различными методами, позволяет оценить их эффективность в формировании качественной поверхности.

Исследование свойств механически обработанной и литой поверхностей (рис. 77) производилось на образцах и деталях из стали, чугуна и цветных сплавов, полученных по существующей (заводской) технологии и технологии, разработанной в ИПЛ АН УССР. Варьирование режимов осуществлялось путем изменения ширины, глубины и скорости резания при точении, фрезеровании, шлифовании и сверлении.

Сравнительное изучение микрогеометрии плоской и орнаментированной поверхностей производили на образцах, полученных прокаткой, штамповкой, протяжкой, механической обработкой и кристаллизацией жидкого металла на подложках из сухих и влажных смесей и покрытий. Измерение шероховатости образцов осуществлялось на приборе «Пертометр» фирмы «Гоммельверке» (ФРГ) и профилографе-профилометре модели 201. В тех случаях, когда суммарная величина микровыступов была значительной и не удавалось записать профилограмму с помощью безопорного датчика, волнистость регистрировали датчиком с опорой или интерферометром на двойном микроскопе ПИТ-4. Сопоставление профилограмм волнистости, полученных

различными методами, показало, что высота волн при записи датчиком с опорой на 5—10% ниже, чем при записи безопорным датчиком.

Глубину и степень наклепа определяли путем измерения микротвердости с последующим стравливанием пластически деформированных слоев металла. Деформированный слой деталей и образцов после механической обработки исследовали методом рентгеноструктурного анализа.



Рис. 77. Образцы для исследования свойств поверхности: а — механически обработанные; б — литые.

Величину и знак остаточных напряжений в поверхностном слое определяли механическим методом [100]. Этот метод дает возможность путем последовательного стравливания тонких слоев с поверхности образца и последующего измерения его деформации (величины прогиба пластинки) определить характеристики остаточных напряжений первого рода (осевые напряжения σ_0 на пластинках, вырезанных вдоль образующей цилиндрической детали).

При механической обработке отливок разрушаются различно расположенные кристаллы поверхностного слоя, одни из которых воспринимают усилия сжатия, другие — растяжения (отрыв). При этом на поверхности наблюдаются увеличение размеров и количества трещин, появление углублений, вырванных кристаллов, макро-, микроканавок и гребней (впадин и выступов), профиль которых в определенной мере соответствует или повторяет геометрию режущей кромки инструмента (резца, фрезы, зерен абразива и др.). По длине образца размер канавок изменяется в сторону увеличения. Эта закономерность прослеживается при образовании нароста и затуплении кромки на режущем инструменте. Кроме того, на поверхности имеется значительное количество поперечных (относительно канавок и гребней) макро- и микротрещин, расположенных главным образом во впадинах. Поверхностный слой деталей из чугуна характеризуется рыхлой структурой. Образцы из стали (25Л, 45Л) на

поверхности имеют обезуглероженный слой с ферритной основой. В некоторых стальных деталях, главным образом шлифованных, обнаружены инородные включения величиной 20 мкм с повышенной твердостью, которые расположены в конце канавок несколько большего размера.

Анализ экспериментальных данных показал, что при образовании поверхности методом среза величина нормальных и касательных напряжений, действующих на металл, превышает предел текучести в 1,5—5 раз. При этом не только разрываются атомные связи в плоскости среза или в направлении сдвига слоя металла, но и происходит всесторонняя упруго-пластическая деформация. Поэтому вид, количество и размер поверхностных дефектов (величина выступов и впадин) после механической обработки зависят от соотношения пластической деформации τ_{\max} и напряжений хрупкости σ_{\max} . Специальными исследованиями было установлено, что если $\tau_{\max} > \sigma_{\max}$, то более вероятна пластическая деформация, если $\sigma_{\max} > \tau_{\max}$, происходит хрупкое разрушение материала. Поэтому в зависимости от вида и режима механической обработки (точения, фрезерования, шлифования) схема напряженного состояния материала может быть различной и, следовательно, будут изменяться текстура деформированных слоев металла, вид, размер и характер макро- и микрогеометрии поверхности (рис. 78, 79). В соответствии с современными представлениями, механизм образования поверхности кристаллических тел методом среза имеет свои особенности. Энергия кристаллов, находящихся на поверхности, превышает энергию кристаллов в объеме. Дело в том, что под воздействием тангенциальных напряжений поверхностный слой сжимается, а глубинные слои оказывают ему сопротивление. Поскольку поверхностный слой очень тонкий, во многих случаях он не выдерживает и разрывается. Кроме того, на вновь образованной поверхности имеются некомпенсированные химические связи, компенсация которых идет за счет адсорбции, образования плен и др. Вот почему поверхность, образованная механической обработкой, всегда имеет повышенное количество субмикроскопических двумерных и точечных дефектов — вакансий, дислокаций, примесных атомов, микротрещин и др. (рис. 80, а).

Физико-механические свойства поверхностного слоя оцениваются такими характеристиками: глубиной и степенью наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений, микроструктурой, плотностью дислокаций, концентрацией вакансий и др. Степень наклепа

$$N' = \frac{H_{\mu_{\max}}, H_{\mu_0}}{H_{\mu_0}} \cdot 100\%,$$

где $H_{\mu_{\max}}$ — микротвердость обработанной поверхности; H_{μ_0} — микротвердость исходного материала.

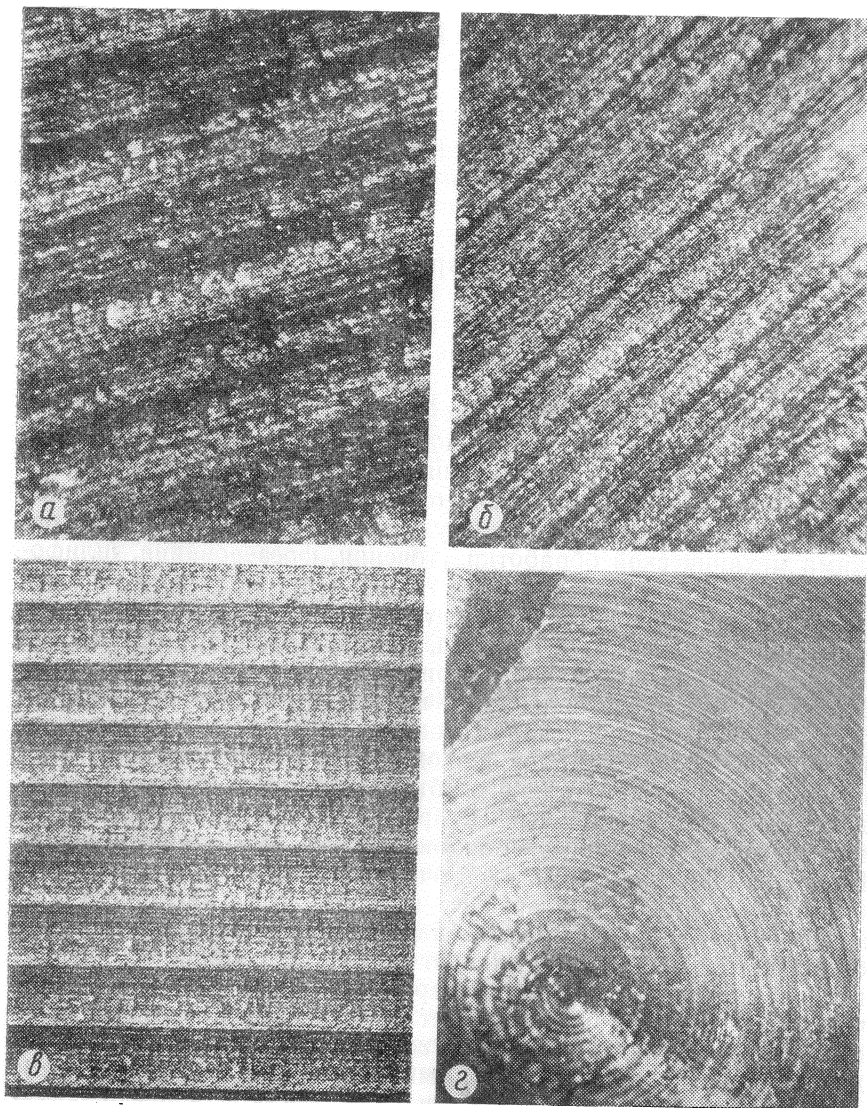


Рис. 78. Поверхности, полученные при точении отливок:
 а — чугун, ∇ 1— ∇ 5 ($\times 20$); б — чугун, ∇ 2— ∇ 6 ($\times 20$); в — сталь 35Л, ∇ 5, торцовое точение ($\times 3$); г — сталь 35Л, ∇ 5, цилиндрическое точение ($\times 20$).

Условно во всем деформированном объеме можно выделить несколько зон с различными характеристиками напряженно-деформированного состояния металла.

Зона I — зона наиболее интенсивной деформации. Напряженно-деформированное состояние в ней возникает вследствие «перетекания» деформированного материала из зоны среза, дополнительного снятия материала округленной режущей кромкой и деформирования его силами трения при контактировании с задней поверхностью инструмента. Зерна металла максимально удлиняются, сжимаются, поворачиваются и перемещаются. Образуется четкая текстура, имеющая разный характер по толщине зоны. Верхнюю границу этой зоны можно определить по микрошлифу корня стружки или по искажению координатной сетки. Расположение верхней границы зависит от скорости резания, длины контакта, толщины срезаемого слоя и свойств обрабатываемого металла. На рис. 80, б показана микро-

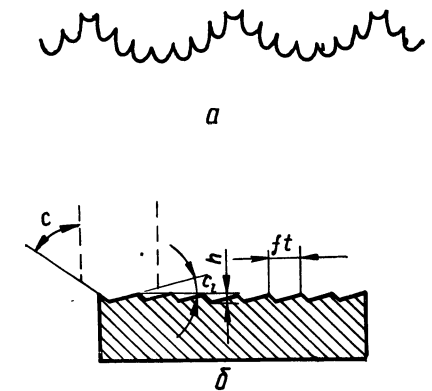


Рис. 79. Микрогеометрия поверхности при цилиндрическом (а) и торцовом (б) фрезеровании [51].

структура поверхностного слоя обточенного образца. Кристаллиты имеют вытянутый характер, а феррит как более мягкая составляющая структуры вытеснен на поверхность. Напряженно-деформированное состояние материала в этой зоне характеризуется наличием значительных (конечных) пластических деформаций, уменьшением скорости деформации ϵ_1 , увеличением интенсивности деформации ϵ_2 и напряжений σ . Величина деформаций в некоторых случаях достигает 100—150%. На поверхности этой зоны образуется тонкая пленка окислов.

Зона II — зона упругих и малых пластических деформаций, которая после снятия нагрузки испытывает упругое восстановление (упругое последствие n_y). Здесь зерна металла слегка вытягиваются и поворачиваются, появляется текстура. Возникает сложнапряженное состояние. Напряжения иногда достигают величины предела текучести.

Зона III — исходная структура.

Обработанная поверхность имеет сложный геометрический характер, а поверхностный слой детали приобретает особые физические свойства, значительно отличающиеся от свойств исходного металла. Микронеровность поверхности образцов и деталей, полученных резанием, колеблется в широких пределах и определяется параметрами резания (толщиной и шириной

сняемого слоя, скоростью резания), обусловленными видом обработки (черновой, получистовой, чистовой, тонкой).

Увеличение припуска металла на обработку резанием повышает шероховатость поверхности. При снятии слоя металла толщиной 0,5 мм шероховатость поверхности составляет 60 мкм, при снятии слоя металла 2 мм размер микронеровности дости-

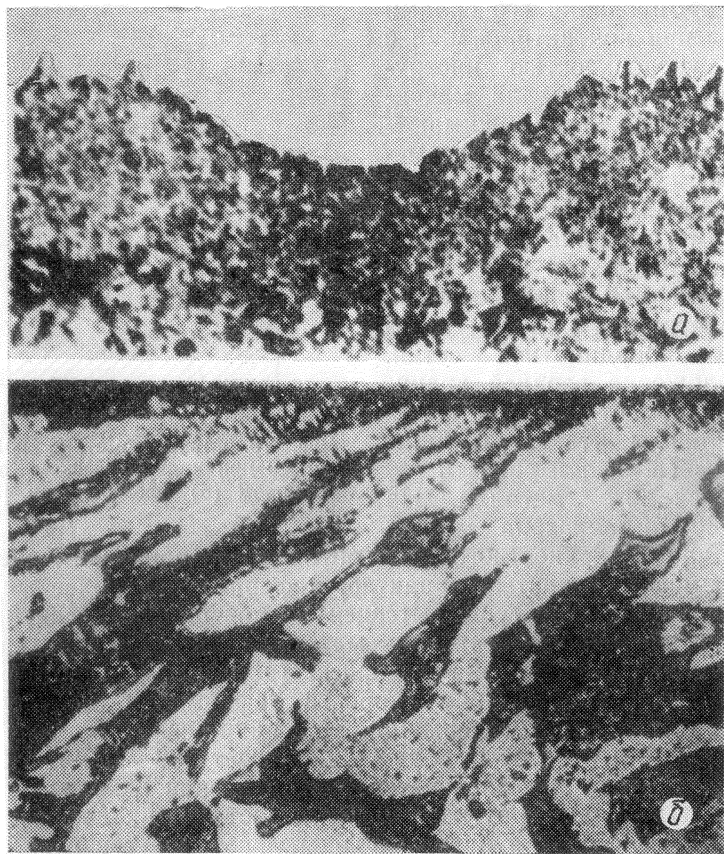


Рис. 80. Структура поверхностного слоя механически обработанных образцов.

гает 1200 мкм. Это подтверждается и опытными данными, полученными на заводе «Большевик», при обработке на зуборезном станке шестерни из стали 18ХГТ нарезной головкой. При увеличении припуска на механическую обработку от 0,3 до 1,5 мм высота микронеровностей повысилась от 12 до 20 мкм, что составляет около 8 мкм на 1 мм припуска.

Профиль резца оказывает большое влияние на микрогеометрию поверхности (рис. 81, 82). Применение резца с острой ре-

жущей кромкой обуславливает минимальную толщину измененного слоя, а обработка резцом с тупой режущей кромкой приводит к увеличению толщины измененного слоя. В начале резания шероховатость цилиндрических образцов (сталь 35Л) составляла 1—1,5 мкм, но по мере затупления режущей кромки резца шероховатость возрастала. Обычно при малых припусках

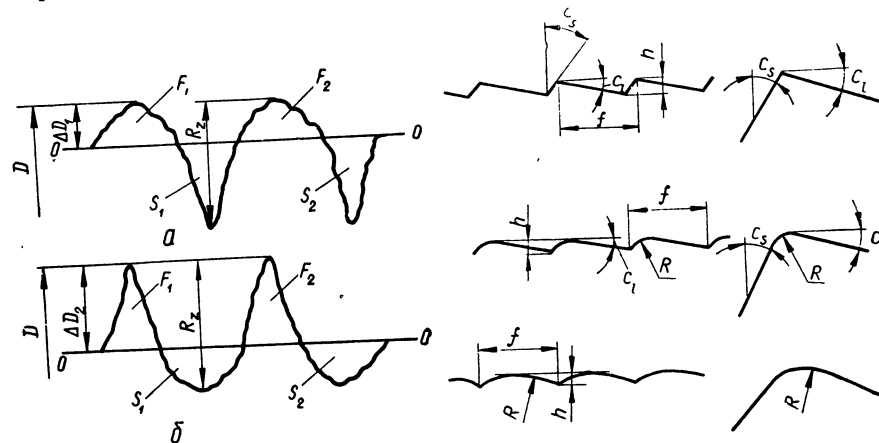


Рис. 81. Профили поверхности, полученные при работе резцом с острым углом и большой подачей (а) и резцом с большим радиусом закругления при вершине резца (б) [51].

Рис. 82. Микрогеометрия поверхности при точении резцами с различным профилем режущей кромки [51].

(менее 0,2 мм) шероховатость также возрастает. Это объясняется большей твердостью поверхностного слоя отливок и появлением вибрации резца.

При увеличении скорости резания повышается температура в зоне контакта металла с резцом (табл. 52). Под давлением резца верхние слои испытывают пластическое растяжение, а нижележащие — упругую деформацию растяжения. После прохождения резца упруго-растянутые слои стремятся сжаться, но этому препятствуют верхние слои, претерпевшие необратимую пластическую деформацию. В результате внутренние слои остаются частично сжатыми, а в верхнем слое возникают остаточные напряжения растяжения. При нагреве верхние слои стремятся удлинить, но этому оказывают сопротивление нижние, более холодные слои и в поверхностном слое появляются напряжения сжатия. При охлаждении во внутренних слоях возникают остаточные напряжения сжатия, а на поверхности — напряжения растяжения.

Для сталей, обладающих высокой твердостью, снижение усталостной прочности в результате действия растягивающих напряжений достигает 30%.

Таблица 52

Влияние скорости резания на температуру в контактной зоне металл—резец и температурный перепад в поверхностном слое детали

Материал детали	Скорость резания, м/с	Температура в зоне контакта металл—резец, °С	Температурный перепад в поверхностном слое металла, град
Сталь 25Л, 35Л, 45Л	0,05	100	70
	0,25	200	170
	1,0	400	800*
Кислотостойкие стали	0,05	120	90
	0,25	230	200
	1,0	500	450
Сплавы титана	0,05	220	800*
	0,25	480	200
	1,0	670	450
			630
			800*

* При шлифовании.

При шлифовании закаленных сталей происходит аустенитно-мартенситное превращение, а также быстро протекающий отпуск. Различие в удельных объемах структурных составляющих вызывает высокие структурные напряжения, часто приводящие к образованию трещин. При шлифовании стальных деталей и образцов растягивающие напряжения наблюдались на глубине 0,1—0,3 мм, величина их достигала на поверхности 25—40 кгс/мм². Трещины возникают, как правило, по зоне отпуска или же по границе между зонами отпуска и вторичной закалки.

Возникающие под влиянием механической обработки неравномерность структуры поверхностного слоя и шероховатость поверхности оказывают большое влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. Определено, что чем ниже шероховатость отделки, тем выше предел усталости. Существует следующая закономерность снижения предела усталости (кгс/мм²) при понижении класса шероховатости (сталь Ст.3):

Полировка	(√14)	1,00
»	(√10)	0,98
Хонингование	(√8—√9)	0,96
Шлифование тонкое	(√7—√8)	0,94
» грубое	(√6—√7)	0,92
Точение тонкое	(√5—√6)	0,86
» грубое	(√3—√4)	0,80

Испытания проводились на машине ГРМ-1. Число циклов нагружений 300 цик/мин. Образцы изготовлены в соответствии с ГОСТ 2860—45. Данные опытов показывают, что предел усталости чугунных образцов при грубой обработке поверхности составляет 50—84% прочности полированных образцов (рис. 83, табл. 53).

Изучение отливок, полученных по различной технологии (рис. 84—86), показывает, что литая поверхность по характеру микронеровностей значительно отличается от механически обработанной. У литой поверхности неровности неориентированы в пространстве, разнообразны по форме и размерам. Более всего это заметно на отливках, полученных в литейных формах из песочных формовочных смесей. Однако, исходя из закономерности распределения зерен естественных песков по частотной кривой Гаусса, можно предположить, что колебание высот микронеровности отливок также подчиняется определенным закономерностям. С целью установления этой зависимости была изучена шероховатость поверхности отливок из легированной стали, чугуна, сплавов алюминия и титана (табл. 54) и для сравнения — чистота поверхности образцов после обработки давлением (табл. 55).

Из предположения, что ожидаемая шероховатость поверхности отливок соответствует 3—5-му классам по ГОСТ 2789—59, для исследования принята одна базовая длина, равная 4 мм. Профилограммы снимались во взаимно перпендикулярных направлениях. Для каждой поверхности на профилограмме выделяли не менее 20 базовых длин по 4 мм и на каждой базовой длине производили 6—7 определений высоты выступов. За начало отсчета принимали впадину минимальной глубины. Суммарное количество замеров для каждой поверхности составляло 140.

Анализ экспериментальных замеров произведен методами математической статистики. По таблице случайных чисел [101]

Таблица 53

Зависимость предела выносливости чугунных отливок от шероховатости поверхности

Марка чугуна	Шероховатость, R_z , мкм	Предел усталости, кгс/мм ²	Марка чугуна	Шероховатость, R_z , мкм	Предел усталости, кгс/мм ²
СЧ 12-28	80,1	10,75	СЧ 15-32	12,3	13,0
	40,8	11,16		7,1	13,6
	21,6	11,54		4,2	14,2
	10,9	11,75	СЧ 21-40	86,5	14,78
	6,9	12,0		52,3	15,0
СЧ 15-32	3,8	12,8	30,2	15,5	
	82,3	11,92	13,4	16,1	
	44,7	12,25	8,5	16,85	
	29,1	12,53	5,7	17,6	

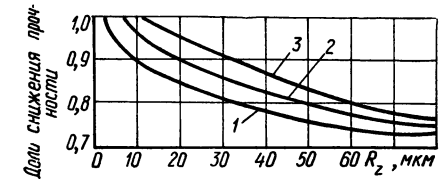


Рис. 83. Влияние микронеровности на предел усталости чугуна:
1 — СЧ 12-28; 2 — СЧ 15-32; 3 — СЧ 21-40.

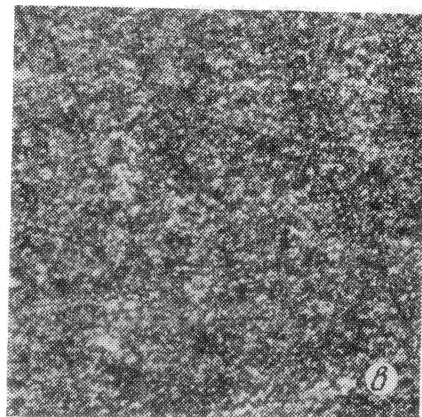
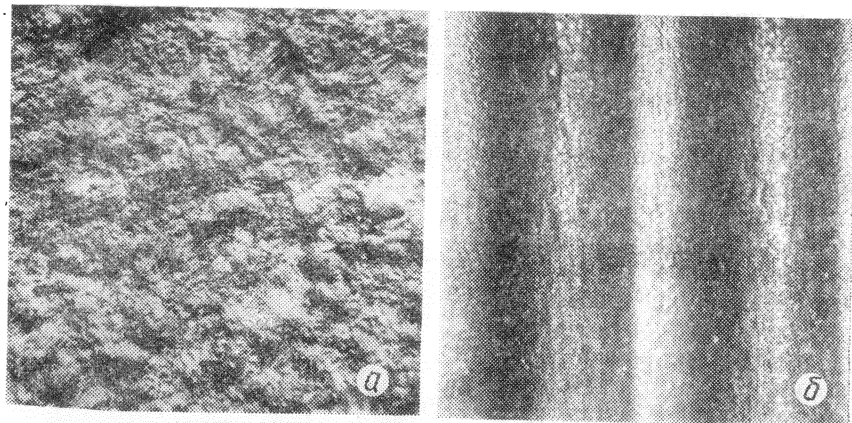


Рис. 84. Литые поверхности отливок:
a — отливка из чугуна, полученная в формах из песочно-глинистых смесей на центробежных машинах; гладкая ($\times 20$); *б* — то же с орнаментом ($\times 3$); *в* — отливка из алюминия, полученная в формах из сыпучих песков ($\times 10$).

сделана выборка значений высот микронеровностей, из которых составлены вариационные ряды (табл. 56) для семи поверхностей отливок, полученных в опытных формах. Логарифмы абсолютных значений высот микронеровностей представлены вариантами 1, 2, 3, 4 и т. д., поскольку логарифмы середины предыдущего интервала ряда отличаются от логарифма середины последующего интервала на постоянную величину (равную $\lg 2$). Обозначаем варианты через X , а частоту рядов высот неровностей в данном варианте — через n_i . Одними из основных параметров вариационного ряда являются среднее арифметическое взвешенное

$$(\bar{X}_0) = \sum \frac{n_i X_i}{n_2}$$

и среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{с.к} \pm \sqrt{\frac{\sum n_i (X_i - \bar{X}_0)^2}{n_2}},$$

где $n_2 = \sum n_i = 120$.

Вычисления статистик и критериев выполнены на электронной машине «Промінь-М» по следующей схеме.

Для каждой поверхности построена теоретическая кривая распределения частот, которые определялись по формуле

$$n_m = \frac{n_2}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{X^2}{2\sigma^2}},$$

где $X = X_i - X_0$.

Полигоны статистического и теоретического распределения высот микронеровностей на отливках можно сопоставить, пользуясь рис. 87.

Оценка расхождения кривых произведена по следующим статистикам:

мера асимметрии статистической кривой

$$A_{ас} = \frac{\sum n_i^3}{\sigma^3 n_2};$$

мера эксцесса

$$K_{эк} = \frac{\sum X^4 n_i}{\sigma^4 n_2} - 3;$$

средняя ошибка среднего арифметического

$$m_{ср} = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n_2}};$$

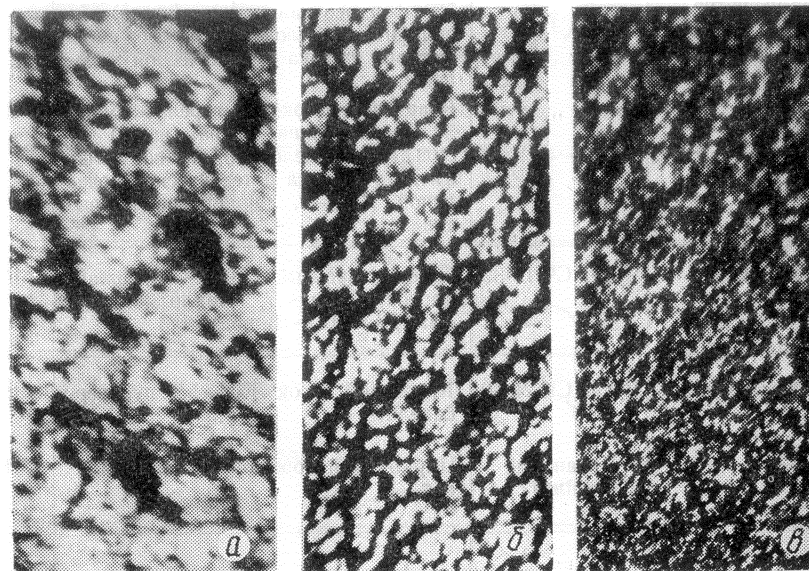


Рис. 85. Литые поверхности отливок гильз из чугуна, полученные в формах из песочно-глинистых смесей (*a*), сыпучих кварцевых песков (*б*) и порошков (*в*) ($\times 10$).

Микрогеометрия литых образцов

Вид формы	Металл	Содержание компонентов формы, %	Температура заливки, °С
Набивная	Чугун СЧ 21-40	Отработанная смесь—94, песок кварцевый 1К02А—3, глина огнеупорная—3, графитовое покрытие ГБ1	1370
	Чугун СЧ 15-32	Отработанная смесь—57, песок тощий Т04Б—22, глина огнеупорная—6, опилки древесные—13, барда сульфитная—2, графитовое покрытие ГБ1	1320
	Алюминий	Отработанная смесь—57, песок тощий Т04Б—22, глина огнеупорная—6, опилки древесные—13, барда сульфитная—2, графитовое покрытие ГБ1	710
Прессованная	Чугун СЧ 21-40	Отработанная горелая смесь—30, песок тощий Т04Б—54, глина огнеупорная—8, опилки древесные—6, барда сульфитная—2, цирконовое покрытие	1370
Спекаемая	То же	Кварцевый песок—30, горелая земля—58, формовочная глина (паста)—5, сульфитный шлоко — 5, раствор сульфитного шелока с технической мочевиной (1:1)—2	1370
	„	Кварцевый песок—30, горелая земля—58, формовочная глина (паста)—5, сульфитный шлоко—5, раствор сульфитного шелока с технической мочевиной (1:1)—2, цирконовое покрытие	1370
Наливная	Чугун СЧ 15-32	Песок кварцевый 1К02А—93, шлак феррохромовый—7, текло жидкое «В», ДС-РАС—16, вода—0,3	1320
Оболочковая	Чугун СЧ 21-40	Кварцевый песок К02—92, пульвербакелит—8	1370
	Титановый сплав	Цирконовый порошок—85, этилсиликат—15	1800
Стальная	Алюминий	Смазка	710

Шероховатость			Глубина дефектного слоя, мкм	Профилограмма	Увеличение
R_a , мкм	R_z , мкм	класс			
57	192	∇2	500—700		$\frac{1000}{40}$
65	225	∇2	500—700		$\frac{1000}{40}$
48	183	∇2	400—500		$\frac{1000}{40}$
31,5	110,5	∇3	210		$\frac{1000}{40}$
35—42	157	∇2—3	400—500		$\frac{1000}{40}$
21,5	86,5	∇3	300—450		$\frac{1000}{40}$
40,5	162,5	∇2—∇3	400—500		$\frac{1000}{40}$
12,3	47,5	∇4	100—120		$\frac{1000}{40}$
4,6	18,3	∇6	70		$\frac{1000}{40}$
2,2	8,5	∇7	20—25		$\frac{1000}{40}$

Вид формы	Металл	Содержание компонентов формы, %	Температура заливки, °С
Вакуумная	Чугун СЧ 21-40	Кварцевый песок К016, полиэтиленовая пленка	1370
	То же	Кварцевый песок К016, полиэтиленовая пленка, цирконовое покрытие	1370
	Алюминий	Циркон	710
	»	Кварцевый песок К016, покрытие	710

Примечание. Числитель—вертикальное увеличение, знаменатель—горизонтальное уве-

вариационный коэффициент

$$V_{в.к} = \pm \frac{100\sigma}{X_0};$$

показатель относительной точности исследований

$$P_{от} = \pm \frac{100m_{ср}}{X_0}.$$

Микрогеометрия поверхности образцов после обработки давлением

Вид обработки	Материал	Параметры обработки	Шерохо
			R _q , мкм
Листовая штамповка	Титановый сплав	Усилие прессы 100 тс	0,8
Горячая штамповка	Сталь	Усилие машины 50 тс, начальная температура 1280°С, конечная—810°С	7,8
Холодная штамповка	Алюминий	Масса падающей части молота 500 кг	2,3 2,8

Шероховатость			Глубина дефектного слоя, мкм	Профилограмма	Увеличение
R _a , мкм	R _z , мкм	класс			
25,5	91,5	▽3	210		1000/40
18,5	74,5	▽4	100		1000/40
3,5	15,4	▽6	20—25		1000/40
2,3—2,6	9,4—11,5	▽6—7	20—25		1000/40

личение.

Обычно принимается 5%-ный уровень значимости, дающий определенную практическую уверенность.

Ошибка среднего квадратического отклонения

$$\sigma_6 = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}};$$

Таблица 55

ватость		Глубина дефектного слоя, мкм	Профилограмма	Увеличение
R _z , мкм	класс			
6,3	▽7	75		1000/40
31	▽5	120		1000/40
7,8 10—8	▽7—▽6	84		1000/40

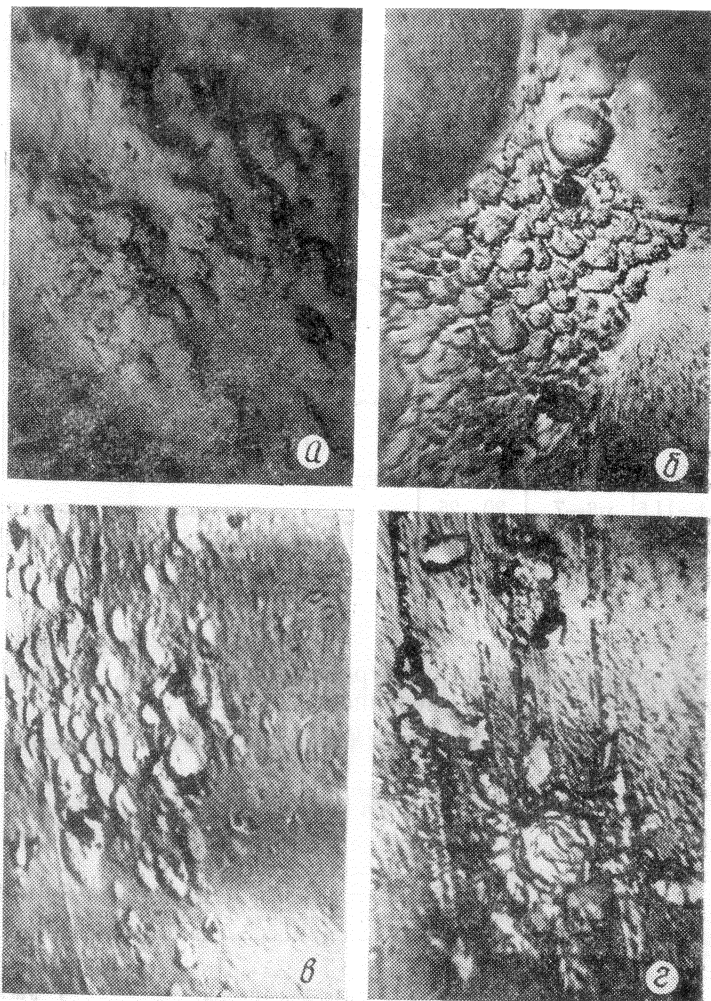


Рис. 86. Литая (а—б) и механическая обработанная (г) поверхности отливок из цинка (а— $\times 4000$; б, в— $\times 3500$; г— $\times 8000$).

ошибка вариационного коэффициента

$$\sigma_{V_{B.K}} = \frac{\pm V_{B.K} 0,5 + \left(\frac{V_{B.K}}{100}\right)^2}{\sqrt{n_2}};$$

ошибка меры асимметрии

$$\sigma_{A_{ac}} = \sqrt{\frac{b}{n_2}};$$

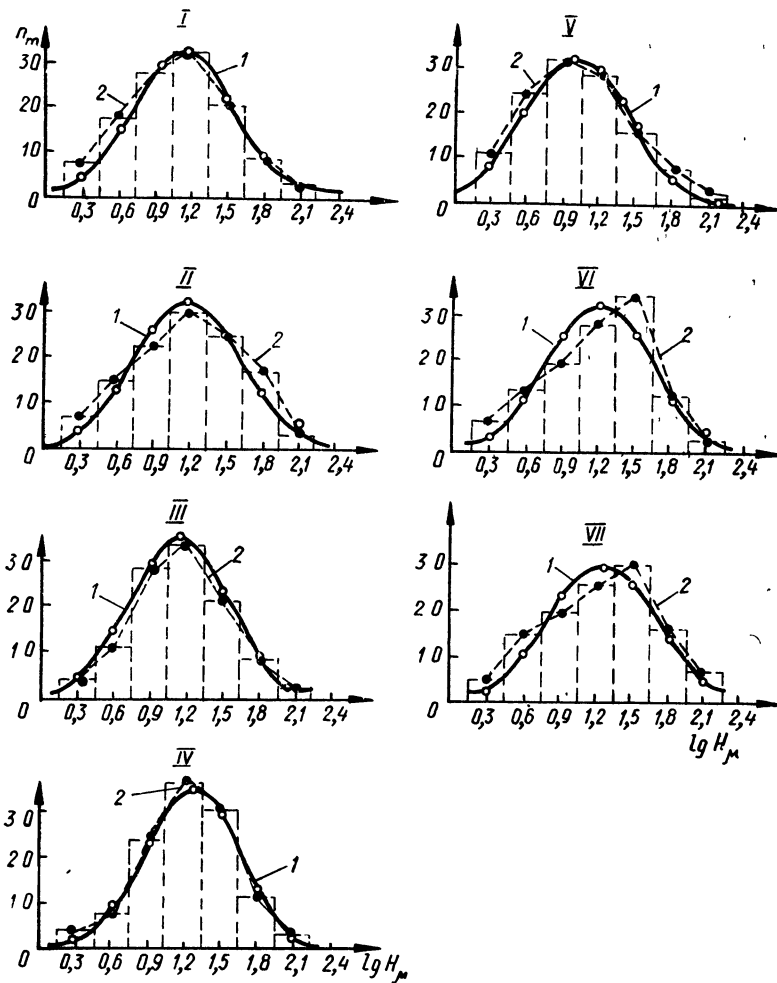


Рис. 87. Распределение высот неровностей на поверхности отливок: 1 — теоретическое; 2 — экспериментальное; I—VII — варианты.

ошибка меры эксцесса

$$\sigma_{K_{Эк}} = 2\sigma_{A_{ac}}.$$

Принимаем распределение высот неровностей на литой поверхности близким к нормальному, поскольку абсолютное значение $K_{Эк}$ и A_{ac} и их отношения к $\sigma_{K_{Эк}}$ и $\sigma_{A_{ac}}$ невелики. Из рис. 87 видно, что лишь небольшие участки гистограммы и полигона выходят за пределы теоретической кривой, что достаточно хорошо согласуется с нормальным распределением.

Сводная таблица вариационных рядов высот микронеровностей отливок

Интервалы рядов, мкм	Значения X_i	Частота рядов для поверхности отливок, полученных в формах						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
1,25—2,5	1	8	7	6	4	11	7	5
2,5—5,0	2	18	15	12	8	25	14	15
5,0—10,0	3	28	23	29	24	33	20	20
10,0—20,0	4	32	30	34	36	29	28	26
20,0—40,0	5	21	25	22	31	16	35	31
40,0—80,0	6	9	17	9	12	7	13	16
80,0—160,0	7	4	3	3	5	—	3	7

Примечания: I—форма из сыпучих обогащенных песков с цирковым покрытием (чугун); II—оболочковая форма (чугун); III—форма из сыпучих обогащенных песков с цирковым покрытием (алюминий); IV—форма из наливной самотвердеющей смеси (чугун); V—форма из порошка Al_2O_3 (алюминий); VI—песочно-глинистая форма с цирковым покрытием (чугун); VII—спекаемый стержень для центробежного литья (чугун).

Рассматривая статистики литой поверхности вместе с их основными ошибками, можно с определенной степенью уверенности установить границы, параметры шероховатости. С помощью показателей или критериев согласия Колмогорова и Пирсона определяем степень случайного расхождения (согласия) между наблюдаемым рядом и теоретическим распределением величины микронеровности. Это дает возможность точнее определять различия между статистическим и теоретическим вариационными рядами. Вероятность того, что наибольшие отклонения D' значений накопленных частностей ω_n от расчетных значений интегральной функции распределения $F_n(X)$ повысят заданное число $\lambda/\sqrt{n_2}$, может быть определена по формуле критерия Колмогорова

$$P_{от}(\lambda) = P_{от} \left\{ [F_n \max(X) - \omega_n] \geq \frac{\lambda}{\sqrt{n_2}} \right\} = 1 - \sum_{R=-\infty}^{\infty} (-1)^R e^{-2R^2 \lambda^2}.$$

Значения $P_{от}(\lambda)$ находились по таблицам, составленным Н. В. Смирновым [101]. Из данных, приведенных в этих таблицах, видно, что значения $P_{от}(\lambda)$ находятся выше условной границы согласия 0,01, следовательно, нормальное распределение можно считать согласованным с наблюдаемым рядом распределения высот неровностей на поверхности отливок.

Критерий Пирсона дает возможность судить о согласии между предполагаемыми и наблюдаемыми значениями. В данном исследовании он служит критерием согласия выравнивающего распределения с наблюдаемым рядом распределения высот не-

ровностей на поверхности отливок. Значение критерия Пирсона определяется по формуле

$$\chi = \sum \frac{(n_i - n_m)^2}{n_m},$$

где n_m — выравнивающие (теоретические) частоты.

Из таблиц [101] для данного числа степеней свободы ($k=4$) взяты значения вероятностей $P_{от}(X^2)$, соответствующие X , откуда $P_{от}(X^2) = 0,99$. Поскольку критерий Пирсона X^2 определялся при условии, что суммы теоретических и экспериментальных частот одинаковы, а среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения вычислялись из экспериментальных частот, то число степеней свободы принято равным 4 ($k=v-3$).

Таким образом, вероятность случайного совокупного расхождения между наблюдаемыми и выравнивающими частотами близка к единице и, следовательно, выравнивание с помощью нормального распределения можно считать хорошо согласующимся с полученными данными.

Исходя из результатов проведенных исследований можно сделать заключение, что изменение высот неровностей литой поверхности происходит по кривой нормального распределения и подчиняется закону больших чисел. Использование методов математической статистики позволяет обрабатывать данные экспериментальных замеров высоты микронеровности литой поверхности.

Поскольку имеется тенденция к улучшению качества отливок, применяемых в машиностроении, их шероховатость может быть достаточно точно охарактеризована по ГОСТ 2789—73. Однако она должна измеряться не по существующим методам, применяемым для механически обработанных поверхностей — со значением

$$R_a = \frac{1}{l} \int |Y_i| dx \text{ (или приближенно } R_a = \sum_{y=1}^{y=n} |Y_i| \text{ — на базовой}$$

длине l), а с помощью метода, дающего интегральное значение

$$R_a = \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} |Z_i| dx dy \text{ на базовой площади } (Z_i \text{ — расстояние от}$$

измеряемых точек до средней поверхности; l_x и l_y — протяженность поверхности в направлении осей $X-X$ и $Y-Y$, т. е. габариты базовой площади). Так как при снятии профилограммы поверхности отливок большая часть выступов и впадин попадает в плоскость профилограммы не по максимальным осевым размерам, полученные результаты измерения шероховатости являются заниженными. Поэтому определение значений R_a по измеренному профилю поверхности допустимо с определенной поправкой. Длина участка измерения при этом должна находиться в пределах базовой площади.

Установлено следующее соответствие шероховатости поверхностей, получаемых в разовых, полупостоянных и постоянных литейных формах, классам шероховатости поверхности по ГОСТ 2789—59:

Песочные сухие и подсушенные	▽1—▽4
Песочные сырые и из жидких самотвердеющих смесей	▽2—▽4
Металлические с покрытиями	▽3—▽5
Корковые из термореактивных смесей, оболочковые, изготовленные по выплавляемым моделям, формы из сухих сыпучих материалов	▽5—▽7
Металлические пресс-формы	▽6—▽8

Как следует из приведенных данных, отливки, полученные по выплавляемым моделям в металлических формах под давлением и в формах, изготовленных вакуумным способом, по шероховатости поверхности приближаются к штампованным заготовкам.

Микро-, макронеровности и шероховатость поверхности отливок во многих случаях являются точными отпечатками поверхности форм. Чем меньше пор, выступов и других неровностей на поверхности форм, тем их меньше на поверхности отливок (рис. 88, 89).

Большое влияние на шероховатость поверхности отливок оказывают природа материала покрытия, дисперсность наполнителя, наличие посторонних включений и способ нанесения покрытий на форму. Плотность укладки зерен наполнителя в поверхностном слое формы в большей мере зависит от класса шероховатости и свойств материала модели или стержневого ящика. Изучением структуры поверхности образцов, изготовленных из песков, порошков и металлической дробы с различной зернистостью, а также математическими расчетами установлено, что координационное число укладки зерен из поверхности равно 12, а в объеме — 6—8; средний диаметр пор соответственно составляет 0,15 и 0,4 диаметра зерен. Плотность структуры поверхностного слоя формы определяется степенью свободы перемещения зерен смеси под действием сил внешнего трения скольжения между моделью и поверхностным слоем формы.

Угол внутреннего трения смеси возрастает при увеличении крупности и угловатости зерен [103]. Поэтому при изготовлении формовочных смесей применение мелких неоднородных песков, имеющих округлую форму зерен, способствует получению плотного поверхностного слоя формы и, как следствие, снижению шероховатости поверхности отливки (табл. 57, рис. 90).

При обычной формовке на зернах формовочной смеси и покрытий имеются гидратносолевые пленки, увеличивающие силу сцепления мелких зерен за счет пленочных контактов. Поверхностное натяжение и обусловленное им слипание зерен

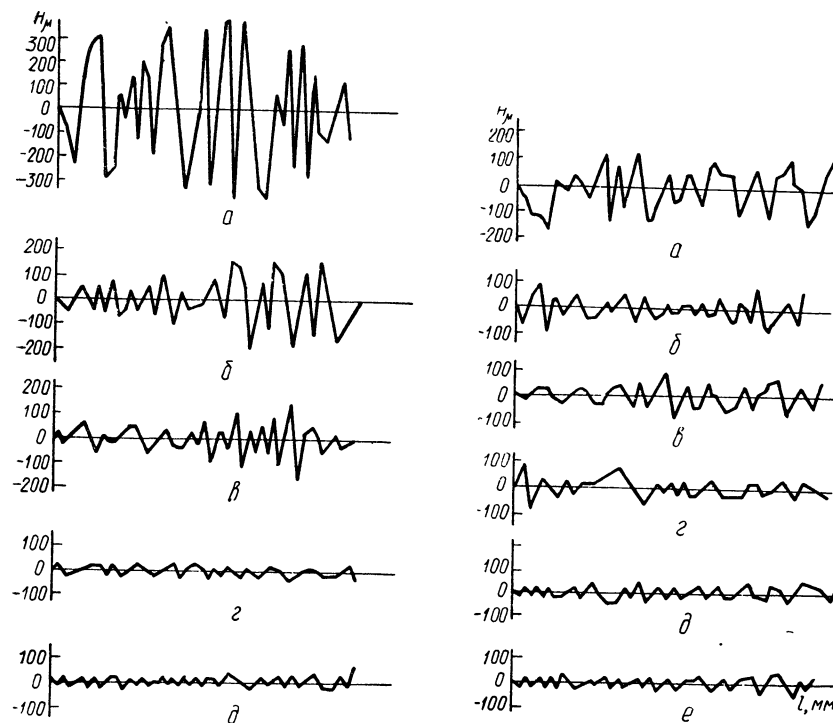


Рис. 88. Микронеровность поверхности чугунных отливок, полученных в различных формах:

а — из кварцевого песка фракции 1 мм; б — из кварцевого песка фракции 0,63 мм; в — из кварцевого песка фракции 0,315 мм; г — из цирконового концентрата; д — из самотканского цирконового концентрата.

Рис. 89. Микронеровность поверхности стальных отливок, полученных в различных формах:

а — из кварцевого песка фракции 1 мм; б — из кварцевого песка фракции 0,4 мм; в — из кварцевого песка фракции 0,315 мм; г — из кварцевого песка фракции 0,2 мм; д — из цирконового концентрата; е — из самотканского цирконового концентрата.

Таблица 57

Влияние зерновой структуры и природы наполнителей формовочных смесей и покрытий литейных форм на микронеровность поверхности отливок

Показатель	Кварцевый наполнитель зернистости, мм				Цирконовый песок зернистости 0,16 мм	Цирконовый порошок
	0,315	0,16	0,1	Смесь зерен; 80%—0,2 мм, 20%—0,05—0,02		
Высота микронеровностей, мкм	100—300 70—200	35—70 20—65	25—60 15—70	22—35 10—26	23—50 15—31	15—30 10—20
Высота неровностей, мкм	185 100	52 45	49 40	27 21	32 24	20 12

Примечание. Числитель—отливки из чугуна, знаменатель—отливки из стали 35Л.

чем больше удельная поверхность и чем меньше размер пор между зернами. Следовательно, только дисперсные тонкослойные покрытия могут обеспечить необходимую плотность поверхности формы и получение гладкой поверхности отливки.

Для определения влияния пористости и среднего диаметра зерна наполнителя на высоту микронеровностей поверхности зерна при постоянном ферростатическом давлении (0,1 атм) заливались в формы, изготовленные из песка различных фракций (0,05; 0,063; 0,1; 0,16; 0,2 мм). Принято, что числу зерен на поверхности формы соответствует число пор (впадин) на поверхности отливки.

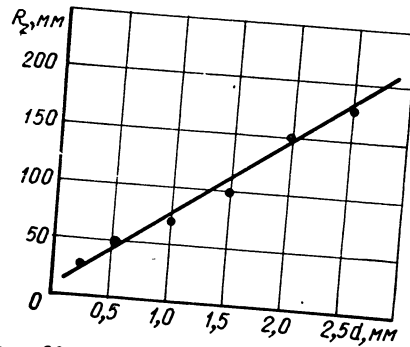


Рис. 90. Влияние размера металлической дроби на величину микронеровности поверхности отливки из стали 35Л.

Пористость формы определялась по плотности γ_0 вырезанных из форм образцов по формуле

$$P_{\phi} = \frac{\gamma_n - \gamma_0}{\gamma_n},$$

где γ_n — плотность песка.

Профиль поверхности полученных образцов изучался в бинокулярном микроскопе МИС-11 при увеличении в 36 раз. Число зерен опытных фракций в 1 см³ подсчитывалось по формуле

$$n_z = \frac{1000 - P_{\phi}}{0,524 d_{cp}^3},$$

где d_{cp} — средний диаметр зерна, мм.

Число пор (впадин) на поверхности соответствует значению $(\sqrt[3]{n_z})^2$. Полученные данные позволили разработать номограмму для определения шероховатости поверхности отливок из чугуна (рис. 91).

Новая методика прогнозирования шероховатости поверхности отливок позволяет оценивать качество литой поверхности по начальной характеристике материалов и технологии изготовления формы. На рис. 92 приведены литые поверхности образцов, полученных на подложке из фарфора. Литая поверхность имеет много микронеровностей чешуйчатого строения с волосовидными трещинами (рис. 92, а), которые при большем увеличении проявляют ячеистое строение (рис. 92, б). В некоторых местах рассматриваемой поверхности наблюдается стук разных структур, разграниченных пленами (рис. 92, в). Такое строение литой поверхности обусловлено захватом жидким металлом адсорби-

рованного воздуха, химическим взаимодействием и наличием микронеровностей на поверхности подложки. Кроме того, на фотографиях видны точечные дефекты, образование которых вызвано локальным давлением газообразных продуктов взаимодействия жидкого металла и подложки.

На рис. 93 представлены литые поверхности с трещиновидной (рис. 93, а) и полосчатой (рис. 93, б) несплошностями, формирование которых происходило на подложке из кварцевого стекла. Образование несплошностей объясняется наличием в подложке внутренних трещин или участков с повышенной концентрацией напряжений, возникших в результате теплового удара при контакте с жидким металлом. На рис. 94 показаны литые поверхности, полученные на чугунных подложках. На поверхности видны следы наждачной зачистки, включения зерен шлифовальной бумаги и трещиновидные несплошности в местах скопления неметаллических включений.

Литые поверхности, полученные на медной подложке с микронеровностью 1—1,5 мкм, приведены на рис. 95. Литая поверхность имеет строчечное строение, неметаллические включения и трещины обусловлены наличием усадки металла, следов шлифовки и остатков шлифпорошков.

Исследования показали, что поверхностный слой образцов оказывает определяющее влияние на прочностные свойства всего образца или отливки в целом (рис. 96). Это обусловлено тем, что неровности на поверхности образцов являются местами зарождения трещин усталостного разрушения. Особенно вредной является геометрическая анизотропия, возникающая в результате механической обработки. Аналогичное действие оказывают включения на поверхности и в поверхностном слое отливки, нарушающие целостность основного металла. Расположение включений на поверхности и в поверхностном слое отливки более опасно, чем сосредоточение их в центральной части.

Наличие на поверхности конгломерационного слоя (пригара), обладающего хрупким разрушением, вызывает образование напряжений и сосредоточение их в поверхностном слое отливки. Особенно вредное влияние оказывает пригар на динамическую

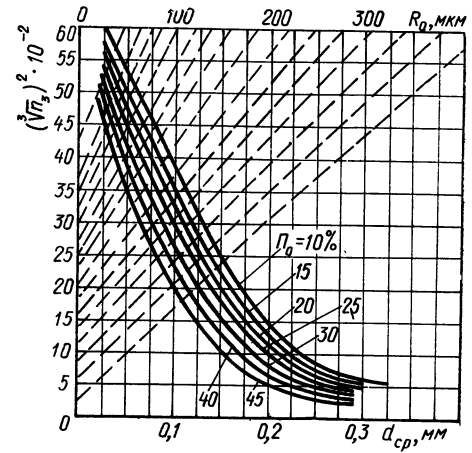


Рис. 91. Номограмма определения шероховатости поверхности отливок.

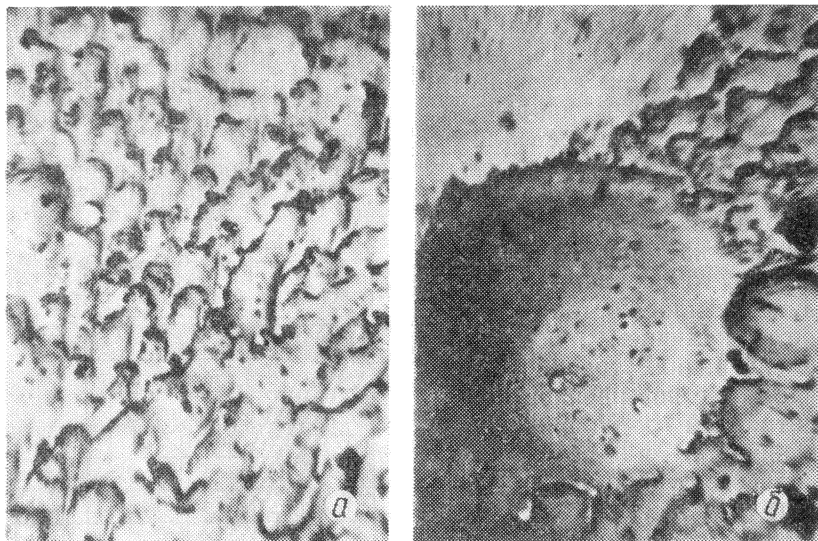


Рис. 92. Литая поверхность образцов, полученных на подложке из фарфора:

a — микрорельеф чешуйчатого строения с волосовидными трещинами и неметаллическими включениями ($\times 3500$); *б* — микрорельеф ячеистого строения с неметаллическими включениями ($\times 4000$); *в* — стык структур, образованный пленой ($\times 4000$).

прочность (независимо от вида деформации), так как места сопряжения его с металлом являются зародышами усталостных трещин.

Лабораторные исследования показали, что получение бездефектной поверхности и, следовательно, высокой прочности литых отливок или деталей технически возможно при использовании покрытий форм и применении новой технологии изготовления форм из сыпучих материалов (табл. 58, 59).

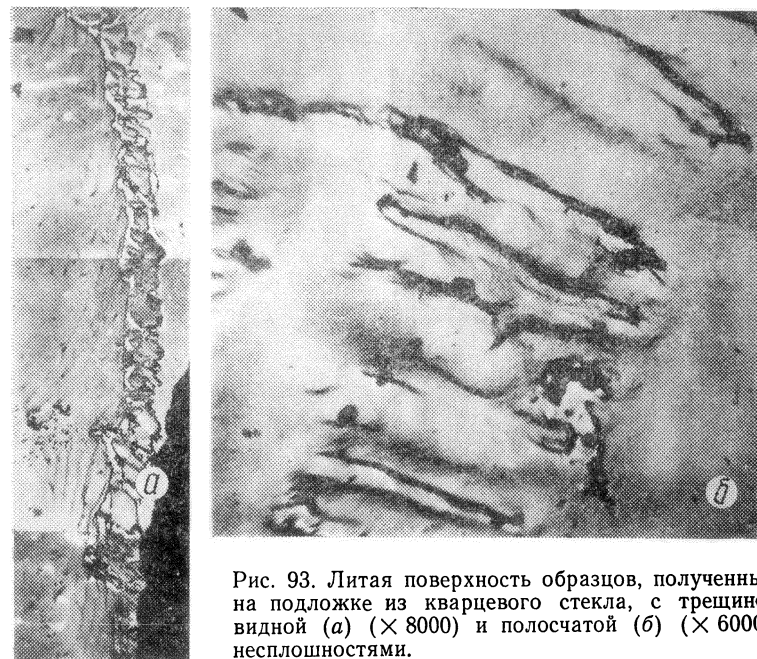


Рис. 93. Литая поверхность образцов, полученных на подложке из кварцевого стекла, с трещиновидной (*a*) ($\times 8000$) и полосчатой (*б*) ($\times 6000$) несплошностями.

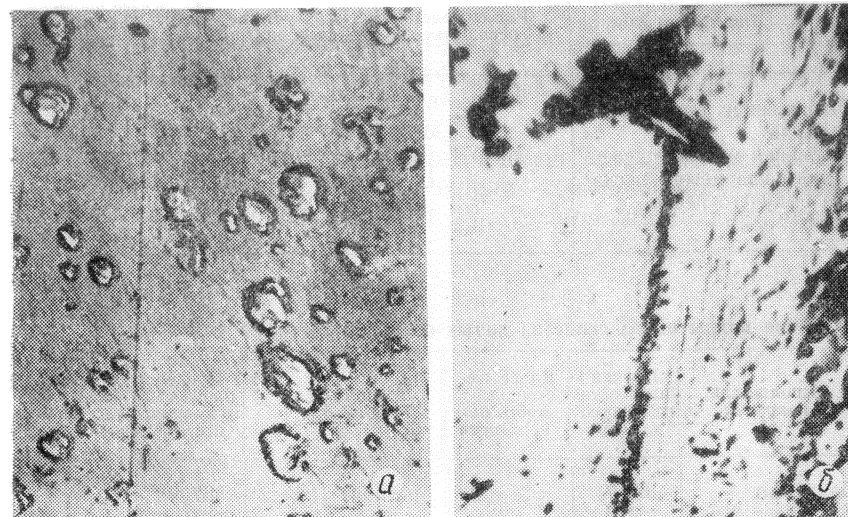


Рис. 94. Литая поверхность образцов, полученных на подложке из чугуна, зачищенной (*a*) ($\times 6000$) и шлифованной (*б*) наждачной бумагой ($\times 8000$).

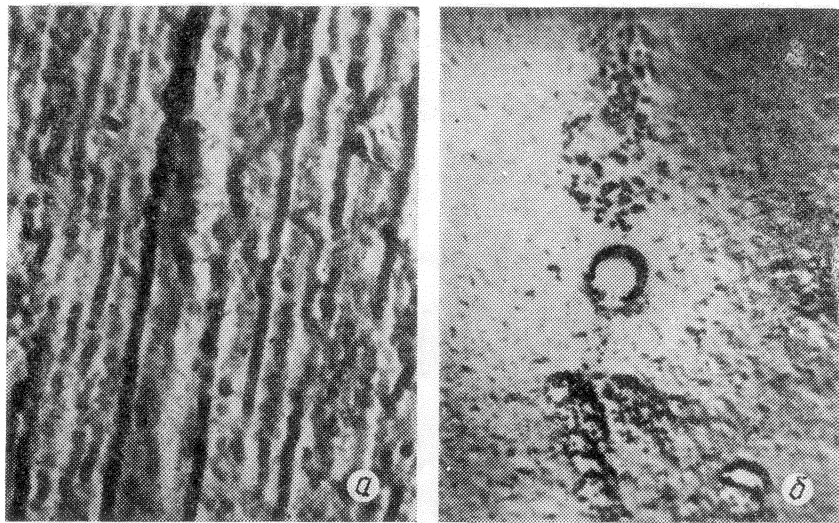


Рис. 95. Литая поверхность образцов, полученных на подложках из меди: *a* — микрорельеф строчечного строения, образованный на шлифованной подложке ($\times 12000$); *b* — микродефекты, образованные на полированной поверхности ($\times 8000$).

Таблица 58

Влияние зернистости песка и вида формы на шероховатость поверхности и прочностные свойства литых чугунных образцов

Вид формы	Размер зерен песка, мм	Прочность на разрыв, кгс/см ²	Класс шероховатости поверхности
Набивная из ореховского песка	0,22	1934	$\nabla 3$
Набивная из обогащенного кварцевого песка	0,1	2075	$\nabla 4$
Из сыпучего песка	0,2	2060	$\nabla 4-5$
	0,1	2157	$\nabla 5$

Таблица 59

Влияние покрытий на свойства литых образцов из стали 40Л

Наполнитель покрытия	Предел прочности на разрыв, кгс/мм ²	Класс шероховатости поверхности	Наполнитель покрытия	Предел прочности на разрыв, кгс/мм ²	Класс шероховатости поверхности
Бадделеит	60,7	$\nabla 2-\nabla 3$	Магnezит 10%, циркон 90%	57,9	$\nabla 3-\nabla 4$
Бадделеит 50%, циркон 50%	57,6	$\nabla 3$			
Бадделеит 10%, циркон 90%	57,3	$\nabla 4$	Циркон Маршалит	53,9 50,9	$\nabla 4-\nabla 5$ $\nabla 2$

Механически обработанные поверхности подвержены сильному влиянию окисления и адсорбции воды и газов, изменения температуры и других факторов. Достаточно полно свойства поверхности характеризуются следующими показателями: поверхностной проводимостью, скоростью поверхностной рекомбинации атомов, твердостью, плотностью, кислотностью. При получении литой поверхности структура формируется под влиянием формовочных покрытий, состав и свойства которых специально подбираются для обеспечения заданных свойств поверхности. Если в состав формовочных покрытий включить хром, титан, цирконий, медь, то на поверхности отливки образуется плотный пассивированный слой, а при добавке цинка — активированный слой металла.

Полученные экспериментальные данные показывают, что снижение шероховатости поверхности отливок, увеличение глубины мелкокристаллического поверхностного слоя путем геометрического развития поверхности отливки и термодиффузионного насыщения активными элементами позволяют значительно повысить плотность, прочность, коррозионную стойкость отливок и снизить их массу на 25—30%. Решение этой проблемы при массовом литье деталей позволит получить высокий технико-экономический эффект.

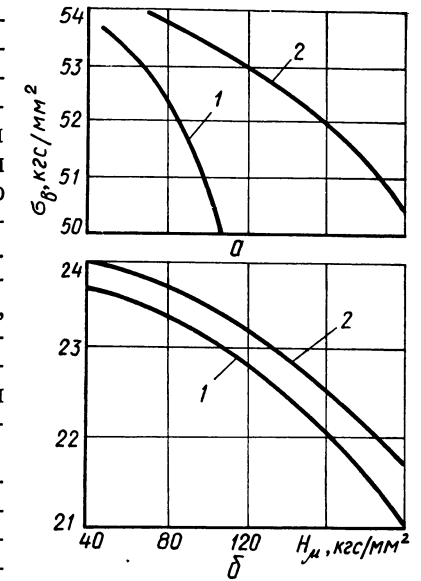


Рис. 96. Влияние микронеровности на прочность литых образцов при статических нагрузках: *a* — чугун; *b* — сталь; 1 — $d=5$ мм; 2 — $d=10$ мм.

1. Способы изготовления литейных форм

Большие достижения в области изыскания новых формовочных материалов позволили разработать новые и усовершенствовать существующие способы формообразования. Преимущественное развитие получают высокомеханизированные способы изготовления сырых форм прессованием, в том числе под высоким удельным давлением. Сухие песочно-глинистые формы заменяются быстросохнущими и химически твердеющими с применением противопопригарно-упрочняющих покрытий. Широкое распространение получают специальные способы формовки по выплавляемым, выжигаемым и растворяемым моделям, постоянные металлические формы с теплоизоляционными покрытиями. В последнее время под руководством А. Н. Цибрика разрабатывается прогрессивный способ изготовления форм из сыпучих песков и порошков, упрочняемых перепадом давления воздуха, создаваемого вакуумированием.

Указанные методы формообразования широко применяются при получении мелкого, среднего и крупного литья в массовом, серийном и индивидуальном производстве. Формы, полученные этими методами, характеризуются значительно более высокой прочностью и поверхностной плотностью по сравнению с традиционными песочно-глинистыми формами и обеспечивают получение отливок с усложненной геометрической конфигурацией поверхности (орнаментом). Выбор способа формовки для получения отливок с орнаментом зависит от положения орнаментированной поверхности отливки относительно плоскости разъема формы, сложности орнамента и конструкции модельной оснастки. Обычные способы формовки по разъемным моделям и стержневым ящикам применяются, когда орнамент не препятствует свободному извлечению модели из формы и стержня из стержневого ящика или когда его можно выполнить с помощью отъемных армированных гибких элементов модельной оснастки.

Отпечаток орнамента в цилиндрических стержнях получается методом накатки специальным армированным калибром: винтовой орнамент — выкручиванием армированного сердечни-

ка. Большие возможности получения орнаментированных отливок имеются при формообразовании по выплавляемым, выжигаемым и растворяемым моделям. При этом способе благодаря разрушению модели в неразъемной форме можно получить отпечаток орнамента любой конфигурации. Получение орнамента не вносит особых усложнений в существующие процессы формообразования и лишь в небольшой мере увеличивает расходы на изготовление модельной оснастки, полностью окупающиеся экономией в результате снижения массы и повышения эксплуатационных характеристик орнаментированных литых деталей.

Формовка по разъемным моделям и стержневым ящикам с орнаментом. Отпечаток орнамента в форме или стержне выполняется с помощью орнаментированных моделей или стержневых ящиков. Для получения качественного отпечатка орнамента в песочных формах и стержнях необходимо исключить прилипание формовочных смесей к поверхности моделей и стержневых ящиков путем применения разделительных материалов, обеспечивающих минимальную молекулярную связь между поверхностями двух соприкасающихся тел (фаз) [74, 87]. Термодинамической характеристикой адгезии является убыль свободной энергии на 1 см² контактной поверхности тел. Адгезия жидкости W_a к поверхности твердого тела определяется по уравнению [74, 97]

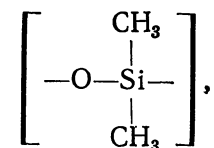
$$W_a = \sigma_{жв} (1 + \cos \theta),$$

где $\sigma_{жв}$ — поверхностное натяжение на границе жидкой фазы с воздухом.

Адгезия возрастает при увеличении $\sigma_{жв}$ и уменьшении различия в полярностях между фазами, а уменьшается при адсорбции добавок неполярного характера и возрастании молекулярного веса добавки [74, 87, 95, 103, 104].

В качестве разделительных материалов для покрытий моделей при изготовлении форм с фигурной поверхностью используют синтетический каучук, полиэтиленовую смолу, полиорганосилоксановый полимер, эпоксидную смолу и др.

Синтетический каучук СКТ относится к группе органосилоксановых эластомеров и представляет собой диметилсилоксановое кремнеорганическое соединение



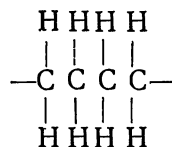
растворимое в бензоле и нефтяных растворителях. Каучук СКТ — один из самых эластичных полимеров, которые могут применяться в условиях длительного нагрева в интервале температур 90—300° С. Плотность его составляет 0,974 г/см³, коэф-

фициент теплоемкости 0,16—0,18 ккал/м·°С·ч, коэффициент преломления 1,4. Макромолекулы имеют линейное строение и содержат в основной цепи чередующиеся атомы кремния и кислорода. По внешнему виду представляет собой бесцветную эластичную массу. Отличается повышенной термостойкостью, обусловленной прочностью силоксановой связи Si—O.

Разделитель СКТ pulverизатором наносится тонким слоем на обезжиренную подогретую модель и подвергается сушке. Количество остатка при сжигании органического вещества характеризуется коксовым числом. Наименьшее коксовое число имеет каучук типа СКТ-Р, образующийся при длительной работе. Он легко удаляется, так как эластичная пленка состава СКТ обладает малой адгезией к металлу.

Полиэтиленовая смола является одним из новых типов синтетических полимеризационных смол, которые получают при полимеризации этиленовых углеводородов под большим давлением.

Линейные полимеры этилена имеют структуру

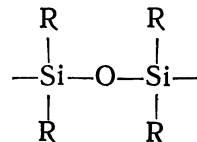


Смола термопластична, отличается химической инертностью, водопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами и плохой адгезией.

Разновидности полиэтиленовых смол отличаются степенью полимеризации и вязкости, которая при 190°С колеблется от 350 до 3500 пуаз. Температура размягчения полиэтиленовой смолы 100—115°С, плотность 0,92—0,94 г/см³, при 115°С переходит в вязкую жидкость, так как температура размягчения почти равна температуре плавления.

Полиэтиленовые смолы при 20°С нерастворимы, а при 60—70°С они хорошо растворяются в ароматических и хлорированных углеводородах. Пленка полиэтилена при нагревании медленно горит, а при температуре 300°С начинает разлагаться. Растворы этих смол плотностью 0,92—0,94 г/см³ хорошо наносятся на поверхность моделей с помощью pulverизатора и после непродолжительной сушки образуют разделительную пленку.

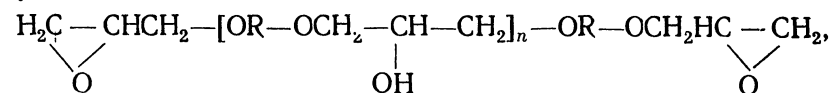
Полиорганосилоксановый полимер представляет собой высокомолекулярное элементоорганическое вещество со структурой



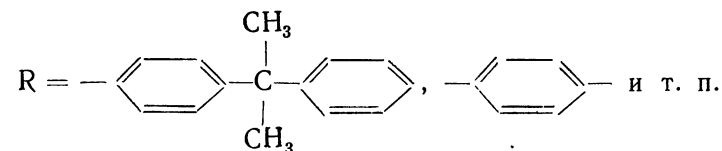
По форме и строению главные цепи молекул могут быть линейными, более или менее разветвленными, либо циклолинейными. Плотность полиорганосилоксанового полимера равна 1,1—1,3 г/см³.

Полиорганосилоксаны устойчивы к действию кислот, щелочей, и только концентрированные кислоты и щелочи расщепляют связь Si—O—Si. В качестве разделителя использовался полиорганосилоксан марки К-21, отличающийся повышенной термостойкостью вследствие высокой прочности связи Si—O. Эластичные свойства полимера сохраняются длительное время при температуре от —60°С до 225°С и кратковременно — при нагревании до 250—300°С.

Эпоксидная смола является продуктом взаимодействия эпихлоргидрина с многоатомными фенолами или спиртами в присутствии щелочей:



где



Она растворяется в спирте, кетонах, ароматических углеводородах, хлорированных углеводородах и эфирах.

Эпоксидная смола полимеризуется при температуре 120°С в течение 1,5—2 ч в присутствии 10—15% отвердителя — полиэтиленполиамин — с образованием твердого полимера, молекулы которого имеют длинную цепочную структуру. Полученный полимер не обладает адгезией к большинству материалов, а особенно к металлам и стеклу. Высококачественным разделителем является смесь полиорганосилоксанового силоксана с порошкообразными наполнителями, например тальком дисперсностью не более 20 мкм. Состав смеси следующий: тальк 20%, полиорганосилоксан 40—50%, органический растворитель 30—40%.

Изготовление форм по разъемным моделям и стержневым ящикам осуществляется различными способами, в том числе прессованием под высоким удельным давлением, пескометной и пескострельной набивкой, литьем жидких смесей, формовкой по горячей оснастке и др. Формовочные смеси для различных способов формовки отличаются природой и содержанием связующих материалов и специальных добавок. Составы смесей и характеристика материалов широко описаны в специальной литературе по литейному производству и не нуждаются в повторениях. Для формообразования по разъемным моделям с

орнаментом могут использоваться все песочные формовочные и стержневые смеси, применяемые в литейных цехах, у которых прочность на сжатие по сырому не ниже 0,4 кгс/см². Чтобы получить особо чистую поверхность отливок, рекомендуется применять облицовочные цирконовые смеси, составы которых при-

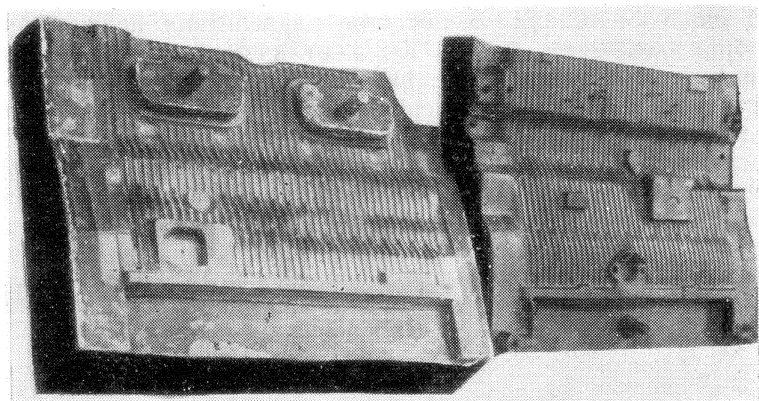


Рис. 97. Деревянная модель блока мотора с резным орнаментом.

ведены в табл. 60. Для моделей и стержневых ящиков с элементами орнамента используются дерево, алюминий, черные металлы, пластмассы, стекло и другие материалы. Нанесение орнамента на поверхность разъемных моделей и стержневых ящиков или их отъемных частей осуществляется механической обработкой, литьем, штамповкой или армированием поверхности готовыми элементами орнамента.

Таблица 60

Составы облицовочных формовочно-стержневых смесей

Компонент	Содержание, %	
	Смесь №1	Смесь №2
Цирконовый песок	90	90
Глина огнеупорная	5,5	—
Черкасский бентонит	—	5
Жидкое стекло (модуль 2,5—2,6; плотность 1,48—1,52 г/см ³)	3,5	—
Сульфитно-дрожжевая барда	—	1,0
Едкий натр (20%-ный раствор)	1,0	—
Вода (сверх 100%)	4—5	4—4,5

Примечание. Смесь № 1—быстросохнущая; упрочнение ее производится продувкой углекислотой. Смесь № 2—стержневая, сушка стержней производится при температуре 150—180° С

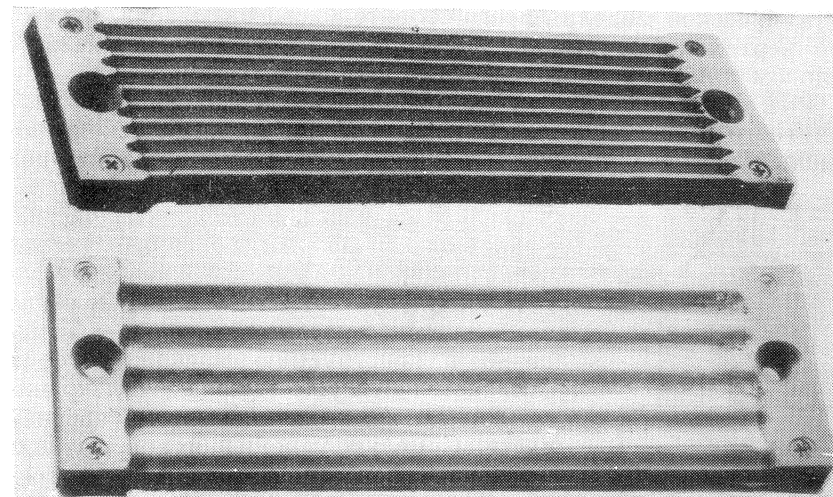


Рис. 98. Металлические (шлифованные) модели с орнаментом.

Разъемная деревянная модель блока двигателя СМД-14 (рис. 97) характеризуется наличием орнамента в виде гофра в пределах толщины стенки, предусмотренной чертежом. Орнамент расположен параллельно плоскости разъема модели и не препятствует свободной выемке из формы.

Примерами орнаментированных металлических моделей, полученных механической обработкой, могут служить модели, показанные на рис. 98. В одной модели орнамент, выполненный в пределах чертежных размеров стенки отливки, имеет призматическую форму, в другой — форму гофра. Если конфигурация орнамента препятствует выемке модели из формы, используются отъемные части. На рис. 99 приведен эскиз более сложной

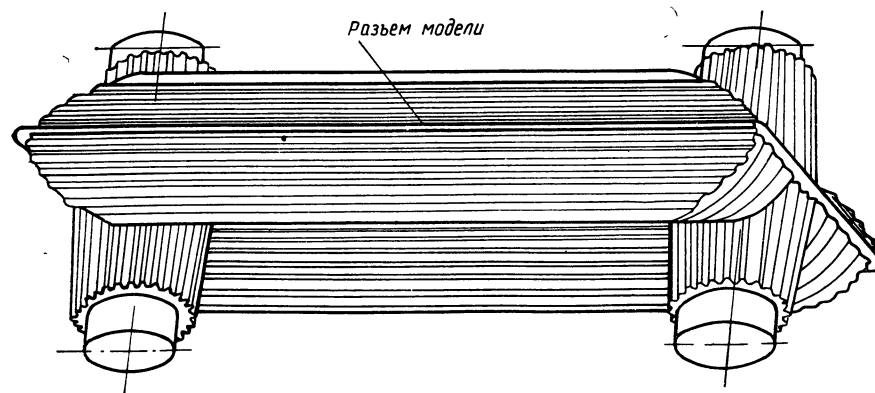


Рис. 99. Разъемная модель секции отопительного прибора.

металлической модели литого отопительного радиатора, в которой вертикальные стенки выступов орнамента выполнены с уклоном для свободного извлечения модели из формы.

Рис. 100 иллюстрирует комбинированную модель крупногабаритного тонкостенного корпуса реактора для химической промышленности с орнаментом в виде сетки. Орнамент выполнен

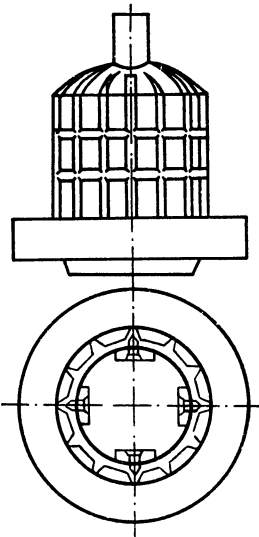


Рис. 100. Модель корпуса реактора РЧЭН-1250 с отъемными частями и стержневыми знаками.

в верхней части на поверхности модели, в средней ее части, на отъемных частях, удаляемых из формы после извлечения сердечника, и на межфланцевой части детали. Следует отметить, что нанесение орнамента не внесло значительных изменений в конструкцию модели, которая отличается от существующей только наличием отъемных элементов средней части. С целью упрощения конструкции модельной оснастки и расширения технологических приемов получения отпечатков орнамента в формах рекомендуется для армирования моделей и стержневых ящиков широко применять гибкие элементы с фасонной поверхностью (рис. 101). Эти элементы с заданным профилем орнамента могут изготавливаться из резины, пластмасс и других гибких материалов.

На рис. 102 показаны части модели оребренных изложниц, в которых орнамент выполнен гибкими элементами с косым и прямым профилями. Модель предназначена для изготовления форм

из жидких самотвердеющих смесей. Полость в форме образуется путем удаления остова модели через верхнюю открытую часть формы и вытягивания гибкого элемента к внутреннему «болвану» с последующим его извлечением. Номенклатура орнаментированных отливок, рассмотренная выше, включает мелкие, средние и тяжелые отливки серийного (корпус реактора) и массового (блоки двигателей, радиаторы, изложницы) производства. Технология изготовления разъемных форм для орнаментированных отливок не отличается от обычной и требует лишь некоторого изменения в конструкции модельной оснастки. Возможности производства отливок с орнаментом значительно увеличиваются при использовании специальных методов изготовления форм и стержней.

Накатка орнамента в цилиндрических стержнях. При получении отпечатка орнамента на внутренней поверхности цилиндрических стержней используется накатка на центробежных машинах с помощью специальных калибров (накатных роли-

ков). Примером такой технологии может служить технология изготовления стержней для массовых отливок гильз двигателей СМД-14 и СМД-60 на центробежных станках с помощью накатных роликов (рис. 103). Средняя часть ролика, являющаяся моделью поверхности охлаждения гильзы, выполнена в виде винтового гофра. С целью получения качественных стержней и

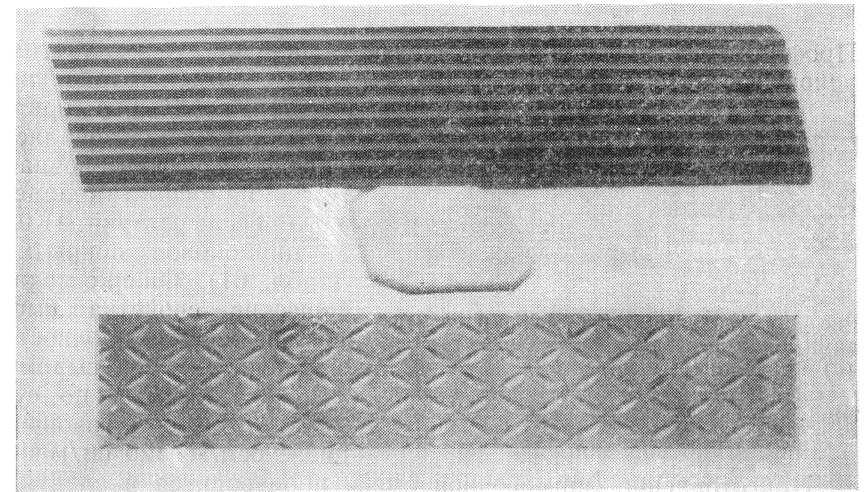


Рис. 101. Гибкие элементы с фасонной поверхностью для армирования моделей.

равномерного обжатия смеси гофры выполняются с закругленными кромками. Для исключения возможного «фрезерования» стенок стержня выступами рельефного орнамента накатного ролика принудительное вращение сообщается только стержню, при соприкосновении с которым под действием сил трения приводится во вращение ролик. Основные параметры ролика определяются расчетом.

Если наружный диаметр гильзы (цилиндра) с учетом усадки чугуна обозначить через $D_{ц}$, длину окружности по выступам $L_{ц}$ и шаг орнамента t , то

$$L_{ц} = \pi D_{ц},$$

количество выступов в гильзе $n_{ц} = \frac{L_{ц}}{t}$ или $t = \frac{L_{ц}}{n_{ц}}$. Принимаем

количество выступов n_p на формирующей поверхности накатного ролика кратным $n_{ц}$ с тем же шагом, тогда

$$n_p = \frac{L_{ц}}{2t}.$$

Длина окружности накатного ролика по выступам

$$L_p = n_p t = \frac{L_{ц}}{2}.$$

Диаметр накатного ролика по выступам определяем по формуле

$$D_p = \frac{L_p}{\pi} = \frac{L_{ц}}{2\pi} = \frac{D_{ц}}{2}.$$

Профиль выступов и впадин орнамента определяется с учетом условий работы и толщины стенок деталей. Для изготовления

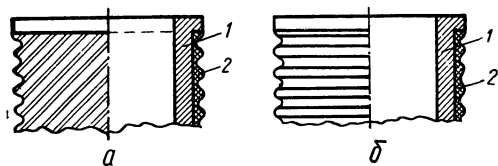


Рис. 102. Часть модели с гибкими элементами для орнаментированных изложниц с косым (а) и прямым (б) орнаментами:

1 — остов модели; 2 — гибкий элемент с орнаментом.

стержней гильз с орнаментом использовалась заводская формовочная смесь на основе кварцевого песка марки 1К02 и цирконовое покрытие (табл. 61). Физико-механические свойства смеси следующие: прочность на сжатие по сырому 0,35—0,4 кгс/мм², по сухому—7 кгс/см²; газопроницаемость — 120 см/мин.

Приготовление формовочной смеси производится в следующем порядке. Перед употреблением кварцевый песок просеивается через сито с ячейкой 2×2 мм; отработанная смесь очищается от металлических примесей путем магнитной сепарации и просеивания через сито. Связующие — сульфитный шлоко плотностью 1,22—1,29 г/см³ и карбамид в пропорции 1 : 1 — смешиваются в мешалке до получения однородной жидкости. Смесь приготавливается в бегунах, ее готовность контролируется по показателям прочности и газопроницаемости. Перед употреблением смесь разрыхляется с помощью аэратора.

Количество смеси строго дозируется мерной емкостью. Необходимая доза смеси определяется опытным путем из расчета получения стержней с отклонениями по размеру не более ±0,5 мм. Для исключения вибрации накатного ролика смесь подается в изложницу равномерными порциями по всей поверхности. Цикл раскатки стержня гильзы при усилии, развиваемом на штоке цилиндра, равном 2,5—3 тс, и давлении воздуха в сети 4,5 кгс/см² составляет 7—9 с. При таких усилиях обеспечивается прочность стержней, допускающая их транспортировку и кантовку при нанесении покрытия. Цирконовое покрытие наносится на внутреннюю поверхность сырого стержня пульверизатором или путем налива суспензии внутрь стержня после его накатки на центробежной машине при 1,5—2 оборотах стола в противоположных направлениях. Избыток суспензии выливается при выемке стержня из изложницы. Полученные стержни

высушиваются при температуре 200—220° С. Стержень после установки его под заливку на центробежную машину показан на рис. 104.

Изготовление стержней с отпечатками орнамента пескоструйным способом. Этим способом можно получать сложные стержни при высокой производительности. Недостатком способа является

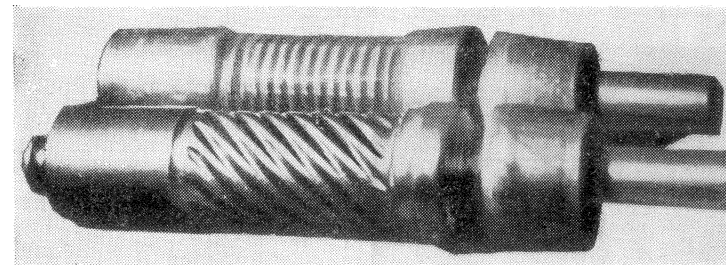


Рис. 103. Накатные ролики для нанесения отпечатка орнамента на стержни гильз с косым и прямым орнаментами.

низкая исходная прочность стержней, обусловленная применением высокотекучих и малопрочных в сыром состоянии стержневых смесей, упрочняющихся только при тепловой сушке. С целью повышения сырой прочности стержней авторы предложили вместе с воздухом и песком вдвухать растворы быстрополимеризующихся добавок. Это позволяет при сравнительно непродолжительной выдержке стержней в стержневом ящике повысить их сырую прочность более чем в пять раз и исключить применение драйеров при тепловой сушке. На рис. 105 показан стержневой ящик для изготовления стержней гильз СМД-60

Таблица 61

Состав формовочной смеси и цирконового покрытия для стержней гильз с орнаментом

Компонент	Содержание, %	
	Формовочная смесь	Покрытие
Кварцевый песок (1К02)	24	—
Цирконовый порошок	—	97
Отработанная смесь	68,4	—
Формовочная глина	4,0	—
Карбамид (30%-ный раствор)	1,1	—
Сульфитный шлоко	2,5	—
Альгинат натрия	—	0,3
Инден-кумароночная смола	—	2,7
Вода (сверх 100%)	4—5	До плотности по ареометру 1,85—1,95

пескодудным способом. Состав смеси (%): песок кварцевый — 100, сверх 100 — сульфитно-спиртовая барда (плотность 1,24—1,25 г/см³) — 35, крепитель УСК-1 (плотность 0,87—0,89 г/см³) — 2,5, солярка — 0,3. Корпус 1 стержневого ящика с сердечником, имеющим винтовой орнамент 2, подсоединяется к плите 3 пескодудной камеры таким образом, что отверстия для вдувания смеси направлены в полость ящика. После вдувания смеси в

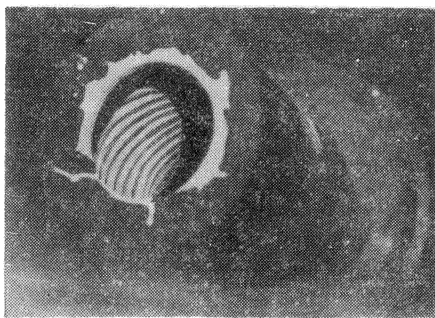


Рис. 104. Стержень гильзы СМД-14 с орнаментом, установленный на центробежной машине.

полость и выдержки стержня в ящике в течение 1,5 мин орнаментированный сердечник 2 удаляется с помощью приспособления 4 и на внутренней поверхности стержня остается отпечаток орнамента. Далее ящик разбирается и стержень передается в сушильную печь и затем под заливку гильзы на центробежной машине. В аналогичной последовательности изготавливаются стержни с отпечатком орнамента для получения порш-

ней двигателей СМД-14 и СМД-60 способом вакуумной формовки. Конструкция стержневого ящика показана на рис. 106.

Получение форм с отпечатками орнамента из сыпучих песков и порошков, упрочняемых перепадом давления воздуха. Формирование литой поверхности деталей (отливок) в формах из сыпучих песков и порошков существенно отличается от процессов, протекающих в формах, изготовленных из формовочных смесей с органическими и неорганическими связующими [36]. Известно, что почти все металлы в жидком состоянии (сталь, чугун, титан и др.) агрессивны и характеризуются повышенной химической активностью. По этой причине на границе контакта жидкого металла с формой очень легко образуются продукты взаимодействия — конгломерат из окислов и силикатов металлов. Для образования таких соединений необходимо поступление в зону контакта кроме молекул кислорода O₂ еще и активных ионов ОН, так как только в присутствии ОН происходят диссоциация окислов, входящих в состав наполнителей смеси, и образование продуктов взаимодействия. Главными поставщиками O₂ и ОН в зону контакта являются легкоплавкие окислы, гидраты и другие соединения, содержащиеся в органических и неорганических связующих. Поэтому для получения высококачественных отливок с низкой шероховатостью поверхности литейные формы подвергают сушке и высокотемпературному обжигу. Применение тепловой обработки форм повышает трудоемкость изготовления и себестоимость отливок. Новый способ

формообразования из сыпучих песков и порошков исключает необходимость применения органических и неорганических связующих и водных растворов. В качестве наполнителей форм и стержней используются сухие огнеупорные пески, высокая температура плавления и термохимическая стойкость которых предупреждает образование конгломерата окислов и силикатов. Упрочнение песка осуществляется в результате перепада давления воздуха между атмосферой и полостью опоки, передающегося на песок через специальную герметизирующую прослойку или плотное мелкодисперсное покрытие. Экспериментально установлено, что на прочность

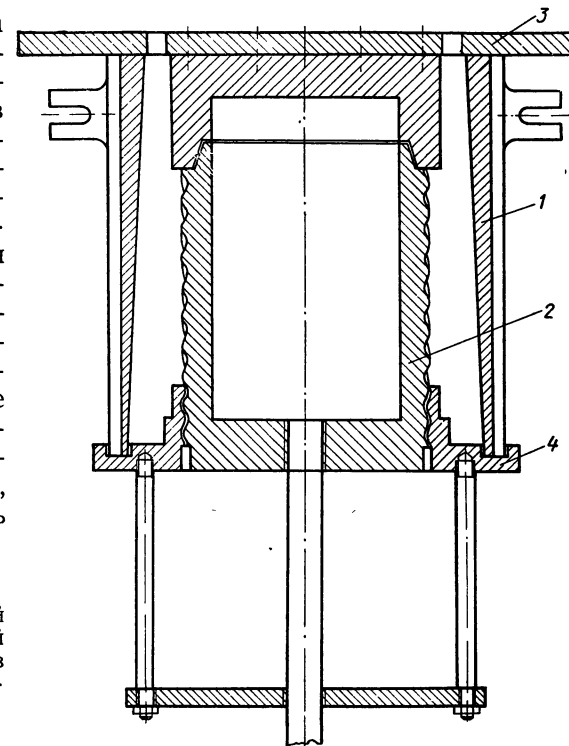


Рис. 105. Стержневой ящик для пескодудной набивки стержней гильз двигателя СМД-60 с отпечатком орнамента.

форм из сыпучих песков большое влияние оказывают электростатические силы межчастичного взаимодействия F , проявляющиеся в условиях разрежения воздуха (рис. 107):

$$F = \frac{H^2}{D_3 a_m},$$

где H — коэффициент, характеризующий величину некомпенсированных связей поверхности песка; D_3 — диэлектрическая постоянная; a_m — межчастичное расстояние.

Для повышения прочности форм из сыпучих песков, создания плотной укладки зерен и упорядоченной структуры авторы предложили использовать смесь песков с различными кислотно-основными свойствами. Повышение связи между частичками сыпучей смеси достигается при увеличении полярности компонентов. Наличие на поверхности песков водородных и гидро-

кислых ионов, а также адсорбционных пленок влияет на характер химических связей и, таким образом, на кислотно-основные свойства, которые характеризуются величиной рН. Поэтому естественные пески имеют нестабильные кислотно-основные свойства. Для регулирования плотности и структуры формочной смеси необходимо использовать пески со стабильными свойствами, т. е. отмытые от примесей.

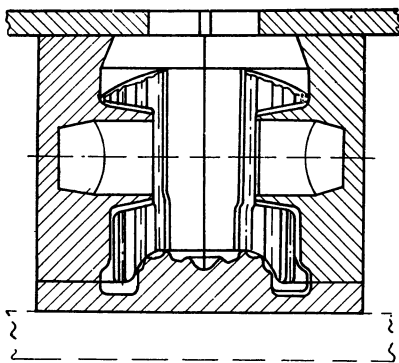


Рис. 106. Стержневой ящик для пескочудовой набивки стержней орнаментированного по внутренней поверхности поршня двигателя СМД-60.

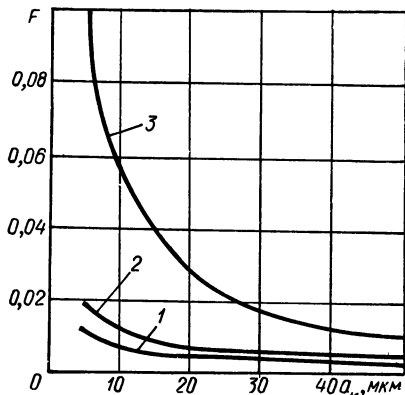


Рис. 107. Зависимость сил межчастичного притяжения в различных средах от расстояния между частицами:

1 — в воде ($D_0=80$); 2 — в воздушной среде ($D_0=6$); 3 — в вакууме ($D_0=1$).

В качестве одного из компонентов для приготовления сыпучих смесей рекомендуется использовать обогащенный кварцевый песок, выпускаемый Верхнеднепровским горно-металлургическим комбинатом. Указанный песок характеризуется стабильной кислотностью, которая колеблется в пределах 6,0—6,2 рН, в то время как кислотно-основные свойства естественного карьерного кварцевого песка характеризуются колебаниями в пределах 5,4—8,2 рН. Важным преимуществом этих песков является отсутствие крупных частиц и более низкое содержание мелкой фракции, чем у карьерных. Отсутствие на поверхности зерен обогащенного песка адсорбционных пленок способствует увеличению газопроницаемости смесей.

В качестве других компонентов сыпучих смесей рекомендуется использовать циркон, бадделит, корунд, магнезит и другие огнеупорные материалы с высокой плотностью. В табл. 62 приведены значения рН сыпучих смесей, состоящих из разных сочетаний двух песков с различной химической и минералогической природой.

Анализ качества поверхности отливок, полученных в формах

Кислотно-основные свойства сыпучих песков

Состав смеси	Соотношение ингредиентов, об. %	рН смеси	Примечание		
Обогащенный кварцевый песок—циркон	90—10	6,3	Рекомендуются для сыпучих смесей		
	80—20	6,4			
	70—80	6,6			
	60—40	6,8			
	50—50	7,0			
	40—60	7,1			
	30—70	7,2			
	20—80	7,4			
	10—90	7,6			
	Обогащенный кварцевый песок—бадделит	90—10		6,2	Рекомендуются для сыпучих смесей
80—20		6,3			
60—40		6,8			
70—80		6,5			
50—50		7,0			
40—60		7,1			
30—70		7,2			
20—80		7,4			
10—90		7,6			
Обогащенный кварцевый песок—магнезит		90—10	6,5	Рекомендуются для сыпучих смесей	
	80—20	7,0			
	60—40	7,7			
	Обогащенный кварцевый песок—магнезит	70—30	7,8		Рекомендуются для сыпучих смесей
		50—50	8,3		
		40—60	9,0		
		30—70	9,2		
		20—80	9,6		
		10—90	10,1		
		Циркон—бадделит	При любых соотношениях		
Циркон—корунд		90—10	8,0	Рекомендуются для сыпучих смесей	
		80—20	8,2		
		70—30	8,4		
	60—40	8,7			
	50—50	8,9			
	40—60	9,2			
	30—70	9,4			
	20—80	9,7			
	10—90	10,0			
	Циркон—магнезит	90—10	8,0		Рекомендуются для сыпучих смесей
80—20		8,3			
70—30		8,6			
60—40		8,8			
50—50		9,0			
40—60		9,4			
30—70		9,7			
20—80		10,0			
10—90		10,2			

Состав смеси	Соотношение ингредиентов, об. %	pH смеси	Примечание
Бадделит—корунд	90—10	8,0	Рекомендуются для сыпучих смесей
	80—20	8,2	
	70—30	8,4	
	60—40	8,7	
	50—50	8,9	
	40—60	9,2	
	30—70	9,4	
	20—80	9,7	
	10—90	9,9	
	Бадделит—магнезит	90—10	
80—20		8,2	
70—30		8,5	
60—40		8,6	
50—50		9,0	
40—60		9,4	
30—70		9,7	
20—80		10,0	
10—90		10,2	
Корунд—магнезит		При любых соотношениях	10,15—10,52

из сыпучих смесей с различным соотношением огнеупорных материалов, отличающихся по кислотно-основным свойствам, показывает, что если pH смеси меньше 7,0, уменьшаются плотность и твердость форм, увеличивается пористость структуры, отливки имеют неудовлетворительную поверхность (например, композиции кварцевый песок — циркон 60—40; кварцевый песок — корунд 90—10 и т. д.). Если pH смеси больше 9,0, также увеличивается пористость структуры, на поверхности отливок появляются дефекты (например, композиции кварцевый песок — корунд 20—80, бадделит — магнезит 40—60 и др.).

Подбор сыпучих смесей рекомендуется осуществлять таким образом, чтобы разница по кислотно-основным свойствам составляла 1,6—4,5 единиц при pH смеси 7,0—9,0. Если компоненты отличаются по кислотно-основным свойствам менее чем на 1,6 единиц, то связь между зернами оказывается недостаточной для увеличения твердости и плотности форм (см. табл. 62, композиции циркон — бадделит, корунд — магнезит). Если разница pH компонентов превышает 4,5 единиц, то увеличивается пористость структуры.

Упрочнение сыпучих смесей происходит под действием разрежения, которое способствует отсосу газов и проникновению

жидкого металла в поверхностный слой формы, поэтому газопроницаемость и пористость форм из сыпучих смесей должны быть ниже, чем при обычных способах формовки. Для этого предлагается применять пески зернистостью 0,05—0,315 мм, причем остаток зерен на ситах 027—0063 должен быть не менее 90%.

Применение для сыпучих смесей песков с различной кислотностью способствует повышению твердости, плотности и термостойкости форм, улучшению качества отливок и увеличению выхода годного. Укладка зерен песка под действием разрежения получается более плотной, чем при механическом уплотнении. При этом пылевидные частицы слипаются (рис. 108).

Формообразование из сыпучих песков значительно упрощает получение отливок с направленным орнаментом.

Применение эластичного покрытия между песком и моделью исключает необходимость в специальных разделителях и предохраняет отпечатки орнамента от искажения при извлече-

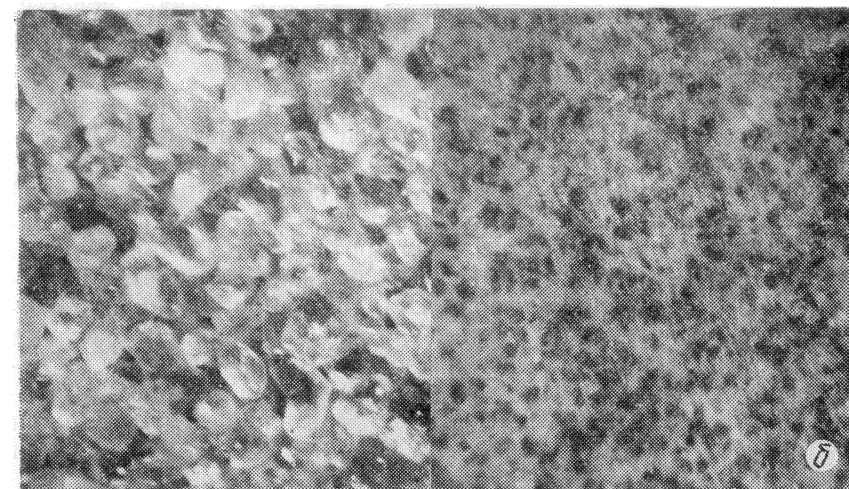
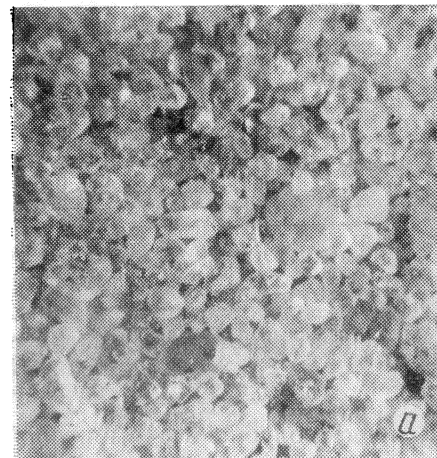


Рис. 108. Укладка зерен песка и порошка: а — при механическом уплотнении смеси; б — в условиях разрежения ($p=0,4$ атм) ($\times 30$).

нии модели из формы. Авторами разработана модельно-опочная оснастка для производства гильз двигателя СМД-14 в формах из сыпучих песков и получена крупная партия отливок гильз с орнаментом по этому способу. Схема модельно-опочной оснастки в разрезе с заполненной песком полуформой приведена на рис. 109. Оснастка включает модельную плиту 1, вакуумируемую полость 2 которой сообщается через шланг с вакуумным резервуаром, а через отверстия 3 — с полостью модели 4. В местах впадин орнамента и переходов модель снабжена отвер-

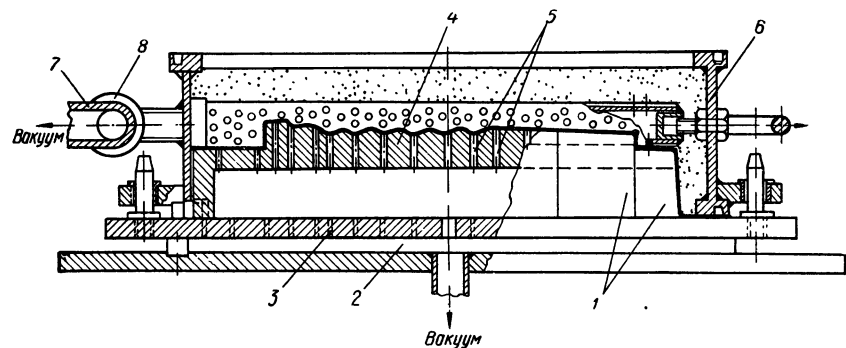


Рис. 109. Схема модельно-опочной оснастки в разрезе с заполненной песком полуформой для гильз двигателя СМД-14.

ствиями 5 диаметром 1,2—1,5 мм; в две полуопки 6 вмонтированы отсасывающие трубки 7, соединяющие ее через коллектор 8 с вакуумным резервуаром (на чертеже не показан). Модельно-опочная оснастка для гильзы СМД-14 в натуре и форма показаны на рис. 110, 111.

Последовательность операций изготовления форм по этому способу следующая. На нижний торец опоки натягивается полиэтиленовая пленка и с помощью электронагревателя размягчается до пластического состояния. Затем опока с размягченной пленкой опускается на подмодельную плиту и пленка под действием разрежения воздуха плотно притягивается к поверхности модели. Опока заполняется песком, который уплотняется встряхиванием. Контрлад полуформы накрывается пленкой, полуформа соединяется с вакуумным резервуаром и под действием разрежения песок упрочняется, модель отключается от источника разрежения, пленка отделяется от модели, и модель извлекается из полуформы. Аналогично изготавливается и верхняя полуформа, в которой кроме модели размещается литниковая система.

Изготовление стержня проводится следующим образом. В нижнюю половину стержневого ящика укладываются полиэтиленовая пленка и отсасывающая трубка, соединенная с поддо-

ном и верхним фланцем. Последние обворачиваются выпущенными концами пленки и перекрываются верхней половинкой стержневого ящика. В полости корпуса стержневого ящика создается разрежение воздуха, под действием которого пленка плотно притягивается к поверхности ящика. Через отверстия верхнего фланца засыпается песок, который уплотняется встряхиванием. После герметизации отверстий пленкой полость стержневого ящика соединяется с вакуумной системой, и под действием разрежения воздуха песок упрочняется. Одновременно полость корпуса отключается от источника разрежения, пленка отделяется от рабочей поверхности ящика. Затем стержневой ящик разнимается и стержень передается на сборку.

На рис. 112 приведена модельная оснастка для изготовления форм способом вакуумной формовки орнаментированной бытовой ванны. Эта оснастка характеризуется наличием вакуумируемых полостей А и Б, соединенных множеством мелких отверстий (диаметром 1,2—1,5 мм) с формообразующей поверх-

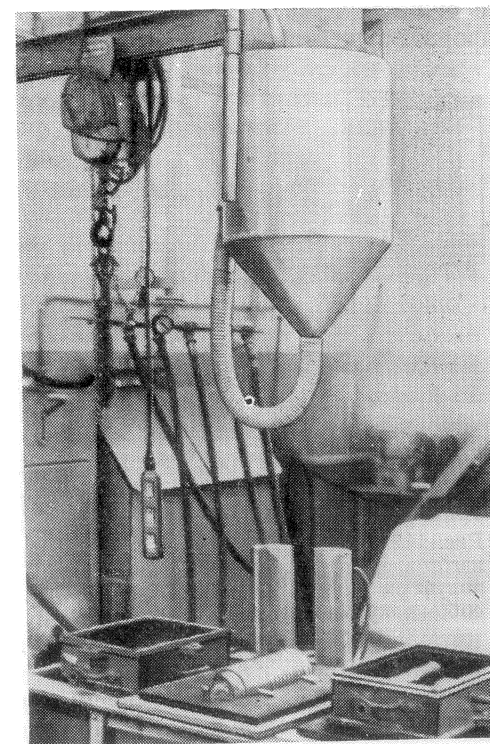


Рис. 110. Общий вид модельно-опочной оснастки для формовки из сыпучих песков гильз двигателя СМД-14.

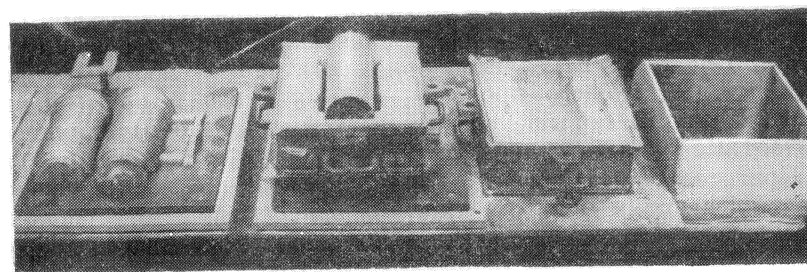


Рис. 111. Форма из сыпучих песков и порошков перед сборкой.

ностью модели. Такая конструкция моделей обеспечивает равномерный присос герметизирующего элемента к формообразующей поверхности. Все операции формовки ванны из сыпучих песков выполняются в той же последовательности, что и при формовке гильз.

Способ изготовления форм из сыпучих песков по сравнению с существующими имеет следующие преимущества: упрочнение форм осуществляется в результате перепада давления воздуха,

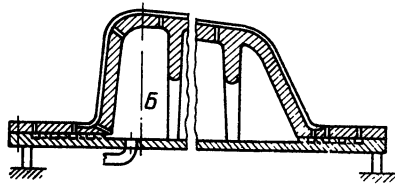
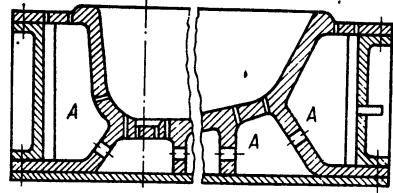


Рис. 112. Модельная оснастка для изготовления нижней и верхней полуформ ванны с орнаментом способом вакуумной формовки.

что исключает операции смешивания, выбивания форм и применения связующих материалов, повышаются производительность труда и культура производства в литейных цехах; применение обогащенных формовочных песков и порошков позволяет использовать силы межчастичного взаимодействия. При этом зерна песка, сближаясь под действием разреженных воздушных потоков, образуют замкнутые кольцевые структуры, характеризующиеся повышенной твердостью (95—100 усл. ед.); округлая форма зерен обогащенных кварцевых, цирконовых, дистен-силлиманитовых песков способствует образованию плотной

укладки зерен, стойкой к эрозии при заливке форм жидким металлом; применение обогащенных песков взамен небогатых исключает спекание и растрескивание зерен и резко увеличивает термическую стойкость песков.

Получение форм с отпечатком орнамента по выплавляемым и выжигаемым моделям. При этом способе орнамент образуется на модели по отпечатку фасонной поверхности металлической пресс-формы, а также путем механической или термической обработки. Все операции формообразования методом точного литья по модели с отпечатком орнамента не отличаются от операций существующего процесса, применяемого в промышленности. С целью повышения химической инертности оболочек контактные слои выполняются из бескремнеземных суспензий.

Приготовление суспензий для облицовочных слоев производится следующим образом: тщательно перемешиваются порошкообразные материалы и затем добавляются жидкие компоненты (вода, водный раствор Na—KMnO₄).

В качестве связующего суспензий для закрепляющих слоев

оболочек используется гидролизированный раствор этилсиликата, в котором содержится 18—20% SiO₂, так как в этом случае обеспечивается максимальная прочность оболочек. Огнеупорное покрытие наносится путем двух-трехкратного окунания модельных блоков в суспензию. Затем удаляются пузырьки воздуха и выравнивается толщина слоя путем поворота блока в противоположных направлениях, после чего блок обсыпается огнеупорным порошком соответствующей зернистости. При получении слишком толстого и неравномерного слоя возможны значительная усадка и растрескивание оболочек при сушке. Бескремнеземные облицовочные слои сушатся на воздухе, закрепляющие — на воздухе и в аммиачной среде.

После сушки оболочек и удаления моделей формы обжигаются при температуре 1000—1300°С с целью удаления газотворных связующих и спекания огнеупорных наполнителей.

Получение тонкостенных отливок с развитой поверхностью в металлических формах. Большую часть номенклатуры тонкостенных отливок с развитой поверхностью составляют бытовые и сантехнические литые изделия из чугуна, которые по условиям службы не должны иметь отбела. Наиболее распространенным материалом формовочных покрытий, применяемых при производстве тонкостенного чугунного литья в металлические формы, являются канальная сажа и аморфный графит. Эти материалы содержат канцерогенные вещества, вызывающие различные заболевания, и не обеспечивают необходимые санитарно-гигиенические условия труда. Замена этих материалов является чрезвычайно важной задачей. В основу выбора материалов для бессажевых покрытий положены следующие требования: при получении отливок с толщиной стенок 2,5—8 мм — высокая теплоизоляционная способность, при получении отливок с толщиной стенок более 8 мм — высокая термостойкость, сочетающаяся с достаточной теплоизоляционной способностью. Регулирование коэффициента тепловой аккумуляции осуществляется путем подбора материалов с различной плотностью (пористостью). Высокоэффективными теплоизоляторами являются материалы с коэффициентом тепловой аккумуляции до 4 ккал/м²·°С·ч^{1/2}.

Исследованиями канальной сажи установлено, что она представляет собой частички твердого углерода, окруженные тонким слоем адсорбированного воздуха. Твердая фаза в саже составляет 5%, газовая — 95%. Большое количество газовой фазы определяет низкое значение коэффициента тепловой аккумуляции (0,9 ккал/м²·°С·ч^{1/2}). На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований авторы предложили бессажевые дисперсные материалы, имеющие микропористое строение в исходном состоянии: при получении отливок с толщиной стенок 2,5—8 мм — пылевидный вспученный перлит и пробковая мука, при получении отливок с толщиной стенок бо-

лее 8 мм — пирофиллитовый порошок и мелкодисперсная древесная мука (табл. 63).

Технологический процесс приготовления бессажевых красок состоит из двух стадий — приготовление пасты и приготовление суспензии.

Таблица 63

Бессажевые теплоизоляционные покрытия металлических форм для тонкостенных отливок с развитой поверхностью

Компонент	Содержание, %	
	Состав № 1	Состав № 2
Перлит вспученный пылевидный	60—62	—
Пробковая мука	13—15	—
Пирофиллит	—	58—59
Древесная мука	—	14—15
Каолин обогащенный просьяновский	10—11	7—8
Жидкое стекло (модуль 2,6—2,9, плотность 1,47—1,5 г/см ³)	14—15	19—20
Альгинат натрия (сверх 100%)	0,25—0,3	—
Калий марганцевокислый (сверх 100%)	—	0,25
Вода (до плотности по ареометру)	1,04—1,06	1,18—1,2

В раствор жидкого стекла согласно рецептуре добавляется пробковая или древесная мука и кипятится в течение 2 ч. Порошкообразные компоненты перемешиваются в бегунах в течение 5 мин, затем добавляется жидкая смесь и перемешивание продолжается еще 12—15 мин. Перед употреблением паста выдерживается не менее 2 ч и не более суток. Для приготовления суспензии паста разбавляется водой до получения необходимой плотности.

Режим подготовки кокиля и получения отливок следующий: обогрев кокиля газом до температуры 200—250° С и нанесение огнеупорного защитного слоя покрытия; нанесение теплоизоляционной бессажевой краски и нагрев кокиля до температуры 300—320° С с последующей заливкой изделий жидким чугуном с интервалом 4—10 мин. Теплоизоляционный слой покрытия возобновляется после каждой заливки. В период работы температура кокиля достигает 300—380° С. Структура отливки — феррито-перлитовая основа, графит мелкопластинчатый. Отбел отсутствует.

Применение бессажевых теплоизоляционных покрытий для металлических форм обеспечивает получение качественной структуры тонких элементов орнамента тонкостенных отливок.

2. Получение тонкостенных отливок с орнаментом

Литые детали с орнаментом для двигателей СМД-14 и СМД-60. Гильзы, поршни и блоки цилиндров являются ответственными деталями двигателей, и от их качества зависят производительность, экономичность и надежность работы тракторов. Износ деталей цилиндро-поршневой группы зависит не только от температурного и нагрузочного режима работы двигателя, но и от конструктивных особенностей, определяющих их

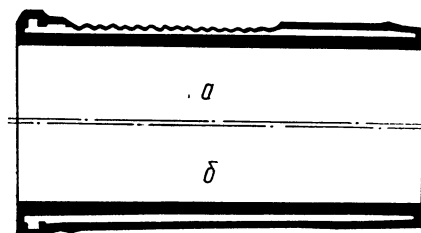


Рис. 113. Сечение стенок гильз с припуском на механическую обработку: а — гильза с литым орнаментом; б — промышленная гильза.

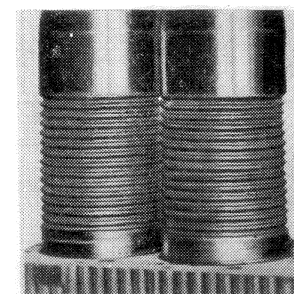


Рис. 114. Отливки гильз с орнаментом, полученные в формах из сыпучих песков и порошков.

стойкость. Особую остроту приобретает повышение кавитационной стойкости гильз. Кавитационное разрушение гильз во многих случаях наступает раньше, чем их механический износ.

Гильза с орнаментом отличается от промышленной тем, что в области ее охлаждения исключен припуск металла на механическую обработку и нанесен литой орнамент в виде гофра (рис. 113, 114). Такая конструкция обеспечивает получение высококачественной мелкозернистой перлитной структуры и плотной рабочей поверхности гильзы. Рабочая поверхность промышленной гильзы характеризуется крупнозернистой рыхлой структурой, определяемой условиями кристаллизации металла.

Стойкость чугуна на истирание повышается по мере измельчения структуры и включений графита. Минимальной износостойкостью характеризуется чугун с перрито-ферритной структурой и крупным графитом, максимальной — с перлитовой структурой и мелким графитом. Химический состав чугуна для гильз выдерживался в следующих пределах, %: С=3,1—3,45; Si=1,7—2,2; Mn=0,7—1,1; P=0,14—0,18; S=0,07—0,1; Cr=0,1—0,3; Ni=0,09—0,15; Cu=0,15—0,4. Температура заливки жидкого чугуна составляла 1380—1390° С. Для повышения износостойкости гильзы с орнаментом подвергаются поверхностной

закалке на установке ТВЧ. Особенностью режима закалки гильз с орнаментом, обеспечивающей получение необходимой структуры и глубины закаленного слоя, является пониженное напряжение, равное 255 В, вместо 270 В при закалке серийных гильз.

В структуре гильзы с орнаментом феррит отсутствует, в промышленной гильзе наблюдаются более крупное зерно и наличие феррита до 5%. Твердость гильз с орнаментом более равномерная и характеризуется плавным переходом от закаленного слоя к сердцевине (рис. 115). В серийных гильзах переход от закаленного слоя к сердцевине происходит скачкообразно, что создает благоприятные условия для возникновения больших внутренних напряжений и возникновения трещин в теле детали.

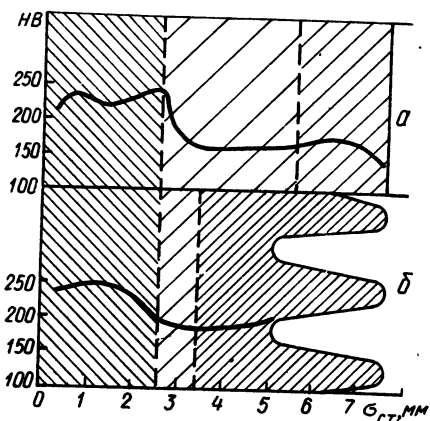


Рис. 115. Твердость по сечению стенки гильз СМД-14 и СМД-60 после закалки:

а — промышленные гильзы; б — гильзы с орнаментом.

В табл. 64, 65 приведены данные о влиянии толщины стенки на химическую неоднородность и о браке отливок гильз, полученных по различной технологии.

Взамен существующего метода испытания прочности и деформаций на кольцевых лабораторных образцах, вырезанных из гильз, разработан метод натуральных испытаний гильз. Гильза устанавливается в приспособление, воспроизводящее узел поршневой группы (рис. 116). После заполнения рабочего объема суспензией, состоящей из солидола и графита, взятых в соотношении 3 : 2, к гильзе подводятся три датчика, расположенные под углом 120° относительно друг друга. Нагружение

Таблица 64

Химическая неоднородность по сечению стенки гильзы, полученной центробежным способом

Место отбора пробы	Содержание, %			Место отбора пробы	Содержание, %		
	Si	Mn	S		Si	Mn	S
Толщина стенки 16 мм				Толщина стенки 8 мм			
Наружный слой	1,8	0,8	0,09	Наружный слой	1,8	0,8	0,09
Внутренний »	2,0	1,0	0,16	Внутренний »	1,85	0,86	0,10

производится по заданному режиму. Показания регистрируются автоматическим самопишущим потенциометром.

По этой методике проведено три серии опытов. В первой серии определяли критические нагрузки, во второй — прочность при циклическом нагружении (нагружение и резкое разгрузение) и в третьей — предел текучести при равномерном нагружении. По результатам испытаний строили кривые в координа-

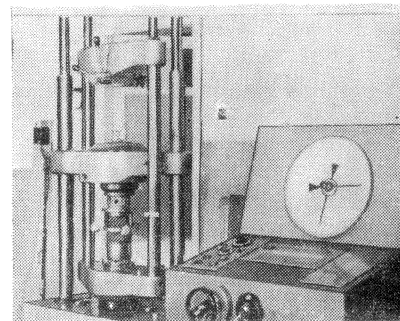


Рис. 116. Стенд для испытания гильз на жесткость.

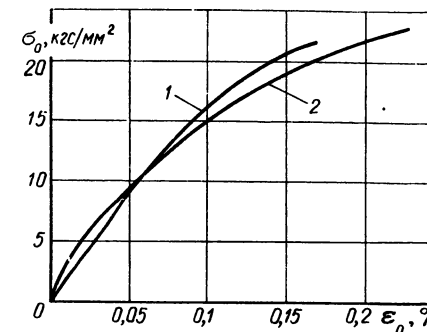


Рис. 117. Зависимость деформации гильзы с винтовым орнаментом от нагрузки:

1 — серийные гильзы; 2 — гильзы с орнаментом.

тах напряжение — деформация и определяли жесткость и другие упругие характеристики опытных и серийных гильз. Испытание гильз с винтовым орнаментом на жесткость было проведено в Институте проблем прочности АН УССР.

Зависимость деформации ϵ_0 от напряжений σ_0 , возникающих под действием переменной нагрузки P , приведена на рис. 117.

Гильзы с винтовым орнаментом, имеющие массу на 1—1,5 кг меньше серийных, характеризуются идентичной жесткостью и повышенными модульными характеристиками.

Таблица 65

Брак отливок чугунных гильз, полученных по различной технологии, %

Характеристика отливки	Включения		Недолив металла	Общий брак
	сульфидные и шлаковые	формовочных материалов		
Гильзы, отлитые в песочно-глинистые формы (толщина стенки 16 мм)	8,9	2,45	0,25	11,6
Гильзы с орнаментом, полученные центробежным литьем (толщина стенки 8 мм)	7,0	2,00	0,30	9,3
Гильзы, полученные с применением шлаковой обработки (толщина стенки 16 мм)	1,5	2,45	0,30	4,25

При испытании на кавитационную стойкость гильзы с орнаментом были установлены в первый и третий цилиндры стендового двигателя, серийные — во второй и четвертый. Для интенсификации процесса кавитации в рабочей паре гильза — поршень создавался зазор в 1 мм. Температура охлаждающей воды

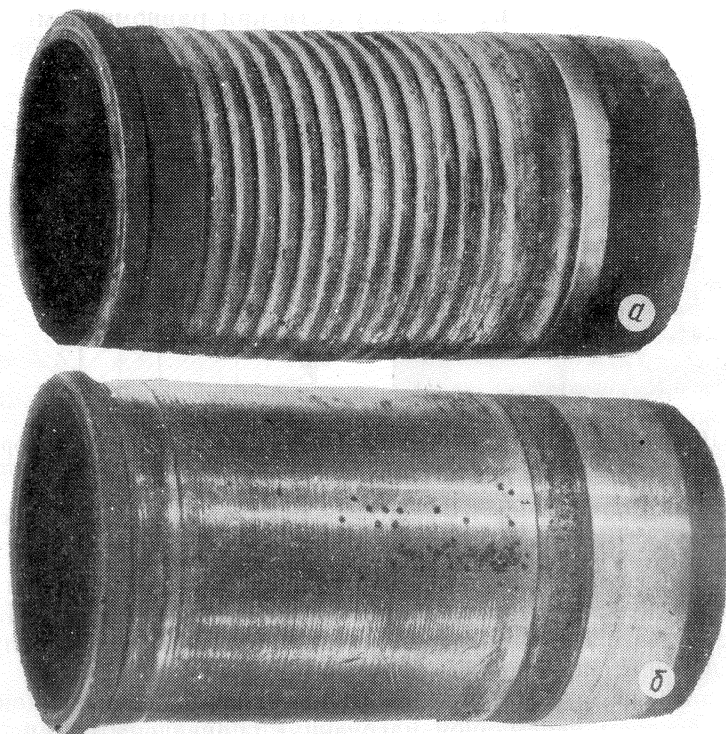


Рис. 118. Кавитационный износ после стендовых испытаний: а — гильза с орнаментом; б — серийная гильза.

составляла 55° С. Время непрерывной работы двигателя на форсированном режиме составляло 100 ч, что приравнивается к 3000 моточасов работы двигателя в естественных условиях.

После испытаний гильзы имеют вид, показанный на рис. 118. Литая поверхность опытной гильзы значительно поражена кавитационным разрушением, в то время как в серийной гильзе эта зона по глубине и размеру поражения в семь-восемь раз больше и гильза к дальнейшей работе непригодна.

Определение температур поршневой пары проводилось на двигателях СМД-60 и его модификациях. Испытывались пары поршень — серийная гильза с поверхностью охлаждения 630 см² и поршень — гильза с винтовым литым орнаментом с поверхностью охлаждения 820 см². Температура поршня измерялась

переносным потенциометром ПЦ-63 с электронным осциллографом ЭО-7, а температура гильз — электронным потенциометром ЭПП-09М. Термометрирование поршня и гильзы производилось при различных режимах работы двигателя.

Проведенные испытания показали, что в двигателях, оборудованных гильзами с винтовым орнаментом по наружной литой поверхности, по сравнению с серийными достигается снижение температуры: в канавке верхнего компрессорного кольца поршня в среднем на 7—8 град и в нижнем поясе гильзы на 10—12 град. Это позволяет значительно повысить технико-экономические показатели работы двигателей.

После гарантийного срока эксплуатации износ на внутренней поверхности гильз с орнаментом вдвое меньше, чем в промышленных, эллипсность и конусность находятся в пределах допуска [107].

Применение наружной литой гофрированной поверхности гильз в зоне охлаждения водой является эффективным средством борьбы против кавитационного разрушения. В промышленных гильзах наружная поверхность покрыта накипью в два слоя, при этом первый слой отделяется от гильзы с трудом, а второй покрыт большим количеством мелких характерных пузырьков, являющихся зародышами кавитационного разрушения. Наружная поверхность гильз с орнаментом покрыта накипью в один легкоотделяемый слой, в котором практически отсутствует скопление пузырьков. Такое различие объясняется тем, что в промышленной гильзе процессы окисления и образования накипи на обработанной поверхности происходят одновременно.

Блок цилиндров отливался с литым орнаментом на внутренней и наружной поверхностях (рис. 119). Масса этого блока по сравнению с массой серийного уменьшена на 26 кг. Испытания блоков производились непосредственно в эксплуатационных условиях и дали положительные результаты. Отмечено, что температура опытного блока при форсированном режиме работы двигателя на 25—30 град ниже, чем серийного.

Корпус реактора с литым орнаментом. Технология эмалирования чугуновых отливок для химического машиностроения (корпуса емкостью 25—2000 л, крышки корпусов и т. п.) предъявляет высокие требования к качеству подлежащей эмалированию поверхности. В настоящее время основной операцией по подготовке поверхности чугуновой отливки к эмалированию является механическая обработка.

Авторы монографии предложили конструкцию тонкостенных чугуновых реакторов с орнаментом, внутренняя поверхность которых перед эмалированием не обрабатывается механически, а подвергается только абразивной зачистке и дробеструйной обработке. Рельефный орнамент в виде сетчатого гофра выполнен на внутренней поверхности формы (рис. 120). Орнамент вы-

полнен с таким расчетом, чтобы сохранить оптимальное значение жесткости корпуса реактора, соответствующее условиям максимальных нагрузок аппарата при рабочем процессе. Одним из условий хорошего сцепления чугуна с эмалевым покрытием является мелкокристаллическая структура поверхностного слоя с равномерно распределенным тонкодисперсным графитом.

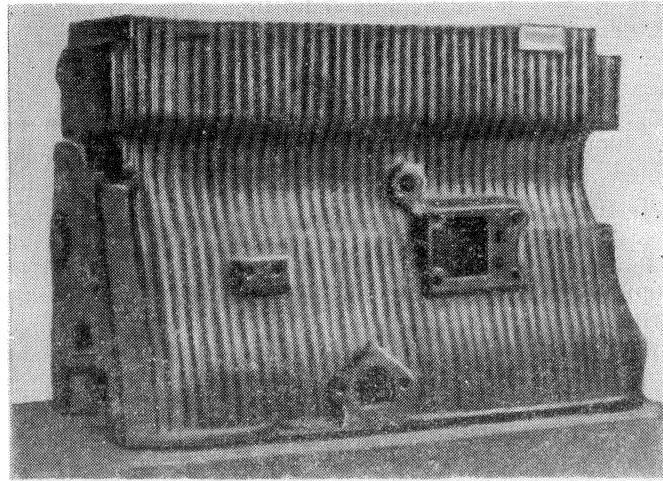


Рис. 119. Опытный блок двигателя СМД-14 с литым орнаментом.

Несколько повышенное содержание кремния в поверхностном слое отливки, обусловленное особенностями кристаллизации, благоприятно влияет на распад цементита, повышает степень насыщения и прочность сцепления плены окислов с металлом.

Мелкокристаллическая структура литой поверхности имеет большое преимущество перед структурой механически обработанной поверхности. Она существенно повышает долговечность, прочность, коррозионные и эксплуатационные характеристики отливок. На рис. 121—123 показаны облегченные отливки с орнаментом мелкого и среднего развеса, полученные по различной технологии. Исследования и опыт применения орнамента на отливках показывают, что орнаментированные литые детали характеризуются улучшенной структурой, повышенной удельной прочностью и жесткостью, меньшей массой и высокими эксплуатационными свойствами [31, 107].

В заключение следует отметить, что современные разработки по усовершенствованию существующих и созданию новых технологий и новых материалов для литейного производства позволяют изменить принципы проектирования и конструирования отливок и деталей из них. Во многих литературных источ-

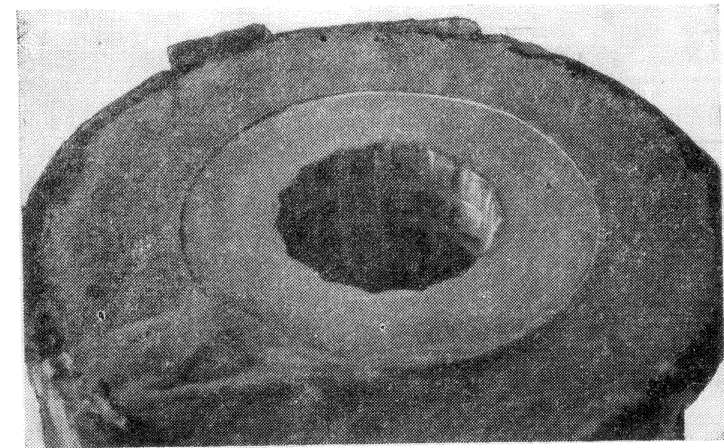


Рис. 120. Форма для отливки корпуса реактора с орнаментом.



Рис. 121. Чугунные отливки с орнаментом, полученные в вакуумируемых формах из сыпучих песков:
а — малая ванна; б — изложница.

никах по литейному производству до сих пор встречаются рекомендации о соблюдении следующих принципов конструирования отливок: простоты геометрических форм, простоты их выполнения и механической обработки, сокращения литых поверхностей.

Новые процессы позволяют с несущественной разницей в затратах получать как простые, так и сложные по форме детали (литье по выплавляемым и газифицируемым моделям, вакуумной или магнитной формовкой и др.) необходимого качества.

При новых методах изготовления стержней в некоторых процессах (например, вакуумной и магнитной формовках) формование внутренних, со сложной конфигурацией поверхностей

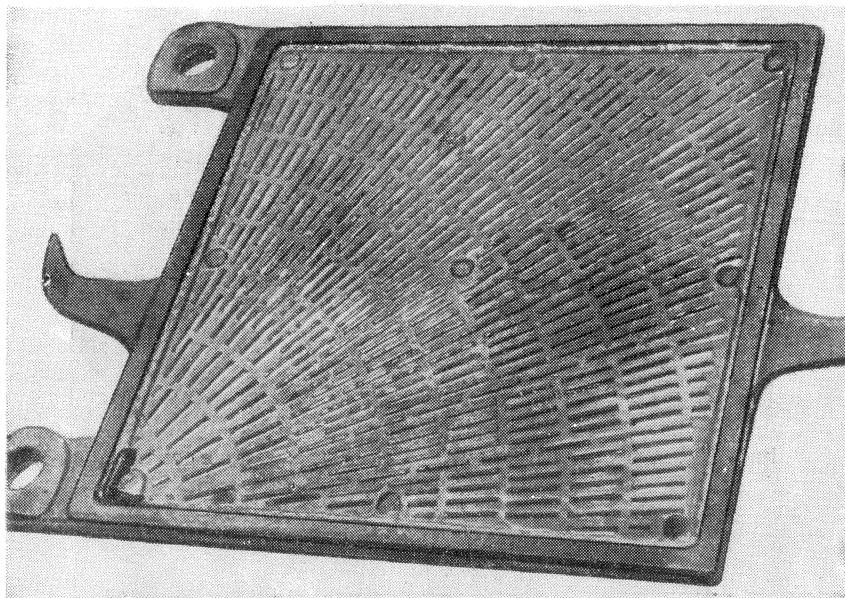


Рис. 122. Чугунная плита с орнаментом, полученная в металлической форме с теплоизоляционным покрытием.

отливки не ограничивается выбиваемостью с удалением стержневой массы из полостей, что дает возможность существенно расширить номенклатуру литых изделий. Использование достижений по улучшению качества отливок с применением новых методов, материалов покрытий и усовершенствований процессов литья позволяет во многих случаях сократить припуски на механическую обработку или отказаться от них вообще и существенно уменьшить толщину стенки отливки путем развития качественного литого мелкокристаллического слоя.

В результате усовершенствования конструкции отливок деталей тракторного двигателя, деталей аппаратов для химического машиностроения, промышленного и бытового строительства на 20—25% снижена масса отливок и на 10—25% снижены затраты на их изготовление.

В поисках дополнительных или неиспользованных резервов литых материалов специалисты многих стран обращают особое внимание на литье как на универсальный и экономичный способ изготовления заготовок и деталей. У нас и за рубежом все больше появляется сведений общего и конкретного характера о преимуществах и экономической эффективности применения отливок [110—115]. Приводятся примеры рационального конструирования. Здесь весьма важным является совместная работа конструкторов и технологов-литейщиков на ранних стадиях

проектирования. Современные стандарты в некоторых странах (Бельгия, Англия, ФРГ, Италия, Франция, ПНР, ЧССР, Япония, США) [116] учитывают зависимость механических свойств серого чугуна от толщины стенок или приведенной толщины стенок, которая определяет продолжительность кристаллизации и предлагает нормы для серого чугуна как функции приведенной толщины.



Рис. 123. Пластмассовые изделия, полученные в литой пресс-форме с орнаментом.

Одни стандарты (бельгийский, итальянский, ФРГ) приводят данные о снижении значений прочности σ_b при увеличении приведенной толщины отливки, другие (французский, американский) информируют о соответствующей данной марке прочности в брусках с разной толщиной, адекватной приведенной толщине отливки. Руководствуясь этими нормами, конструктор подбирает марку серого чугуна, а литейщик его состав, для чего он может пользоваться соответствующими диаграммами, где на оси абсцисс отложена толщина плиты внизу и соответствующий диаметр образца в мм, вверху на оси ординат эвтектичность или углеродный эквивалент чугуна [116]. Н. Г. Гиршович [25] рекомендует в оценке прочности и твердости металла отливки при разных марках серого чугуна использовать данные ЦНИИТ-маша (приложение к ГОСТ 1412—70), а при необходимости обеспечения в отливке определенной прочности подбирать состав чугуна тем более жесткий, чем толще отливка согласно польскому стандарту. Успехи литейного производства и рационального конструирования повысили конкурентную способность литых изделий. Наблюдается тенденция замены некоторых сварных заготовок и поковок литыми [110—115, 117—121]. Не вызывает сомнения и значимость рационального кон-

струирования в повышении коэффициента использования материалов и резерва их свойств, снижение стоимости изделий.

Рациональное конструирование с применением орнамента на отливках (учет эксплуатационных требований к детали), создание и выбор технологии, направленной на получение качественных поверхностных слоев отливки, правильный выбор материалов, приводящих к снижению и ликвидации механической обработки, являются важными предпосылками для повышения роли литья, как универсального и экономически эффективного способа изготовления заготовок и деталей. Увеличение удельного объема мелкокристаллического поверхностного слоя путем размещения на литых необрабатываемых поверхностях геометрических элементов в виде фасонных выступов и впадин раскрывает новые возможности повышения эксплуатационных свойств и снижения металлоемкости литых изделий.

1. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов.— М.; Л.: Гостехиздат, 1958.—368 с.
2. Якобсон М. О. Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке.— М.: Машгиз, 1956.—292 с.
3. Сидоров Н. Ф. Особенности деформирования остаточных напряжений в титановых сплавах при резании и пластическом поверхностном деформировании.— Пробл. прочности, 1971, № 9, с. 99—102.
4. Степанов В. Г., Клестов М. И. Поверхностное упрочнение корпусных конструкций.— М.: Судостроение, 1977.—118 с.
5. Карпенко Г. В. Влияние механической обработки на прочность и выносливость стали.— Москва; Киев: Машгиз, 1959.—186 с.
6. Упрочнение стали механической обработкой / Г. В. Карпенко, Ю. И. Бабей, И. В. Карпенко, Э. М. Гутман.— Киев: Наук. думка, 1966.—202 с.
7. Манасевич А. Д. Физические основы напряженного состояния прочности металлов.— Москва; Киев: Машгиз, 1962.—198 с.
8. Гриненко Н. И. Динамика и прочность конструкций.— Челябинск.— В подзаг.: Челяб. политехн. ин-т им. Ленинского комсомола, 1975.—210 с.
9. Храповский Э. Я. Структура и прочность тонкостенных отливок из серого чугуна.— М.: Машиностроение, 1965.—116 с.
10. Цибрик А. Н. Физико-химические процессы в контактной зоне металл — форма.— Киев: Наук. думка, 1977.—210 с.
11. Гуляев А. П. Металловедение.— М.: Оборонгиз, 1956.—344 с.
12. Проскураков Ю. Г. Упрочняюще-калибрующие методы обработки.— М.: Машиностроение, 1965.—207 с.
13. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках.— М.; Л.: Машиностроение, 1966.—562 с.
14. Гиршович Н. Г. Чугунное литье.— М.: Металлургиздат, 1949.—708 с.
15. Технологические основы литейного производства.— М.: Машгиз, 1962.—246 с.
16. Горшков А. А., Жаров П. Т. Способы получения отливок с чистой поверхностью.— М.: Машгиз, 1953.—219 с.
17. Орлов А. В. Технология производства и свойства черных металлов.— Тр. УкрНИИмашиностроения, 1961, 1, с. 42—58.
18. Цибрик В. А. Исследование структуры поверхностного слоя и получение отливок деталей двигателя и реактора химической промышленности с литым орнаментом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1975.—22 с.
19. Палестин С. М., Крымский Д. М. О связи между толщиной стенок, химическим составом, структурой и механическими свойствами отливок из серого чугуна.— Литейн. пр-во, 1964, № 1, с. 27—31.
20. Механические свойства литого металла.— М.: Наука, 1969.—308 с.
21. Теплофизика в литейном производстве.— Минск: Изд-во АН БССР, 1963.—536 с.

22. *Международный конгресс литейщиков.*— М. : Машгиз, 1961.—676 с.
23. *Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей.*— М. : Изд-во АН СССР, 1945.—310 с.
24. *Гиршович Н. Г. Литейное производство.*— В кн. : Материалы юбил. совещ. работников пром-сти, трансп. и стр-ва, деятелей науки и техники г. Ленинграда, июнь 1957 г. : Посвящается 250-летию г. Ленинграда. Л., 1974, с. 140—185.
25. *Гиршович Н. Г. Справочник по чугуному литью.*— Л. : Машиностроение, 1979.—45 с.
26. *Спаский А. Г. Основы литейного производства.*— М. : Metallurgizdat, 1950.—311 с.
27. *Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства.*— М. : Машгиз, 1961.—447 с.
28. *Цибрик А. Н. О некоторых факторах, способствующих производству высококачественного литья.*— В кн. : Горячая обработка металлов. Киев : Наук. думка, 1960, с. 17—24.
29. *Физические основы прочности тугоплавких материалов / В. И. Трефилов, Ю. В. Нильман, С. А. Фирсов.*— Киев : Наук. думка, 1975.—316 с.
30. *Гуляев Б. Б. Затвердевание и неоднородность стали.*— М. : Metallurgizdat, 1950.—228 с.
31. *Цибрик В. А., Степанов В. Г. Удельная прочность литых деталей и экономия металлов.*— В кн. : Повышение коэффициента использования металла. Киев : Ин-т пробл. литья АН УССР, 1971, с. 104—106.
32. *Цибрик В. А. Влияние литой поверхности на прочностные и износостойкие материалы.*— Киев : Ин-т пробл. литья АН УССР, 1975, с. 116—121.
33. *Цибрик В. А. Технологические основы производства литых чугунных гильз.*— Технология и орг. пр-ва, 1974, № 11, с. 44—46.
34. *Цибрик А. Н., Цибрик В. А., Коробко Б. П. Новые резервы повышения эффективности и качества литья.*— В кн. : Тез. Всесоюз. совещ. по повышению качества литья. Павлодар, 1977, с. 9—12.
35. *Ужик Г. В. Масштабный фактор в связи с оценкой прочности металлов и расчетом деталей машин.*— Изв. АН СССР, 1955, № 11, с. 109—112.
36. *Терешкович А. С. Структура и свойства новых жаропрочных материалов.*— М., 1962, с. 62—70.— В надзаг. : ЦНИИтяжелого машиностроения.
37. *Соболев Н. Д. О природе начального разрушения.*— Журн. техн. физики, 1957, № 10, с. 22—73.
38. *Чечулин Б. Б. Хрупкость металлов и масштабный эффект.*— Журн. техн. физики, 1955, № 1, с. 25—30.
39. *Станкевич О. Ф., Бондарев Ю. Е. Динамические испытания геометрически подобных образцов при низких температурах.*— Завод. лаб., 1959, № 4, с. 470—478.
40. *Затвердевание металлов.*— М. : Машгиз, 1958.—533 с.
41. *Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении.*— М. : Машгиз, 1951.—287 с.
42. *Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов.*— М. : Машгиз, 1947.—184 с.
43. *Кудрявцев И. В., Саввина Н. М. Влияние десятилетнего хранения на усталостную прочность деталей с остаточными напряжениями.*— М. : Машиностроение, 1965.—18 с.
44. *Палий О. М., Чувиковский В. С. Основы теории надежности судовых корпусных конструкций.*— Л. : Судостроение, 1965.—324 с.
45. *Розенталь Д. Влияние остаточных напряжений на разрушение технических материалов.*— В кн. : Остаточные напряжения. М. : Изд-во иностр. лит., 1954, с. 296—297.
46. *Цибрик А. Н. Отливки чугунных деталей с минимальными напряжениями.*— Тр. Ин-та лесн. и топлив. пром-сти, 1956, вып. 2, с. 98—102.
47. *Абрамов В. В. Остаточные напряжения и деформации в металлах.*— М. : Машгиз, 1963.—60 с.
48. *Цибрик А. Н., Мисечко В. И. Кристаллохимические характеристики открытий литейных форм.*— В кн. : Прогрессивная технология литейного производства. Горький : Волго-Вят. кн. изд-во, 1969, с. 99—102.
49. *Горшков А. А., Рабинович Е. И. Поверхностное легирование стальных отливок.*— М. : Машгиз, 1950.—208 с.
50. *Михайлов А. Н. Поверхностное упрочнение отливок легирующими материалами.*— В кн. : Прогрессивная технология литейного производства. Горький : Волго-Вят. кн. изд-во, 1969, с. 88—90.
51. *Старцев В. И. Поверхностное легирование стальных отливок ванадием.*— В кн. : Прогрессивная технология литейного производства. Горький : Волго-Вят. кн. изд-во, 1969, с. 92—99.
52. *Мисечко В. И., Цибрик В. А., Вовченко Л. М. Вакуумный способ изготовления песчаных форм.*— Технология и орг. пр-ва, 1976, № 6, с. 74—76.
53. *Озеров В. А., Шуляк В. С., Плотников Г. А. Литье по моделям из пенополистирола.*— М. : Машиностроение, 1970.—183 с.
54. *Степанов Ю. А. Технологические вопросы механизации и автоматизации процесса литья по газифицируемому пенополистироловым моделям.*— М. : Машиностроение, 1967.—61 с.
55. *Лейбензон Л. С. Курс теории упругости.*— М. ; Л. : Гостехиздат, 1947.—464 с.
56. *Гржимайло В. Н. Деформационное подобие и исследование напряженно-состояния составных плоских тел оптическим методом.*— В кн. : Тр. VII Всесоюз. конф. по поляризац.-опт. методу исслед. напряжений. Таллин, 1971, с. 125—132.
57. *Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела.*— М. : Наука, 1973.—576 с.
58. *Фрохт М. М. Фотоупругость.*— М. : Гостехиздат, 1948.—Т. 1. 432 с.
59. *Микроков Р. А. Поверхностные процессы на границе раздела металл—форма.*— В кн. : Прогрессивная технология литейного производства. Горький : Волго-Вят. кн. изд-во, 1969, с. 105—110.
60. *Паньков В. А. Концентрация напряжений около шероховатостей границы упругого тела.*— Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1963, № 3, с. 65—73.
61. *Давиденков Н. Н., Лихачев В. А. Необратимое формоизменение металлов при циклическом тепловом воздействии.*— М. : Машгиз, 1962.—222 с.
62. *Воронков В. В. Об атомной структуре грани алмазной решетки.*— Кристаллография, 1966, 11, вып. 2, с. 17—29.
63. *Дворянкин В. Ф., Митягин А. Ю. Дифракция медленных электронов—метод исследования атомной структуры поверхностей.*— Кристаллография, 1967, 12, вып. 6, с. 34—51.
64. *Гуляев Б. Б. Проблемы взаимодействия литейной формы и отливки.*— В кн. : Взаимодействие литейной формы и отливки. М. : Изд-во АН СССР, 1962, с. 9—47.
65. *Малин Ж. В. Кристаллизация.*— М. : Metallurgizdat, 1965.—260 с.
66. *Паунд Г. М. Зарождение кристаллов при затвердевании металлов.*— В кн. : Жидкие металлы и их затвердевание. М. : Metallurgizdat, 1962, с. 106—126.
67. *Чернов Д. К. Наука о металлах.*— М. : Metallurgizdat, 1950.—563 с.
68. *Овсиенко Д. Е. Рост и дефекты металлических кристаллов.*— Киев : Наук. думка, 1972.—486 с.
69. *Вейник А. И. Тепловые основы теории литья.*— М. : Машгиз, 1953.—383 с.
70. *Нехендзи Ю. А. Стальное литье.*— М. : Metallurgizdat, 1948.—767 с.
71. *Доброхотов Н. Н. Расчеты времени затвердевания отливок и прогревания стенок литейной формы.*— Вестн. машиностроения, 1948, № 8, с. 37—49.
72. *Нехендзи Ю. А. Формирование качества стальных отливок.*— М. : Metallurgizdat, 1962.—167 с.
73. *Шварц А. Н. Поверхностно-активные вещества.*— М., 1958.—83 с.
74. *Иванцов Г. П. Теплообмен между слитком и изложницей.*— М. : Metallurgizdat, 1951.—40 с.

75. *Хворинов Н. А.* Затвердевание отливок.— М.: Изд-во иностр. лит., 1955.— 142 с.
76. *Петриченко А. М.* Теория и технология кокильного литья.— Киев: Техника, 1967.— 250 с.
77. *Вайнгард У.* Введение в физику кристаллизации металлов.— М.: Мир, 1967.— 159 с.
78. *Ефимов В. А.* Влияние свойств металлических расплавов на процессы формирования отливок и слитков.— Физика и химия обраб. материалов, 1967, № 3, с. 7—12.
79. *Василюк П. Ф.* Об инъекции воздуха и кристаллизации в литниковых каналах при заливке форм из стопорных ковшей.— В кн.: Улучшение качества отливок. Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1966.— 406 с.
80. *Швидковский Е. Т.* Некоторые вопросы вязкости расплавленных металлов.— М.: Гостехиздат, 1955.— 207 с.
81. *Гиршович Н. Г.* Справочник мастера по чугунному литью.— М.: Машгиз, 1953.— 74 с.
82. *Бидуля П. Н.* Технология стальных отливок.— М.: Metallurgizdat, 1961.— 352 с.
83. *Гуляев Б. Б.* Затвердевание и неоднородность стали.— М.: Metallurgizdat, 1950.— 176 с.
84. *Рыжиков А. А.* Теоретические основы литейного производства.— М.: Машгиз, 1954.— 328 с.
85. *Цибрик А. Н.* Нові формувальні матеріали.— К.: Вид-во АН УРСР, 1962.— 128 с.
86. *Цибрик А. Н.* Теплоизоляционные материалы для облицовки форм и прибылей отливок и слитков.— Киев: Ин-т техн. информ., 1962, с. 28—35.
87. *Иоффе А. Ф.* Физика твердого тела: Сб. статей.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959.— 328 с.
88. *Савицкий Е. М., Терехова В. Ф.* Металловедение редкоземельных металлов.— М.: Наука, 1975.— 272 с.
89. *Геузин Я. Е., Кривоглаз М. А.* Движение макроскопических включений в твердых телах.— М.: Metallurgia, 1971.— 344 с.
90. *Цибрик А. Н.* Научные основы применения покрытий литейных форм.— В кн.: Теория и практика процессов литья. Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1967, с. 37—41.
91. *Отливки чугуновых деталей с минимальными напряжениями.*— Тр. Ин-та лесн. и топлив. пром-сти, 1956, вып. 2, с. 171—184.
92. *Нейберг Т.* Концентрация напряжений.— М.; Л.: Гостехиздат, 1947.— 204 с.
93. *Шенк Г.* Физико-химия металлургических процессов: Химико-металлург. реакции и их законы.— Харьков; Киев: Гостехиздат УССР, 1935.— 384 с.
94. *Белов Б. И.* Влияние газовой среды на образование пригара в стальном литье.— Литейн. пр-во, 1959, № 11, с. 37—54.
95. *Кайнарский И. С., Карякин Н. Г.* Кристаллизация кремнезема из газовой фазы.— Докл. АН СССР, 1952, 1, № 8, с. 86—94.
96. *Оболенцев Ф. Д.* Качество литых поверхностей.— М.; Л.: Машгиз, 1961.— 184 с.
97. *Клечко Ю. А., Купин Л. Л.* Объяснение влияния образования пригара при литье металлов.— Прикл. химия, 1949, № 19, с. 108—119.
98. *Борсук П. А.* Пригар на отливках из специальных сталей и методы его устранения.— Киев, 1958.— 23 с.— В надзаг.: УкрНИИмашиностроения.
99. *Черногоров А. В., Васин Ю. П.* Получение отливок с чистой поверхностью.— М.: Машгиз, 1961.— 144 с.
100. *Давиденков Н. Н.* Об остаточных напряжениях.— В кн.: Рентгенография в применении к исследованию материалов. М.: Машгиз, 1960.— 223 с.
101. *Смирнов Н. В.* Краткий курс математической статистики для технических приложений.— М.: Физматгиз, 1959.— 436 с.
102. *Митропольский А. К.* Техника статистических вычислений.— М.: Наука, 1971.— 576 с.
103. *Клейн Г. К.* Строительная механика сыпучих тел.— М.: Госстройиздат, 1956.— 252 с.
104. *Кныпп Э.* Пороки отливок: Причины образования пороков и меры их устранения: Пер. с нем.— М.: Машгиз, 1958.— 276 с.
105. *Салли И. В.* Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения.— Киев: Наук. думка, 1972.— 136 с.
106. *Кульман А. Г.* Общая химия.— М.: Сельхозгиз, 1961.— 567 с.
107. *Цибрик В. А.* Влияние литой поверхности на прочностные и износостойкие характеристики деталей машин.— В кн.: Литые износостойкие материалы. Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1975, с. 116—121.
108. *Бочвар А. А.* Металловедение.— М.: Metallurgizdat, 1956.— 495 с.
109. *Чертков Г. В.* Технология металлов.— Х.: ГОНТИ НКТП ДНТВУ, 1939.— 412 с.
110. *Weining H.* Der kürzeste Weg vom Rohstoff zum Festgrund Giesseneinvielseitiges.— Produktion, 1976, 44, N 4, S. 47—48.
111. *Droscha H.* Optimal Eisen—und Stahlverarbeitung durch Giessen. Kosteneinsparung und Leistungssteigerung durch fertigungs- und betriebserechte konstruktionen.— Wo-Maschinenfunk, 1967, 18, N 9, S. 13—17.
112. *Barker R. G.* Castings in general.— FWP Journal, 1972, 12, N 12, p. 21—25.
113. *Gießen oder Schweißen?*— Ind. Anz. 1971, 93, N 78, S. 1001.
114. *Stefanides F. J.* Redesign of assembly as casting cuts cost improves part.— Design News, 1968, 23, N 19, p. 100—101.
115. *Casting.*— Metal Progr., 1974, 105, N 3, p. 72—75.
116. *Mal A.* Contribution à une meilleure compréhension entre constructeur et fondeur lors du choix d'une fonte grise pour la construction mecanique.— Fonderie belge, 1972, 42, N 1, p. 15—21.
117. *Droscha H.* Konstruieren mit Gußwerkstoffen.— Giesserei, 1976, 63, N 1, p. 11—14, 2.
118. *Droscha H.* Konstruieren mit Gußwerkstoffen.— Giesserei, 1976, 63, N 2, p. 35—37, 2.
119. *Droscha H.* Konstruieren mit Gußwerkstoffen.— Ind. — Anr., 1957, 97, N 81, p. 1763—1765.
120. *Droscha H.* Fertigungs— und funktionsgerechte Gusskonstruktionen.— Technica (Suisse) 1975, 24, N 14, p. 1093—1099.
121. *Droscha H.* Rationell und preisgünstig Gußteile für die Container Technik.— Fordern and Heben, 1972, 22, N 4, p. 202—...

Введение (А. Н. Цибрик)	3
Глава I. Упрочнение поверхности литых деталей (В. А. Цибрик)	6
1. Основы поверхностного упрочнения	6
2. Аналитическое исследование параметров упрочняющего орнамента на литой поверхности	19
3. Распределение напряжений в отливках	31
Глава II. Формирование поверхностного слоя литых деталей (А. Н. Цибрик, М. И. Аверченков)	39
1. Зарождение центров кристаллизации и рост кристаллов	39
2. Отвод тепла при кристаллизации металла	55
3. Заполняемость форм жидким металлом	70
4. Питание фронта кристаллизации жидким металлом	80
Глава III. Строение поверхностного слоя литых деталей (В. А. Цибрик)	91
1. Параметры поверхностных дефектов	91
2. Микрогеометрия поверхности	115
Глава IV. Технологические основы получения деталей с литым орнаментом (В. А. Цибрик)	142
1. Способы изготовления литейных форм	142
2. Получение тонкостенных отливок с орнаментом	163
Список литературы	173

Алексей Николаевич Цибрик,
Михаил Иосифович Аверченков,
Валерий Алексеевич Цибрик

ОСНОВЫ СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО
УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

*Печатается по постановлению ученого совета
Института проблем литья АН УССР*

Редактор *Н. К. Сытник*
Редактор-библиограф *Л. Н. Яцута*
Оформление художника *В. Г. Самсонова*
Художественный редактор *И. В. Козий*
Технический редактор *Г. М. Терезюк*
Корректоры *Л. М. Тищенко, И. В. Точаненко*

Информ. бланк № 2631

Слано в набор 22.02.79 Подп. в печ. 26.07.79. БФ
00657. Формат 60×90/16. Бумага типогр. № 1.
Лит. гарн. Вис. печ. Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд.
л. 11,87. Тираж 1300 экз. Заказ 9-246. Цена 2 руб.

Издательство «Наукова думка», 252601, Киев,
ГСП, Репина, 3.
Киевская книжная типография научной книги
Республиканского производственного объединения
«Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, 252004,
Киев-4, Репина, 4.