



В.А. Коровин, И.О. Леушин

**Механизм
образования
и меры предотвращения
дефектов чугунных
и стальных отливок**

В.А. Коровин, И.О. Леушин

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ И МЕРЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЧУГУННЫХ И СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

*Допущено Учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 150100 — Металлургия*



МОСКВА

2013

УДК 331.4(075.8)
ББК 65.247я73
К68

Рецензент:

кандидат технических наук,
технический директор МПП «Солитус» *Р.Н. Палавин*

Коровин В.А., Леушин И.О.

К68 **Механизм образования и меры предотвращения дефектов чугуновых и стальных отливок : учебное пособие / В.А. Коровин, И.О. Леушин. — М. : ФОРУМ; НИЦ ИНФРА-М, 2013. — 112 с. — (Высшее образование. Бакалавриат).**

ISBN 978-5-91134-686-7 (ФОРУМ)

ISBN 978-5-16-006124-5 (НИЦ ИНФРА-М)

Рассмотрены основные причины происхождения пороков отливок, а также механизм их образования. Кроме того, проанализированы меры по устранению дефектов отливок. Пособие предназначено для студентов специальностей 150104 «Литейное производство черных и цветных металлов», 150204 «Машины и технология литейного производства».

УДК 331.4(075.8)
ББК 65.247я73

ISBN 978-5-91134-686-7 (ФОРУМ)

ISBN 978-5-16-006124-5 (НИЦ ИНФРА-М)

© Коровин В.А., Леушин И.О., 2013

© Издательство «ФОРУМ», 2013

Введение

Первостепенными задачами литейщиков являются повышение качества отливок и снижение потерь от брака, существенно удорожающих продукцию. Во многих отраслях машиностроения удельный вес брака литейных цехов в общей стоимости заводского брака составляет 40—45 % и выше.

Качество отливок зависит от множества факторов, связанных со сложными физико-химическими явлениями, сопровождающими процесс получения отливки. Отливка формируется под комплексным влиянием гидравлических, кристаллизационных, тепловых, усадочных и других процессов.

Условия для образования дефектов могут появиться на всех этапах производства, начиная с проектирования отливки. Особенно ответственным является этап проектирования технологического процесса. От правильного расположения отливки в форме, конструкции литниковой системы, наличия и расположения холодильников, прибылей и от других факторов зависят условия для направленной кристаллизации и получения плотного металла отливок. Существенное значение имеют правильно выбранные параметры технологического процесса: температура и скорость заливаемого металла, составы формовочных и стержневых смесей, режимы термообработки и т. д. Влияют на качество отливки уровень технологической дисциплины и профессионализм производственников (мастеров, формовщиков, стерженщиков, плавильщиков, заливщиков). В значительной степени качество отливок зависит и от качества исходных материалов (шихтовых, формовочных и др.).

Многообразие видов дефектов и причин, их вызывающих, создает сложноразрешимые проблемы даже для опытного специалиста-литейщика. Разнообразные дефекты могут быть вызваны одной и той же причиной, и, наоборот, разные причины приводят к образованию

того или иного дефекта. При разработке мер по предотвращению появления дефектов необходимо учитывать, что изменение условий формирования отливки с целью устранения одного дефекта может привести к образованию другого дефекта, поэтому для успешной борьбы с дефектами необходимо знать механизмы их образования, причины возникновения и меры их предупреждения.

В данном учебном пособии приводится систематизированное изложение этих вопросов применительно в основном к отливкам из черных сплавов, получаемых в песчано-глинистых формах, но, учитывая, что отливкам из разных сплавов в принципе свойственны одинаковые причины образования большинства дефектов, можно считать изложенные подходы к образованию дефектов общими для отливок из разных сплавов.

Глава 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВОК

Дефектом, согласно ГОСТу 15467—79, называют каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям. Изделие, имеющее хотя бы один дефект, является дефектным.

В зависимости от возможности обнаружения дефекты могут быть явными и скрытыми.

Явным дефектом считается дефект, обнаруженный при внешнем осмотре или с помощью соответствующих правил, методов и средств, предусмотренных нормативной документацией контроля. Например, расположенная внутри отливки газовая раковина может быть обнаружена каким-либо методом дефектоскопии, предусмотренным нормативной документацией (например, радиационным или ультразвуковым методами).

Скрытым дефектом называется дефект, выявляемый методами, не предусмотренными нормативной документацией. Та же газовая раковина, расположенная внутри отливки, будет скрытым дефектом, если в нормативной документации предусмотрен только визуальный контроль и не предусмотрены другие методы.

В зависимости от возможности использования продукции по назначению дефекты делятся на критические, значительные и малозначительные.

Критический дефект — это дефект, при наличии которого использование отливки по назначению практически невозможно или недопустимо (например, наличие трещины в отливке ответственного назначения может вызвать аварийную ситуацию).

Значительным дефектом является дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность, но не является критическим.

Малозначительный дефект существенно не влияет на использование продукции по назначению и ее долговечность.

В зависимости от возможности устранения дефекта различают устранимые и неустраняемые дефекты.

Устранимым дефектом является дефект, устранение которого технически возможно и экономически целесообразно.

Если устранение дефекта технически невозможно или экономически нецелесообразно, то он является **неустраняемым дефектом**.

Приведенная классификация дефектов необходима для персонала службы технического контроля при решении вопросов приемки готовых отливок. Однако она совершенно не отражает внешних признаков дефектов, причин и механизмов их образования. Этим принципам отвечают две основные системы классификации:

1) по общности физических и физико-химических явлений, в результате которых возникают те или иные дефекты (например, дефекты усадочного происхождения);

2) по внешним признакам дефекта в соответствии с ГОСТом 19200—80.

Следует заметить, что этот ГОСТ в определении понятия дефекта содержит кроме его внешних признаков, как правило, основное физико-химическое или другое явление, приводящее к образованию дефекта.

Далее рассматривается классификация дефектов отливок в соответствии с ГОСТом 19200—80, устанавливающим термины и определения основных понятий дефектов отливок из чугуна и стали. Данный ГОСТ содержит стандартизованные термины, обязательные для применения в документации всех видов, и приводит недопустимые к применению термины-синонимы, широко распространенные на производстве и встречающиеся в технической литературе. Недопустимые к применению термины обозначены в стандарте и в пособии «ндп».

В ГОСТ 19200—80 включены 50 видов дефектов (каждый дефект в ГОСТе имеет определенный номер (с 1 по 50)). Дефекты по своим внешним признакам объединены в пять групп:

- I. Несоответствие по геометрии.
- II. Дефекты поверхности.
- III. Несплошности в теле отливки.
- VI. Включения.
- V. Несоответствие по структуре.

Глава 2

ДЕФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С НЕСООТВЕТСТВИЕМ ПО ГЕОМЕТРИИ

В группу «*Несоответствие по геометрии*» входят 14 видов дефектов, ведущих к нарушению формы, неточности размеров и массы отливок.

2.1. Недолив и неслитина

Недолив (ндп.: *стек*) — неполное образование отливки вследствие незаполнения полости формы металлом при заливке. Образуется в местах, наиболее удаленных от места подвода металла в полость формы, в тонких стенках отливки.

Неслитина (ндп.: *неспай*) — дефект в виде произвольной формы отверстия или сквозной щели в стенке отливки, образовавшийся вследствие неслияния потоков металла из-за пониженной жидкотекучести при заливке.

Недолив может быть двух типов: истинный недолив полости формы металлом или частичное вытекание металла из формы после ее заполнения (рис. 1).

Дефекты первого типа расположены обычно в наиболее удаленных от питателя частях отливки и характерны для тонкостенных отливок сложной конфигурации. Они образуются при заливке металла с недостаточной жидкотекучестью.

Для дефектов второго типа характерна незаполненная часть отливки в виде полости, ограниченной тонкими стенками с острыми краями. Полости расположены в массивных частях отливки, затвердевающих в последнюю очередь. Вытекание металла может произой-



Рис. 1. Недолив: *а* и *в* — недолив в результате недостаточной жидкотекучести (холодный металл); *б* — недолив вследствие частичного вытекания металла из залитой формы

ти через некоторое время после заливки формы, особенно если металл был сильно перегрет.

Недолив легко определяется визуально после очистки отливок от формовочной смеси, при этом нетрудно увидеть место вытекания металла.

Если при заполнении формы встречные потоки металла, поступающие из различных литников или частей формы, не сольются, то на отливке образуется произвольной формы щель. Этот дефект называется *неслитиной* (рис. 2).

Оба дефекта обусловлены низкой жидкотекучестью металла или неудачной конструкцией литниковой системы.



Рис. 2. Неслитина

Жидкотекучесть определяет способность металлов и сплавов в расплавленном состоянии заполнять полость формы и точно воспроизводить очертания отливки. Течение металла и сплава только под статическим напором продолжается до тех пор, пока его температура не достигнет так называемой температуры нулевой жидкотекучести. Нулевая жидкотекучесть сплава наступает при температуре, лежащей в интервале ликвидус—солидус, в момент, когда вязкость резко возрастает вследствие образования определенного количества твердой фазы. Жидкотекучесть λ , мм, определяется длиной пути, который проходит жидкий металл в стандартных технологических пробах:

$$\lambda = V \cdot \tau,$$

где V — средняя скорость течения металла по каналу пробы, мм/с;

τ — время течения металла до момента достижения им температуры нулевой жидкотекучести $t_{н.ж}$ (температуры начала линейной усадки $T_{н.л.у}$), с;

$t_{н.ж}(t_{н.л.у})$ — температура, лежащая между ликвидусом и солидусом, при которой образуется непрерывная твердая фаза и металл теряет способность течь.

Различают жидкотекучесть истинную, определяемую при постоянном перегреве сплавов при температуре нулевой жидкотекучести, практическую — при постоянной температуре заливки и условно-истинную — при одинаковом перегреве над температурами ликвидуса.

Для оценки жидкотекучести Ю.А. Нехендзи предложил следующее эмпирическое соотношение:

$$\lambda = A_p \frac{c(t_3 - t_{н.ж}) + mL}{(t_m - t_{\phi})},$$

где A — постоянная величина, характеризующая условия теплоотвода от металла в форму;

ρ — плотность сплава;

C — удельная теплоемкость сплава;

t_3 — температура заливки металла;

t_m — температура металла в форме;

t_{ϕ} — температура формы;

L — скрытая теплота кристаллизации сплава;

m — относительное количество закристаллизовавшегося сплава при $t_{н.ж}$.

При обработке технологии получения сложных отливок может быть определено минимальное значение жидкотекучести, при которой еще можно получить годную отливку.

Природа жидкотекучести очень сложна и зависит от многих факторов, которые можно разделить на три группы.

1. Свойства и строение металлов и сплавов в жидком состоянии (особенность кристаллизации и строения образующейся твердой фазы, вязкость, поверхностное натяжение, наличие примесей и др.).

2. Свойства формы (теплопроводность, шероховатость поверхности, газопроницаемость и др.).

3. Условия заливки.

Рассмотрим эти факторы. Известна определенная связь между жидкотекучестью и характером кристаллизации. Вещество в температурном интервале кристаллизации может быть в двух состояниях: жидко-твердом и твердо-жидком. Установлено, что при интенсивном развитии дендритной кристаллизации потеря жидкотекучести наступает даже при незначительном количестве твердой фазы. Количество твердой фазы, при котором наступает нулевая жидкотекучесть, зависит от строения и размеров первичных кристаллов. В обычных условиях заливки нулевая жидкотекучесть стали и чугуна наступает соответственно при содержании 20 и 30 % твердой фазы. В связи с тем, что жидкотекучесть в интервале от температуры ликвидуса до температуры нулевой жидкотекучести очень мала, заполнение формы металлом в этом интервале температур практически невозможно, особенно сталью и доэвтектическим чугуном.

Чистые металлы и большинство эвтектических сплавов затвердевают с резко очерченным фронтом кристаллизации и характеризуются лучшей жидкотекучестью, чем сплавы, образующие твердый раствор и кристаллизующиеся в интервале температур.

Повышение температуры заливки увеличивает жидкотекучесть всех сплавов, поэтому перед заливкой их перегревают.

На рис. 3 показана линия нулевой жидкотекучести (штрихпунктирная) в зависимости от состава (углеродного эквивалента) железо-углеродистых сплавов. Линия $A-B-C$ — линия ликвидуса, линия $A-H-J-E-C$ — линия солидуса. *Повышение температуры заливки увеличивает жидкотекучесть всех сплавов, поэтому перед заливкой их перегревают. Рекомендуемые температуры заливаемых сплавов на рисунке показаны штриховыми линиями.*

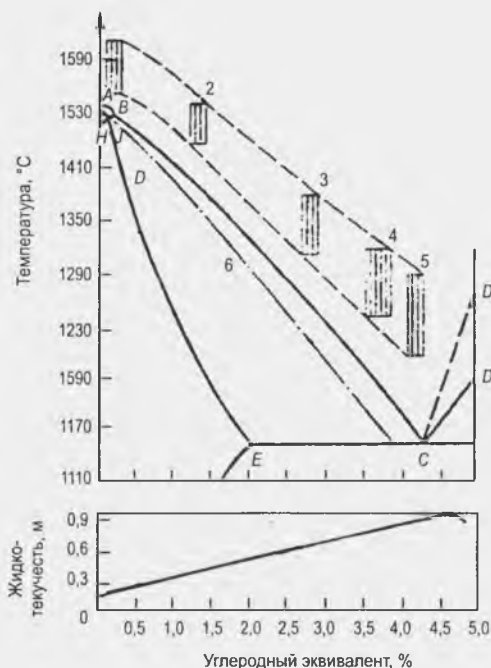


Рис. 3. Влияние состава железоуглеродистых сплавов на их жидкотекучесть и рекомендуемые температуры заливки сплавов:

1 — углеродистая сталь; 2 — графитизированная сталь; 3 — ковкий чугун; 4 — модифицированный серый чугун; 5 — серый чугун; 6 — нулевая жидкотекучесть

Чем тоньше стенка, тем выше должен быть перегрев для обеспечения заполняемости формы. В табл. 1 приведены практические данные о рекомендуемых температурах заливки для чугуна и стали при различных толщинах стенок отливок.

Таблица 1. Рекомендуемая температура заливки чугуна и стали, °C

Толщина стенки, мм	Серый чугун	Ковкий чугун	Среднеуглеродистая сталь
До 5	1350—1450	1380—1480	—
5—10	1340—1430	1360—1450	1540—1580
10—20	1320—1400	1350—1430	1540—1550
20—50	1300—1380	—	1530—1540
50—100	1230—1340	—	1520—1530

На жидкотекучесть оказывает влияние химический состав сплава. Жидкотекучесть чугуна возрастает с увеличением содержания кремния, фосфора и особенно углерода, достигая при этом максимума в эвтектических чугунах.

Влияние этих элементов с достаточной для практики точностью можно определить по уравнению углеродного эквивалента:

$$C_{\text{экв}} = C + 0,331 + 0,5P.$$

Фосфор образует легкоплавкие фосфидные эвтектики, уменьшает поверхностное натяжение и вязкость. Большое значение имеет повышенное содержание фосфора (до 1—1,5 %) для художественного литья. Сера и марганец в отдельности слабо влияют на жидкотекучесть, но образуемый ими сульфид марганца сильно понижает жидкотекучесть серого чугуна. Еще меньше жидкотекучесть белого чугуна.

Наличие в металлах и сплавах примесей может в одних случаях ухудшать жидкотекучесть, а в других — улучшать.

Присутствие во всех сплавах легкоплавких эвтектик улучшает жидкотекучесть, а присутствие в алюминиевом сплаве незначительного количества железа, кремния и титана значительно ее ухудшает.

Присутствие газов в металле, ведущее к образованию оксидов и нитридов, повышает вязкость чугуна и стали и снижает жидкотекучесть.

На жидкотекучесть влияет состав смеси формы, ее теплопроводность и шероховатость поверхности, по которой течет металл. Жидкотекучесть улучшается при гладкой поверхности литейной формы и уменьшении ее теплопроводности. Высокая влажность смеси (6—7 %) снижает жидкотекучесть, так как интенсивное парообразование затрудняет движение жидкого металла.

Для цветных сплавов рекомендуются следующие температуры заливки: латуни — 1050—1100 °С; бронзы — 1100—1200 °С; алюминиевые сплавы — 670—750 °С; магниевые сплавы — 710—770 °С.

Следует помнить, что применение повышенной температуры заливаемого сплава сопряжено с определенными трудностями. Например, высокая температура заливки стали требует изготовления формы из высокоогнеупорных материалов, иначе возможен брак по механическому и химическому пригару. Кроме того, с увеличением температуры увеличивается склонность к образованию в отливках усадочных и газовых раковин и ряда других дефектов.

Жидкотекучесть и вязкость не являются идентичными понятиями. Сама по себе высокая вязкость не мешает заполнению формы

(например, весьма вязкий алебастр хорошо заполняет форму). Экспериментально установлено, что жидкотекучесть зависит от вязкости в меньшей мере, чем от интервала кристаллизации сплава.

Способность сплавов заполнять формы связана также с поверхностным натяжением. Чем больше поверхностное натяжение, тем меньшей жидкотекучестью обладает сплав. Значение поверхностного натяжения проявляется в большей степени, чем тоньше полость формы. Однако его влияние перекрывается наличием на поверхности металла окисных пленок, значительно снижающих жидкотекучесть. Разрушить окисные пленки можно химическим путем. Например, при литье чугуна обрызгивание рабочей поверхности формы нефтью или керосином создает при их разложении восстановительную атмосферу в форме.

Добавка угольного порошка, уменьшающего трение между металлом и формой, повышает жидкотекучесть.

Недостаточная вентиляция формы может создать противодействие в полости формы и ухудшить жидкотекучесть. В этих случаях необходимо устраивать выпоры на выступающих частях отливки.

На жидкотекучесть влияют факторы, связанные с процессом заливки жидкого металла. В литейных подогретых ковшах температура жидкого металла понижается со скоростью $3\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в минуту в зависимости от типа и емкости ковша. В холодных или недостаточно подогретых ковшах скорость охлаждения металла увеличивается на 30 % и более.

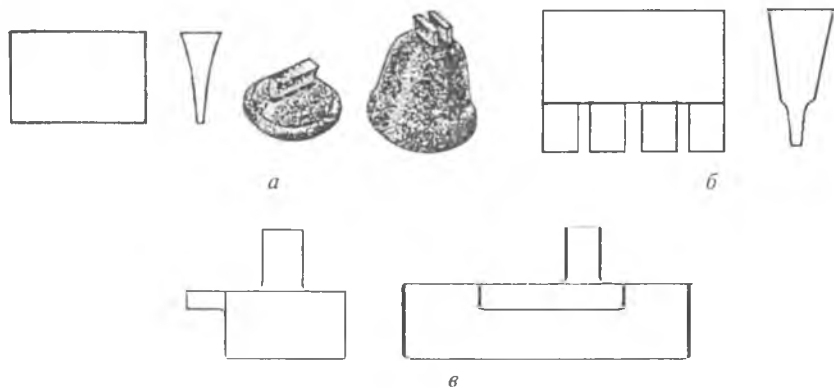


Рис. 4. Клиновидные (а, б) и шелевые (в) питатели

Большое значение для получения бездефектных отливок имеет **литниковая система**. Необходимо обеспечить быстрое заполнение формы металлом, особенно для тонкостенных отливок. С этой целью литниковую систему выполняют с сечением на 10—20 % больше расчетного. Если этих мер недостаточно, то используют клинообразные питатели (рис. 4, а, б). Таким способом заливают ванны, котлы и тому подобные тонкостенные изделия. Хорошие результаты получаются при использовании боковых щелевых питателей для плоских тонкостенных стальных отливок (рис. 4, в).

Таким образом, повышение жидкотекучести сплава за счет указанных выше факторов, выбор правильной конструкции литниковой системы, обеспечение необходимой температуры заливаемого металла способствуют предупреждению образования недоливов и неслитин.

2.2. Обжим

Обжим (ндр.: *выдав формы*) — местное нарушение конфигурации отливки вследствие деформации формы из-за механических воздействий до или во время заливки.

Наиболее вероятна возможность деформации формы при установке стержней и при сборке. Так, при установке тяжелого стержня (рис. 5, а) возможна деформация кромки «к» формы, т. е. образование

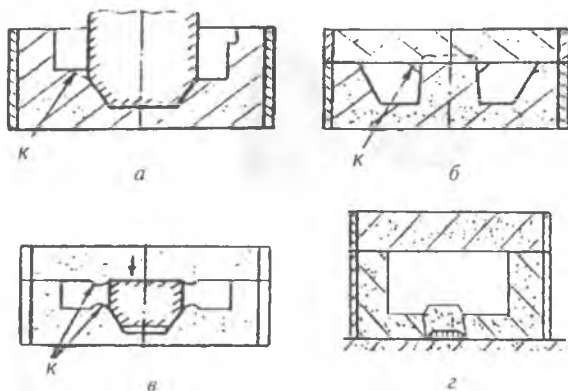


Рис. 5. Обжим и схемы его образования:

а — при установке стержня; б, в — при сборке; г — при заливке

в этом месте вмятины без осыпания смеси. При заливке металла на отливке образуется прилив, конфигурация которого определяется конфигурацией деформированной части формы. Причиной дефекта может являться и неаккуратная установка стержня, и недостаточная прочность формы. На рис. 5, б показана деформация части «к» формы при сборке. Она может возникнуть при неточно изготовленной модельной оснастке, при недостаточной жесткости и короблении опок и модельных плит.

При несоответствии знаковых частей формы и стержня возможны деформация формы и соответственно образование обжима по схеме рис. 5, в.

Форма может деформироваться от внешних воздействий и во время заливки, когда к деформации приводит увеличивающаяся нагрузка от заливаемого металла (рис. 5, г). Такое явление возможно, когда при недостаточной толщине слоя формовочной смеси между основанием нижней полуформы и стенкой отливки нижнюю полуформу устанавливают на постель, приготовленную на месте заливки из слоя формовочной смеси.

2.3. Подутость

Подутость (ндрп.: *раздутие, распор*) — местное утолщение отливки, возникающее из-за распираания неравномерно или недостаточно уплотненной песчаной формы заливаемым металлом.

Подутость возникает при большом металлостатическом давлении (рис. 6).

Отливка считается дефектной, если изменение геометрии превышает допустимые отклонения толщины стенки отливки. Дефект обнаруживается визуально после очистки отливки. Наиболее частыми при-

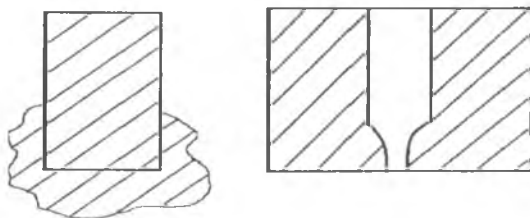


Рис. 6. Подутость

чинами подутости являются: малая прочность формовочной смеси, недостаточное ее уплотнение и большое давление жидкого металла.

Давление металла на форму при литье некоторых сплавов (серый чугун, модифицированный и чугун с шаровидным графитом) увеличивается в результате предусадочного расширения металла при графитизации.

Равномерность уплотнения формы зависит от метода ее уплотнения и текучести смеси. Главным недостатком форм, полученных верхним прессованием плоской колодкой, является низкая плотность смеси в местах сопряжения вертикальных стенок модели с модельной плитой, у нижней части и в карманах модели. Применение нижнего прессования сглаживает этот недостаток. Большая равномерность уплотнения достигается при применении профильных прессовых плит и при многоплунжерном прессовании. При постоянных условиях прессования формы, изготовленные из более текучих смесей, уплотняются более равномерно по сравнению с формами из смесей с меньшей текучестью. При встряхивании недоуплотненными оказываются верхние слои формы. Устранить этот недостаток можно при использовании встряхивания с подпрессовкой.

Форма может деформироваться при избыточном содержании влаги. При заливке металла в сырые формы выделяющиеся с поверхности водяные пары конденсируются в холодной зоне формы, отстоящей на некотором расстоянии от ее рабочей поверхности. Эта зона имеет малую прочность и может деформироваться под давлением металла.

При использовании самотвердеющих смесей подутость возможна при заливке формы до их полного затвердевания.

Для уменьшения вероятности образования подутости необходимо помимо учета приведенных соображений уменьшать, по возможности, металлостатический напор.

2.4. Перекос, стержневой перекос

Перекос (ндр.: *сдвиг*) — смещение одной части отливки относительно осей или поверхностей другой части по разьему формы, модели или опок вследствие их неточной установки и фиксации при формовке и сборке.

Перекос может быть на внешней части отливки и во внутренней полости (рис. 7).

Отливку бракуют, если перекося больше припуска на механическую обработку и дефект виден после очистки отливки.

Стержневой перекося (ндп.: *стержневой сдвиг*) смещение отверстия, полости или части отливки, выполняемое с помощью стержня, вследствие его перекося.

Если отверстие, полость или часть отливки, выполняемые с помощью стержня, смещены вследствие перекося стержня, то такой дефект называется **стержневым перекосям** (рис. 8).

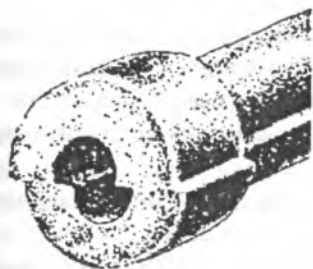


Рис. 7. Перекося

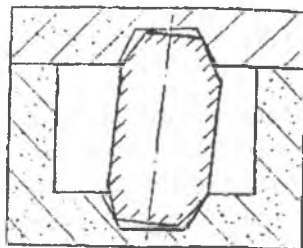


Рис. 8. Стержневой перекося

Причинами перекося могут быть неточный монтаж на подмодельных плитах моделей верха и низа, неправильно спроектированная опорная часть стержня, смещение знаковых частей в полуформах.

Существенное значение имеет состояние фиксирующих втулок и штырей в опоках и на модельных плитах. Повышенный износ фиксирующих элементов может привести к взаимному смещению полуформ.

Для предотвращения сдвига опок при транспортировке к месту заливки не следует извлекать фиксирующие штыри. Причиной появления перекося во внутренней полости может быть неправильное центрирование половинок стержневых ящиков.

Устранение названных причин предотвратит появление перекося.

2.5. Разностенность

Разностенность (ндп.: *смещение стержня*) — увеличение или уменьшение толщины отливки вследствие смещения, деформации или всплывания стержня.

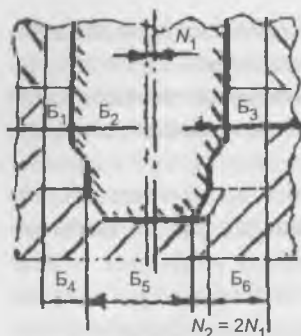


Рис. 9. Разностенность

Разностенность — литейный дефект, при котором размеры отливки не соответствуют размерам, указанным в документации (рис. 9).

Первая группа причин — неисправность модельно-стержневой оснастки. Размеры моделей и стержневых ящиков изменяются в процессе эксплуатации.

Вторая группа причин — деформации форм и стержней.

Смещение стержня возможно за счет зазора в знаковых частях формы и стержня, а также при отсутствии фиксаторов.

Деформация стержня и его искривление могут произойти при сушке, транспортировке и заливке.

Третья группа причин — неодинаковая усадка чугуна и различное увеличение объема отливок, наблюдаемое при отжиге.

Существует зависимость величины литейной усадки от толщины стенок отливки, и усадка уменьшается с ростом толщины стенок.

При отжиге в результате процесса графитизации чугуна происходит расширение отливки. Этому способствуют кремний и, в особенности, сера. С повышением содержания углерода в чугуне происходит увеличение объема при отжиге, так как углерод способствует графитизации. Происходящее при отжиге увеличение объема в большой степени зависит от толщины стенок отливки. Этим определяется и общая величина усадки. Тонкостенные отливки при отжиге уменьшаются в объеме вследствие сильного обезуглероживания; в отливках, имеющих средние толщины стенок, одновременно происходит обезуглероживание и образование углерода отжига, в результате чего усадка и увеличение объема компенсируют друг друга; с увеличением толщины стенок растет и увеличение объема. Причем в такой степени, что происшедшее при усадке уменьшение размеров отливки вновь компенсируется, поэтому обычно применяемая для отливок из ковкого чугуна усадка, равная 2 %, соответствует лишь отливкам с определенной толщиной стенок. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при изготовлении моделей. Увеличение объема черносердечного ковкого чугуна в зависимости от исходного содержания углерода может быть настолько большим, что превзойдет даже величину усадки чугуна, поэтому одни и те же модели не всегда

могут быть применимы для черносердечного и белосердечного чугуна.

Правильно разработанная технология, а также ее соблюдение при изготовлении, сушке, транспортировке стержней и при сборке формы позволяют предотвратить получение разностенных отливок.

2.6. Стержневой залив

Стержневой залив (ндр.: *непроставленный стержень*) — дефект в виде залитых металлом отверстия или полости в отливке из-за непроставленного в литейной форме стержня или его обрушения.

Обрушение стержня при его недостаточной прочности может произойти при сборке формы, а также при заливке под воздействием струи металла из-за неправильной конструкции литниковой системы. В случае обрушения стержня стержневой залив сопровождается возникновением другого дефекта — песчаной раковины. Правильный подбор состава формовочной и стержневой смесей, достаточное уплотнение форм и стержней, рассредоточенный подвод металла с направлением питателей вдоль стержня и снижение линейной скорости движения потока жидкого сплава способствуют предотвращению появления залива.

Залив — металлический нарост на теле отливки, возникающий в результате проникновения металла в зазоры по разъемам формы, стержней или по стержневым знакам.

Заливы затрудняют очистку отливок, а в некоторых случаях приводят к браку. Отбив заливов может привести к трещинам в отливке.

Большие заливы получаются при сильной деформации формы в процессе ее изготовления.

2.7. Коробление

Коробление (ндр.: *прогиб*) — искажение конфигурации отливки под влиянием напряжений, возникающих при охлаждении отливки, а также в результате неправильной модели.

При охлаждении отливки различные ее части охлаждаются с различной скоростью, что приводит к неравномерной усадке и возникновению внутренних напряжений. Если возникающие напряжения

превышают предел упругости, то в отливке происходят пластические деформации, приводящие к ее короблению. Неравномерность охлаждения вызывается различными условиями отвода тепла от элементов отливки, образующих единую связанную систему. Особенно часто подвергаются короблению отливки большой длины и со стенками неодинакового сечения.

Наиболее существенной причиной коробления (искажения конфигурации) отливок в литейной форме являются неравномерные температурные деформации отдельных частей отливок, а также последствия действия факторов, связанных с возникновением термических, фазовых и усадочных (механических) напряжений и их релаксаций за счет пластической деформации.

Применительно к короблению прямоугольного бруса, концы которого не закреплены, а продольные волокна претерпевают только упругие деформации, можно записать:

$$P = \frac{1}{\alpha_l \varphi},$$

где P — радиус кривизны отливки;

α — коэффициент линейной усадки сплава;

φ — градиент температур по сечению отливки;

$$f = \frac{l^2}{8P} = \frac{\alpha_l \varphi l^2}{8},$$

где f — стрела прогиба;

l — длина бруса.

При прочих равных условиях прогиб бруса будет тем больше, чем больше разность температур по высоте, что в конечном итоге можно связать с разновременностью протекания линейной усадки в интервале $t_{н.л.у} - t_{к.у}$.

Если воспользоваться понятием термического (теплового) момента M_T , при приложении которого брус искривляется так же, как и при неравномерном нагреве, то:

$$f = \frac{M_T l^2}{8EJ},$$

где E — модуль упругости сплава;

J — момент инерции поперечного сечения бруса относительно соответствующей оси.

Одной из основных причин коробления отливок является развитие пластических деформаций и соответствующая релаксация остаточных напряжений.

Соппротивление формы и стержней влияет на коробление отливки в той же мере, в какой это сопротивление вызывают неравномерные пластические деформации в отливке при ее охлаждении после затвердевания. Происходящая при релаксации напряжений пластическая деформация вызывает одновременно снижение уровня действующих в отливке напряжений и повышение релаксационной стойкости металла, чтобы устранить релаксацию необходимо либо уменьшить действующие напряжения, либо повысить сопротивление сплава пластическому деформированию, т. е. повысить его релаксационную стойкость. По величине сохранившихся остаточных напряжений нельзя судить о возможности дальнейшей их релаксации. Все зависит от релаксационной стойкости сплава в данный момент, которая, в свою очередь, определяется силовыми, температурными и другими факторами, воздействующими на отливку. Чем выше уровень сходных литейных напряжений, тем больше пластическая деформация сплава к моменту их стабилизации, а следовательно, больше изменение размеров отливки.

При получении отливок из сплавов, в которых имеются структурные составляющие, играющие роль концентраторов напряжений (например, из графитизирующих чугунов, где включения графита являются концентраторами локальных напряжений), пластические деформации, вызывающие коробление отливок, происходят главным образом из-за релаксации остаточных напряжений в местах их концентрации у включений, т. е. пиковых напряжений, а не из-за релаксации средних по уровню напряжений первого рода, уравнивающих их в пределах микроскопических объемов.

На рис. 10, *а* изображен брус с толстым поперечным сечением в верхней части и тонким — в нижней. Вследствие более быстрого охлаждения усадка в нижней части бруса закончится раньше, чем в верхней. В этом случае усадка верхней части затрудняется, и напряжения от затрудненной усадки изгибают нижнюю часть. Крупногабаритные отливки длиной 8—10 м (например, станины станков) могут деформироваться с образованием стрелы прогиба 20—30 мм.

Склонны к деформации отливки с протяженными горизонтальными плоскостями (плиты, крышки и т. д., рис. 10, *а, б*). Охлаждение начинается с краев плиты, и скорость охлаждения по направлению к

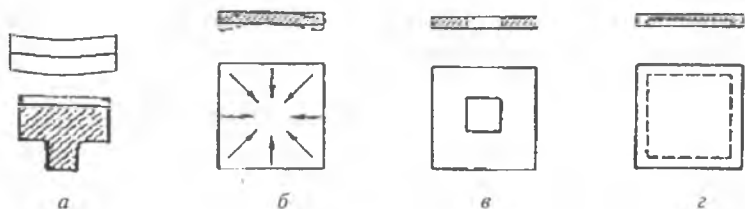


Рис. 10. Коробление отливок:

а — коробление бруса; *б* — коробление плиты; *в, г* — варианты устранения коробления

центру уменьшается. Когда усадка с внешней стороны закончится, в центре она еще продолжается. Следствием этого может быть коробление плиты. Выполнение отверстия в середине плиты (рис. 10, *в*) или утолщение края плиты (рис. 10, *г*) могут предотвратить коробление.

При преждевременной выбивке увеличиваются скорость охлаждения и температурный перепад в различных частях отливки. Это может способствовать увеличению деформаций и короблению. Отливки, особо склонные к деформации, рекомендуется охлаждать в форме до температуры 50—100 °С и ниже. Большой температурный перепад в отливке может вызвать и неправильно расположенная литниковая система. Длинные плоские детали следует отливать с размещением питателей с обеих сторон (рис. 11). Тангенциальный подвод металла в отливке круглой формы позволяет выравнивать температуру во всех частях отливки из-за активного перемешивания металла.

Наиболее эффективными средствами борьбы с короблением отливок в процессе охлаждения являются: снижение уровня исходных литейных напряжений; применение моделей с обратным прогибом; использование жестких форм, но без элементов, тормозящих усадку; нагружение форм с целью повышения их жесткости и др.

Недостаточная податливость форм и стержней затрудняет усадку металла, в результате чего возникают значительные внутренние напряжения. При механической обработке нарушается равновесное на-

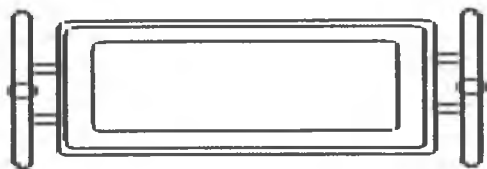


Рис. 11. Расположение питателей для предотвращения коробления

пряженное состояние между внутренними и наружными частями отливки, что может привести к короблению.

Деформация может возникнуть при термической обработке отливок, неправильно уложенных на поддоны. При высокой температуре металл становится пластичным и может деформироваться под действием собственной силы тяжести. Деформации могут возникнуть и при охлаждении отливок с высокой скоростью.

В тех случаях, когда можно ожидать образования коробления, применяют модели с обратным прогибом. Величина обратного прогиба зависит от большого числа неизвестных, и на основе практических данных ее можно приблизительно определить как отношение половины длины к средней толщине стенки.

Существуют различные методы стабилизации размеров отливок. Например, естественное старение, вибрационная и дробеметная обработки чугунных отливок обеспечивают стабилизацию размеров за счет снижения максимальных (пиковых) значений напряжений в местах их концентрации и упрочнения металла на этих участках (местное повышение уровня напряжений до предела текучести и их релаксация). При низкотемпературном отжиге из-за повышения пластичности металлической основы снижается уровень напряжений первого рода, так что они не способны деформировать металл даже при его низкой релаксационной стойкости. Остаточные напряжения в любом сечении отливки всегда взаимно уравниваются. Всякое изменение в одном месте вызывает их перераспределение во всем объеме отливки до наступления нового состояния равновесия. Перераспределение остаточных напряжений происходит под действием возникающих в каком-либо сечении отливки неуравновешенных сил и моментов, причем величина деформации отливки, необходимой для наступления нового положения равновесия, тем больше, чем большими оказались неуравновешенные силы и моменты:

$$N_1 = (P_1 - P_2) \int_{F_1} \sigma_0 dF;$$

$$M_1 = (P_1 - P_2) \int_{F_1} \sigma_0 r dF,$$

где N_1 и M_1 — соответственно неуравновешенные силы и моменты, возникающие в результате релаксации напряжений и стремящиеся

деформировать отливку так, чтобы в ней опять наступило состояние равновесия;

P_1 и P_2 — степень изменения остаточных напряжений в сечениях F_1 и F_2 отливки в результате их релаксации;

σ_0 — исходные остаточные напряжения, возникающие в сечении отливки площадью $F = F_1 + F_2$; r — расстояние элемента dF от произвольной оси, лежащей в плоскости поперечного сечения отливки.

Следовательно, не сам факт релаксации остаточных напряжений, а разная степень их релаксации $\Delta P = (P_1 - P_2)$ приводит к возникновению в поперечном сечении неуравновешенных сил и моментов, а следовательно, к короблению отливок.

Наиболее действенной мерой устранения остаточных напряжений является *отжиг* отливок. Для его осуществления необходимо нагреть отливку до температуры, при которой металл приобретает достаточно высокую пластичность, выдержать его при такой температуре до тех пор, пока напряжения не снизятся до допустимой величины, и медленно охладить отливку, чтобы не вызвать новых напряжений. Для стальных отливок обычно достаточна выдержка при температуре не менее 650 °С в течение 2—3 ч. Чугунные отливки для снятия остаточных внутренних напряжений отжигают при температурах 500—600 °С в течение 3—10 ч в зависимости от толщины стенок. Скорость охлаждения отливок с печью обычно составляет 6—12 град/ч. Температура выгрузки из печи 250—300 °С.

Отливки станины для точных станков подвергают естественному старению, т. е. выдержке в течение нескольких месяцев на складе.

Отливки и готовые литые детали могут подвергаться короблению также в процессе эксплуатации готовых изделий.

Следующее объяснение Э. Дипшляг дает образованию пригара формовочного песка на отливке. Во время заливки формы поверхностные слои жидкого металла воспринимают кислород, который затем растворяется, взаимодействует с кремнием и углеродом, а его избыток выделяется при охлаждении.

Таким образом, на поверхности отливки образуется переходный слой окислов из FeO и Fe_2O_3 , который, взаимодействуя с кварцем формовочной смеси, образует силикат закиси железа и затем вновь растворяет SiO_2 и Fe_2O_3 . Благодаря нейтральной атмосфере, образующейся в результате восстановительной способности содержащегося в формовочных чернилах углерода, пригар песка предупреждается. Углероду в формовочных материалах уделяется особенное внимание.

Ввиду того, что пыль в формовочном песке лете взаимодействует с закисью железа, она, как и щелочные составные части смеси, ухудшает стойкость формы против пригара. Благодаря переходному слою в корке отливки образуется значительная пористость, которая может привести к возникновению тонких трещин.

2.8. Незалив

Незалив (нпд.: *нечеткость контура*) — несоответствие конфигурации отливки чертежу вследствие износа модели или недостаточной отделки формы.

В связи с похожестью звучания терминов «недолив» и «незалив» авторы считают необходимым отметить совершенно разную суть этих дефектов. Если недолив представляет собой неполное образование отливки вследствие незаполнения литейной формы металлом при заливке, то *незалив* — это дефект в виде несоответствия конфигурации отливки чертежу из-за износа модели и недостаточной отделки формы (рис. 12).

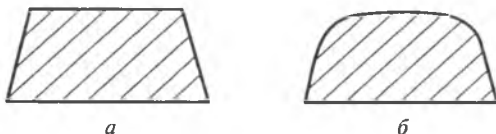


Рис. 12. Незалив:

a — отливка без дефекта; *б* — отливка с незаливом

На рис. 12, *a* показана отливка с необходимой конфигурацией, на рис. 12, *б* — отливка с незаливом, полученная по изношенной в углах модели. Своевременный контроль моделей и тщательная отделка формы позволяют избежать образования незалива.

2.9. Зарез

Зарез (нпд.: *заруб*) — дефект в виде искажения контура отливки при отрезке литников, обрубке и зачистке. Основной причиной образования дефекта является небрежная обрезка литниковой системы и зачистка на отливке места подвода металла.

Одним из главных условий, устраняющим повреждение отливки, является соблюдение основных правил отрезки литников и зачистки отливок.

2.10. Вылом

Вылом (нпд.: *выбоина, скол*) — нарушение конфигурации и размеров отливки при выбивке, обрубке, отбивке литников и прибылей, очистке и транспортировании.

Основными причинами вылома отливок являются неправильная или небрежная загрузка отливок в очистные барабаны, большая высота падения отливок на выбивную решетку или транспортные приспособления, а также затрудненная отбивка литников и прибылей.

Существенное значение для предотвращения вылома металла в отливках имеет правильный выбор необходимого оборудования для очистки литья, а также полная загрузка очистных барабанов, исключение совместной загрузки тонкостенных и тяжелых отливок и уменьшение высоты падения отливок.

Правильно разработанная технология, а при необходимости изменения конструкции литниковой системы за счет уменьшения толщины питателей, сечения основания прибылей, применение легкоотделяемых прибылей, предварительная подрубка и подрезка литниковой системы позволяют предотвратить вылом отливки.

2.11. Прорыв металла

Прорыв металла (нпд.: *прорыв в форме*) — дефект в виде неполного образования или неправильной формы отливки, возникающий при заливке вследствие недостаточной прочности формы.

При недостаточной прочности формы возможно ее растрескивание и продавливание под воздействием силы тяжести залитого металла. В прорванную форму устремляется жидкий металл, в результате чего получается неполное образование отливки (рис. 13). Этот дефект называется *прорывом металла*. Прочность на разрыв смесей для машинной формовки и для автоматических линий следует поддерживать в пределах $(0,15—0,35) \cdot 10^5 \text{ Па}$ [8].

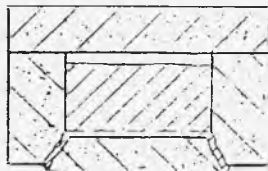
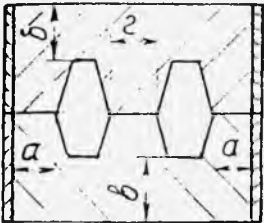


Рис. 13. Прорыв металла

Существенное значение для предотвращения прорыва металла имеет правильный выбор необходимых расстояний между моделями и стенками опок, а также между моделями и верхними и нижними кромками опок. Эти расстояния должны быть достаточными, чтобы обеспечить сопротивление формы продавливанию заливаемым металлом (табл. 2).

Таблица 2. Данные для определения размеров опок

	Масса отливки	Размеры, мм			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>z</i>
Мелкие		20—30	35—60	50—75	0,5 от высоты модели в полуформе
Средние		50—75	75—100	100—125	
Крупные		125—175	150—200	175—200	—

2.12. Уход металла

Уход металла (нпд.: *подъем формы, стек*) — дефект в виде пустоты в теле отливки, ограниченной тонкой коркой затвердевшего металла, образовавшейся из-за вытекания металла из формы при слабом ее креплении.

При слабом креплении форм возможно вытекание металла в зазор между ними. Если в момент ухода металла успела образоваться тонкая корочка затвердевшего металла, то в теле отливки возникает пустота (рис. 14). Эта пустота, образовавшаяся вследствие вытекания металла из-за слабого крепления форм, представляет дефект, называемый *уходом металла*.

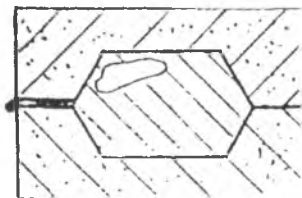


Рис. 14. Уход металла

Этот дефект сопровождается образованием другого дефекта — залива. Если залив можно устранить, то образование пустоты является, как правило, неустранимым дефектом.

Одним из главных условий, устраняющим уход металла из формы, является правильный выбор массы груза, устанавливаемого на форму. Усилие P , возникающее в форме и поднимающее ее верхнюю половину при заливке металлом, определяется по формуле:

$$P = FN\gamma_m + V(\gamma_m + \gamma_c),$$

где P — площадь проекции поперечного сечения полости формы на плоскость разъема, м^2 ;

H — высота металла от нижней части полости формы до зеркала металла в литниковой чаше, м ;

V — объем полости формы, м^3 ;

γ_m, γ_c — удельный вес соответственно металла и стержневой смеси, Н/м^3 .

Сила тяжести груза G_0 должна быть больше разности значений подъемной силы P и силы тяжести верхней полуформы G_n , т. е. $G_0 > P - G_n$.

При заполнении формы металлом возможен гидравлический удар, поэтому груз выбирают так, чтобы $G_{\text{гр}} = (1,3 \dots 1,5)G_0$.

Уходу металла способствует использование *деформированных опок и модельных плит*.

Глава 3

ДЕФЕКТЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВКИ

В группу «*Дефекты поверхности*» входит 13 различных дефектов, ведущих к ухудшению качества поверхности.

3.1. Пригар

Пригар (ндр.: *металлизация*) — трудно отделяемый специфический слой на поверхности отливки, образовавшийся при физическом и химическом взаимодействии формовочного материала с металлом и его окислами.

Пригаром называют слой на поверхности отливки, состоящий из оплавившихся частиц формовочных материалов, пропитанных основным сплавом, окислами его компонентов и продуктами их взаимодействия с составляющими формовочной смеси. Этот слой прочно удерживается на поверхности отливки, и толщина слоя достигает 30—40 мм.

В зависимости от характера соединения зерен формовочной и стержневой смесей пригар делят на механический, химический и термический (рис. 15).

Механический пригар представляет собой слой формовочной или стержневой смеси, скрепленный проникшим между зернами металлом. Зерна смеси, как в сотах, включены в затвердевшей корке металла.

При *химическом пригаре* зерна песка связаны продуктами реакций, протекающих между металлом и материалом формы.



Рис. 15. Пригар

При *термическом пригаре* зерна песка соединены в монолитную массу легкоплавкими соединениями, образующимися в результате реакций между компонентами смеси.

Термический пригар слабо связан с поверхностью отливки. Часто термический пригар образуется над слоем механического или химического пригара.

Разделение пригара на механический и химический до известной степени условно, и ряд исследователей считают его комплексным, рассматривая механическое и химическое взаимодействия металла с материалом формы как две стадии образования пригара.

Образование пригара обусловлено проникновением сплава в поры формы под действием капиллярных сил и давления металла на стенки формы. Проникновение расплава в поры формы является первой стадией процесса образования пригара, а второй его стадией является химическое взаимодействие окислов металла, содержащихся в расплаве (окислов железа и легирующих элементов), и окислов, содержащихся в формовочных материалах. Химическое взаимодействие расплава и формы усиливает проникновение металла в поры формы.

3.1.1. Механический пригар

Наиболее трудно отделим от отливки механический пригар. Согласно теории, жидкий металл проникает в поры формы в результате действия капиллярных сил и металлостатического давления.

Величина капиллярных сил определяется поверхностным натяжением расплавленного металла на границе металл—форма и зависит от смачивания металлом зерен формовочной смеси.

На глубину проникновения металла влияют также вязкость расплавленного металла, размер пор между зернами песка, давление газа в этих порах и время, в течение которого металл находится в расплавленном состоянии.

Согласно закону Пуазейля, глубину проникновения металла (l , мм) можно приблизительно определить по формуле:

$$l = \sqrt{(\tau/\eta)(H\gamma + (2\sigma/r) \cos \alpha p_{\text{газ}})},$$

где σ — поверхностное натяжение расплавленного металла на границе металл—форма, Н/м;

α — угол смачивания зерен песка жидким металлом;
 η — вязкость жидкого металла, Па·с;
 r — средний размер пор между зернами, м;
 τ — время, в течение которого металл в порах остается в жидком состоянии, с;

$p_{\text{газ}}$ — давление газа в порах формы, Па;

H — высота столба жидкого металла, м;

γ — удельный вес металла, Н/м³.

Рассмотрим влияние перечисленных факторов. При угле смачивания меньше 90 °С металл смачивает форму, проникает в ее поры тем активнее, чем меньше угол смачивания. При угле смачивания больше 90 °С металл перестает смачивать зерна песка и может проникнуть в поры только под действием металлоостатического давления, величина которого должна быть значительно больше величины, фактически получаемой в форме.

Чем меньше поверхностное натяжение, тем интенсивнее металл проникает в поры формы. С увеличением содержания углерода поверхностное натяжение уменьшается. Сера, фосфор и, в меньшей степени, кремний также уменьшают поверхностное натяжение.

Резко снижается поверхностное натяжение в чугунах и сталях, содержащих кислород. Окисленная сталь хорошо смачивает применяемые формовочные материалы и образует механический пригар. Вначале сплав окисляется кислородом воздуха, затем окисление продолжается в форме от паров воды и двуокиси углерода. Даже при введении в смесь специальных восстановительных добавок атмосферы на границе металл—форма спустя 30—60 с после заливки остается окислительной по отношению к железу и только потом переходит в восстановительную. Этого времени достаточно для окисления металла. Полученные оксиды реагируют с глиной смеси, что приводит к увеличению размеров пор и проникновению в них металла.

Большое влияние на пригар оказывает высота столба жидкого металла. С этой точки зрения, плоскость разреза желательно выбирать так, чтобы высота столба жидкого металла была минимальной.

Глубина проникновения металла зависит от размеров пор между зернами песка. На размеры пор влияют зернистость песка, степень уплотнения смеси и другие факторы. Размер пор увеличивается с ростом размеров зерен. При одинаковом уплотнении механический пригар уменьшается с применением мелкозернистых песков. Для од-

нородных песков размер пор можно с достаточной точностью рассчитать по формуле:

$$r = 0,154R,$$

где r — приведенный радиус пор, мм;

R — радиус шарообразного зерна, мм.

Пригар можно уменьшить, применяя рассредоточенные пески или добавляя в смесь пылевидные составляющие.

Когда огнеупорность смеси низка, нагреваемые зерна спекаются в отдельные конгломераты, и пористость форм увеличивается. В этих случаях металл проникает в форму на большую глубину.

Толщина пригара зависит также от вязкости жидкого металла, которая существенно зависит от температуры металла и содержания углерода. Наибольшая глубина проникновения металла в поры формы достигается при заливке эвтектических чугунов, так как при понижении температуры они кристаллизуются без выделения первичной фазы и долго сохраняют жидкотекучесть. Доэвтектические чугуны кристаллизуются с выделением первичного аустенита, повышающего вязкость расплава, и поэтому жидкотекучесть в интервале температуры кристаллизации таких чугунов уменьшается.

Вязкость железоуглеродистых сплавов уменьшается с повышением температуры разливки.

На величину пригара влияет продолжительность затвердевания металла в форме. Чем дольше жидкий металл соприкасается с формой, тем значительнее пригар. Это время сокращается с увеличением теплоемкости и теплопроводности слоя смеси, соприкасающегося с металлом.

На глубину проникновения влияют газы, находящиеся в порах формы. При заливке давление газов увеличивается вследствие их расширения, и растет противодействие проникновению металла в поры, поэтому в смесь целесообразно вводить добавки, выделяющие при разложении газы.

3.1.2. Химический пригар

Химический пригар встречается чаще. Он, как правило, образует корки большей толщины по сравнению с механическим, но сила сцепления его с металлом отливки незначительна.

Металлы и сплавы, за редким исключением, не способны к непосредственным реакциям со специально подобранными для них формовочными материалами, однако окислы этих металлов взаимодействуют с компонентами смеси.

При литье чугуна и некоторых других сплавов в состав формовочных смесей вводят углеродосодержащие добавки, создающие восстановительную атмосферу и препятствующие образованию окислов.

При изготовлении стальных отливок поверхностный слой металла окисляется с образованием FeO . Оксид железа, реагируя с SiO_2 , образует силикаты железа переменного состава $n\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, значительную часть которых составляет фаялит $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$. В случае присутствия в песке флюсующих минералов (слюды, полевого шпата и др.), содержащих оксиды щелочных и щелочно-земельных металлов (Na_2O , MgO , K_2O , CaO), образуются силикаты сложного состава, имеющие сравнительно низкую температуру плавления (иногда ниже 1000°C) и способствующие увеличению химического пригара. Легкоплавкие жидкие силикаты проникают в поры формы. Под действием высокой температуры жидкие силикаты сначала оплавливают (отшлаковывают) мелкие зерна песка и частицы глины, образуя новые поры, в которые проникает металл. После этого оплавливаются также более крупные зерна, увеличиваются размеры пор, и металл глубже проникает в форму. На рис. 16 представлен механизм образования пригара. Процесс пропитывания заканчивается там, где движущаяся жидкость

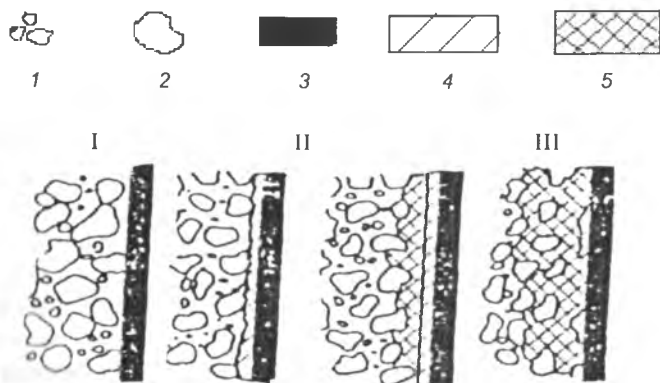


Рис. 16. Образование химического пригара на поверхности стальной отливки:
1 — глина; 2 — песок; 3 — сталь; 4 — окислы железа; 5 — силикаты железа

встречает слой формы, не нагретый до температуры плавления этой жидкости.

Особенно активно образуется пригар при повышенном содержании марганца в стали, так как марганцовистые силикаты легкоплавки, имеют высокую жидкотекучесть, хорошо смачивают зерна песка и легко проникают в поры формы. Отливки из высоколегированной хромом и никелем стали получают с незначительным пригаром, так как такие стали не склонны к окислению, а полученные оксиды хрома не вступают в реакцию с материалом формы.

Таким образом, рассмотрев механизм образования химического пригара, можно заключить, что при изготовлении чугунных отливок трудно получить легкоотделимый пригар. Поэтому необходимо принимать меры по его предотвращению.

Необходимо вводить в формовочную смесь добавки, при разложении которых образуется восстановительная атмосфера, или окрашивать стержни и формы. При отливке стальных заготовок пригар можно предотвратить или дать возможность образоваться легкоотделимому пригару. Для получения легкоотделимого пригара необходимо создать условия для интенсивного окисления металла отливки.

3.1.3. Способы предотвращения пригара

Для предотвращения механического проникновения расплава в поры формы необходимо, чтобы давление расплава было меньше критического и температура на поверхности формы была ниже температуры затвердевания сплава.

На основании причин образования механического пригара можно назвать следующие меры его предотвращения.

1. Для уменьшения смачивания формы жидким металлом необходимо:

- уменьшить окисление металла при плавке;
- ограничить окисление металла при его заливке в форму; этого можно достичь, добавляя в форму углеродосодержащие добавки или окрашивая ее красками, содержащими графит или коксовую пыль, в процессе их сгорания в форме образуется восстановительная атмосфера, со снижением влажности формы уменьшается окисление стали;
- ограничить содержание серы в металле;

- использовать формовочные материалы, не смачиваемые жидким металлом.

Такими материалами являются химически инертные цирконовые пески.

2. Для уменьшения давления жидкого металла на стенки формы рекомендуется:

- отливать высокие детали в горизонтальном положении;
- уменьшить высоту прибылей;
- уменьшить силу удара струи жидкого металла;
- уменьшить давление, создаваемое газовыми выделениями в полости формы, установкой достаточного количества выпоров.

3. Уменьшение пористости в форме и стержне можно достичь следующими способами:

- уменьшить зернистость песка;
- использовать рассредоточенный песок;
- ввести в смесь пылевидные материалы: кварцевые, шамотные и цирконовые;
- увеличить скорость уплотнения формы и стержня;
- предотвратить появление трещин в форме;
- нанести на поверхность формы или стержня противопопригарные покрытия (цирконовые, хромомагнетитовые краски).

4. Для сокращения времени нахождения металла в форме в жидком состоянии необходимо:

- использовать облицовочные смеси с высокой теплопроводностью (по сравнению с кварцево-глинистой формой теплопроводность хромитовой в 5—7 раз выше, цирконовой — в 1,2 раза; магнезита при нормальной температуре — в 5—6 раз выше теплопроводности кварца, а при температуре 1200 °С их теплопроводности сравниваются; хромомагнетит занимает промежуточное значение между хромитом и магнезитом);
- создать искусственный теплопровод за счет газоотводных каналов (размещать их как можно ближе к полости формы);
- снизить температуру заливки металла;
- изменить, по возможности, конструкцию тепловых узлов (наибольший пригар получается на X- и Y-образных образцах).

Для предотвращения интенсивности химической стадии образования пригара следует прежде всего уменьшать окисленность расплава. Для уменьшения окисленности до попадания расплава в полость формы и в процессе заливки следует: тщательно его раскислять;

уменьшать контакт расплава с атмосферой; вводить в состав формовочных смесей специальные органические добавки, способствующие созданию в форме восстановительной атмосферы, которая должна создаваться с момента попадания в нее первых порций расплавленного металла и сохраняться до окончания процесса взаимодействия окислов металла и формы.

В связи с тем, что получить массивную стальную отливку без пригара весьма затруднительно, нужно стремиться к получению легкоотделимого пригара. Прочность соединения химического пригара с отливкой зависит от структуры пригара: чем больше толщина слоя окислов между отливкой и формой, тем легче удаляется пригар. Легкоотделимым является пригар и в том случае, если его структура является аморфно-стекловидной. Такая хрупкая структура формируется при больших скоростях охлаждения.

Для получения легкоотделимого пригара на стальных отливках можно использовать следующие способы:

- применять в смеси добавки окислительного действия: оксиды железа (магнетит Fe_3O_4 и гематит Fe_2O_3), марганцевую руду, хлориды металла и т. д.;
- использовать противопопригарные краски окислительного действия, содержащие хлориды металла (MnCl_2 и CaCl_2);
- извлекать отливки из формы сразу после их затвердевания (при быстром охлаждении отливки слой фаялита разрушается вследствие разного теплового расширения и легко отделяется от отливки);
- применять огнеупорные противопопригарные покрытия.

3.2. Спай

Спай (ндр.: *неспай*) — углубление с закругленными краями на поверхности отливки, образованное не полностью слившимися потоками металла с недостаточной температурой или прерванными при заливке.

Спай возникает, главным образом, на тонких стенках отливки или на удаленных от питателя частях отливки (рис. 17).

Основными причинами образования спаев являются:

- пониженная жидкотекучесть сплава;
- недостаточная температура металла, заливаемого в формы;

- конструкция литниковой системы;
- нарушение технологического процесса заливки.

Температура заливаемого металла определяется в каждом отдельном случае опытным путем и зависит от рода сплава и толщины стенки отливки. Ни в коем случае нельзя допускать понижения температуры, установленной технологическим процессом. Необходимо учитывать, что вероятность образования спая увеличивается при использовании смеси с высокой теплоаккумулирующей способностью. Спай часто наблюдается при литье в кокили. При нагреве кокилей свыше $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ дефекты от спая уменьшаются.

Конструкция литниковой системы существенно влияет на образование спаев. Размеры литниковой системы должны быть такими, чтобы обеспечить быструю заливку формы. Конструкция литниковой системы должна, по возможности, исключить встречные потоки металла, особенно в тонких стенках отливки. Установка в форме достаточного количества выпоров уменьшает давление газов в полости формы и увеличивает скорость заливки. Литниковая система должна обеспечить определенный напор, особенно при изготовлении сложных тонкостенных отливок.

Нарушение технологии заливки металла может привести к образованию спаев. При заливке с прерывистой струей спайи могут образоваться и на толстых стенках отливки.

Если глубина спая меньше припуска на механическую обработку, то отливка считается годной.

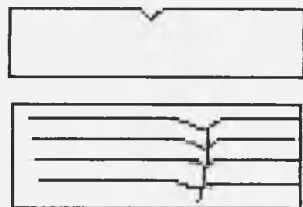


Рис. 17. Спай (схематическое изображение)

3.3. Ужимина

Ужимина (ндр.: *рвотина*) — углубление с пологими краями, заполненное формовочной смесью и прикрытое слоем металла, образовавшееся вследствие отслоения формовочной смеси при тепловом расширении поверхностного слоя формы.

Образуется вследствие отслоения формовочной смеси при заливке до получения корочки твердого металла на поверхности отливки.

После обрубki вскрываются углубления, заполненные формовочным материалом, легко удаляющимся при очистке.

В зависимости от условия образования может иметь вид неглубокой вытянутой канавки или впадины, тонкого плоского выступа и плоского, неправильной формы нароста, сопровождающихся песочными включениями.

Если ужимина отделяется от стенки формы и уносится потоком металла в отливку, то в отливке возникает два потока: неровное грубое возвышение в месте возникновения ужимины, а также пораженное песком углубление, обнаруживаемое в том месте, куда будет перемещена корка формовочного материала.

Однако часто последняя не полностью отделяется от стенки формы, а лишь выпучивается, затем лопається, вследствие чего в этом месте в поверхности отливки образуется углубление. Металл по трещинам протекает за отделившуюся поверхностную корку формовочного материала, в результате чего она, частично окруженная металлом, будет прочно держаться на поверхности отливки. Вместе с тем, наличие ужимин приводит к более высоким расходам по очистке отливок, они могут быть причиной брака, если углубления окажутся слишком большими.

Можно выделить следующие группы основных причин образования ужимин:

- тепловые напряжения в поверхностном слое при заливке жидким металлом;
- малая прочность смеси в зоне конденсации влаги и малая пластичность нагреваемого слоя формы;
- давление газов на стенки формы, развиваемое под влиянием температуры заливки.

Зерна кварца при нагревании расширяются, а глина и другие твердые связующие сжимаются, одновременно ближе расположенные к залитому металлу слои смеси уже перестали расширяться, а в некоторых случаях даже сжимаются, более глубоко лежащие слои еще продолжают расширяться и вдавливают наружные слои в металл.

Наибольшее расширение формовочного песка отмечается при температуре 600 °С. Оно составляет 0,1—0,2 мм при длине измерения 50 мм. Превращение β-кварца в α-кварц при температуре 575 °С связано с большим линейным расширением. Песок сначала расширяется незначительно, при температуре 575 °С более сильно, а затем начинает сжиматься. Расширение способствует уплотнению поверхности

формы, что вызывает снижение ее газопроницаемости. Уплотнение может быть настолько сильным, что песок вздувается, и поверхность формы расширяется. Металл затекает в трещины, и образуются ужи-мины. Для смесей из синтетических песков с органическими связую-щими материалами при нагревании характерны менее высокие на-пряжения на поверхности формы, чем для песчано-глинистых смесей. Это объясняется тем, что связующий материал, сгорая, освобождает зернам кварца объем, необходимый для их расширения. Вместо квар-ца можно применять тридимит, который мало расширяется до темпе-ратуры 600 °С. Тридимит может быть изготовлен путем обжига кварца при температуре 1500 °С. Бесспорно, что в образовании ужимин уча-ствуют также газы, образовавшиеся в стенках формы, причем первый газовый удар, возникающий при заливке, имеет решающее значение.

На вертикальной стенке отливки из серого чугуна высотой около 1 м лишь тогда образуются ужины, когда эта стенка формы была плохо просушена или хорошо просушенная форма долгое время ожи-дала заливки и поглотила определенное количество влаги. Наиболь-шая опасность образования ужимин существует в начальной стадии заливки формы, когда образуется первая газовая волна, а давление, создаваемое воздухом и металлом, еще незначительное.

В действительности все три явления участвуют в образовании ужимин.

Рассмотрим более подробно указанные ранее причины и способы предотвращения ужимин.

П е р в а я г р у п п а причин связана с интенсивным нагревом по-верхности формы и тепловым расширением различных формовочных материалов.

Температура поверхностного слоя формы при заливке зависит от температуры заливаемого металла, продолжительности воздействия теплового излучения расплава и степени черноты поверхности формы (рис. 18).

Теплота от заливаемого металла передается стенкам формы излу-чением. Согласно закону Стефана — Больцмана излучающая способ-ность E (Вт/м) любого тела пропорциональна температуре в четвер-той степени, т. е.:

$$E = c(T/100)^4,$$

где c — коэффициент излучения расплава;

T — абсолютная температура, К.

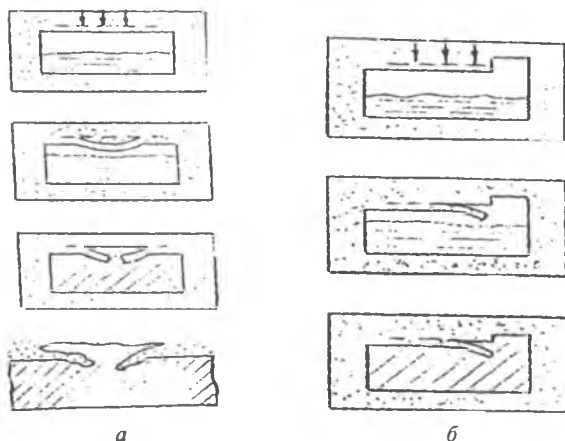


Рис. 18. Ужимина и схемы ее образования:

а — на плоской горизонтальной поверхности; *б* — в угловой части отливки

При увеличении температуры заливки чугуна с 1250 до 1490 °С количество теплоты, передаваемой излучением форме, возрастает в два раза.

Продолжительность воздействия теплового излучения на поверхность формы зависит от скорости заливки, конструкции литниковой системы и расположения отливки в форме. Формы необходимо заливать с максимально допустимой скоростью, особенно при литье отливок с большими поверхностями. У некоторых некачественных смесей (в основном, в связи с низким качеством бентонита) дефекты образуются спустя 3—4 с после начала заливки металла. Система питателей должна обеспечить равномерную заливку формы. Металл желательно подводить к вертикальным стенкам, заполнив которые он мог бы затем быстро покрыть присоединенные к ним горизонтальные плоскости. Плоские отливки желательно заливать в вертикальном или наклонном положении.

Количество лучистой энергии, поглощенной формой, зависит от степени черноты формовочной смеси. Облицовочные смеси, используемые для литья чугунных отливок, содержат добавки, придающие им черный цвет. В отличие от них смеси, применяемые для стального литья, не содержат таких компонентов и имеют меньшую степень черноты, т. е. они светлее, поэтому, несмотря на более высокую температуру заливки, стальные отливки меньше подвержены ужиминам, чем чугунные. Хороший эффект дает окрашивание форм специаль-

ными противопопригарными красками светлого оттенка, уменьшающими аккумуляцию лучистой тепловой энергии. Особенно эффективно применение специальных диатомитовых красок, в которых сочетаются отражательная способность с высокими теплоизоляционными свойствами. Влияние этих красок на время образования ужимин в процессе заливки приведено в табл. 3.

Таблица 3. Влияние красок на время образования ужимин

Тип противопопригарной краски	Время, с
Графитная	37
Графитная с добавлением 20 % диатомита	45
Графитная с добавлением 50 % диатомита	101
Цирконовая	42
Цирконовая с добавлением 20 % диатомита	52
Цирконовая с добавлением 50 % диатомита	104

Теплоту, поглощаемую верхней полуформой, можно значительно уменьшить, если покрыть ее поверхность алюминиевой фольгой.

Важным фактором, влияющим на образование ужимин, является коэффициент линейного расширения составляющих формовочной смеси. Он различен для свежего материала и для подвергнутого в дальнейшем нагреву. Наибольшее увеличение объема кварца происходит при температуре 573 °С. Если смесь многократно используется, то часть зерен превращается в тридимит, имеющий минимальное расширение. Глина при нагревании шамотизируется, что сопровождается ее усадкой и, следовательно, уменьшением расширения смеси. На коэффициент линейного расширения помимо свойств составляющих смеси оказывает существенное влияние «возраст» смеси. По мере оборота смеси происходит покрытие кварцевых зерен оболочкой, состоящей из спекшейся глины и продуктов разложения угля, т. е. песок солитизируется, вследствие чего зерна меньше расширяются. Но со временем кварцевые зерна растрескиваются, появляется много пыли, форма очень сильно уплотняется, и вероятность образования ужимин увеличивается.

Следовательно, как свежая, так и очень старая смеси не дают хороших результатов. Оптимальное содержание солитированного песка около 4 %.

Поэтому для борьбы с ужиминами применяют для сырых форм малорасширяющуюся отработанную смесь и вводят в нее органические добавки: древесный уголь, мазут и др., которые, сгорая, оставляют пространство для расширения зерен. Форму, по возможности, набивают неплотно.

Компенсировать расширение слоя формы, склонного к отслоению, можно с помощью нанесения на поверхность форм противужимной сетки. Эти риски делят поверхность формы на отдельные части, каждая из которых может расширяться без отслоения корочки смеси.

Вторая группа причин, влияющих на образование ужимин, связана с прочностью формовочной смеси и ее податливостью.

Помимо прочности на срез и разрыв, существенное влияние оказывает прочность смеси в зоне конденсации влаги, которую называют *мокрой прочностью*. Более высокой мокрой прочностью обладают натриевые бентониты, но они трудно выбиваются из опок и применяются редко. Поэтому в смеси для сырых форм вводят кальциевый бентонит, обработанный содой. Мокрая прочность возрастает с увеличением содержания в смеси активной глины, количество которой в оборотной смеси должно составлять около 8 %.

Таким образом, смесь необходимо периодически освежать введением глины. Количество неактивной (шамотизированной) глины в смеси должно превышать 7 %.

Для уменьшения влаги в конденсационной зоне, уменьшающей мокрую прочность смеси в этой зоне, рекомендуется поддерживать влажность смеси в пределах 2,8—3,2 %. В хорошо высушенных по всему объему формах ужимины почти не возникают.

Чрезмерное уплотнение формы увеличивает напряжение в поверхностном слое и уменьшает его податливость. Пластичность нагреваемого слоя можно повысить при использовании бентонита с низкой температурой размягчения (натриевого бентонита) и введении в смесь различных добавок (древесная стружка, торфяная крошка, каменноугольная пыль, древесный пек и др.). Эти добавки, выгорая или расплавляясь, образуют полости, позволяющие компенсировать расширение смеси.

Третья группа причин связана с повышением давления в толще формы, способствующим отслоению пересушенного слоя смеси. Для устранения этих причин необходимо:

- понижать газотворную способность формы;

- увеличивать газопроницаемость смеси, не допуская ее переуплотнения;
- обеспечивать эффективную вентиляцию формы наколами.

Кроме перечисленных мер по предотвращению ужимин рекомендуется также проशीпливание наиболее сильно прогреваемых частей формы, глубина которого должна обеспечить проникновение сквозь предполагаемую зону конденсации влаги.

3.4. Нарост

Нарост (идп.: *размыв, подрыв*) — выступ произвольной формы, образовавшийся из загрязненного формовочными материалами металла вследствие местного разрушения литейной формы.

Наросты образуются на поверхности отливки и состоят из металла, загрязненного формовочными материалами. Они имеют произвольную форму, соответствующую участку поврежденной формы или стержня. Обычно нарост сопровождается образованием песчаных включений в отливке (рис. 19).

Дефект виден после очистки отливки.

Появление нароста может сопровождаться образованием песчаных раковин и насоров.

Общая причина образования наростов — **разрушение литейной формы**. Основными причинами разрушения формы являются недостаточная прочность формовочных и стержневых смесей, неравномерное и слабое уплотнение форм и стержней, неудовлетворительное состояние рабочей поверхности моделей, приводящее к задирам в форме, повреждение формы при сборке. Форма может также разрушаться под воздействием тепловых напряжений.

Причиной образования нароста может быть литниковая система, если ее конструкция приводит к размыванию формы или стержня струей металла.

При переувлажнении формовочной смеси и низкой газопроницаемости возможно «кипение» металла в форме под действием бурно выделяющихся газов. Это явление также может привести к раз-

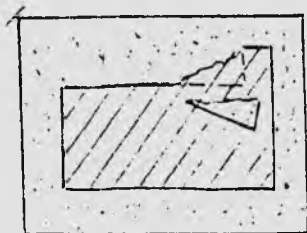


Рис. 19. Нарост (схема его образования)

рушению формы и образованию наростов. Устранение влияния указанных факторов способствует предотвращению образования наростов.

3.5. Залив

Залив (ндп.: *облой*) — тонкий выступ, возникающий при проникновении жидкого металла в зазоры по разъемам формы, стержней или стержневым знакам.

Залив представляет собой металлический выступ или прилив произвольной формы на теле отливки. Заливы располагаются по разъему формы или в зазорах между ее частями при проникновении в эти зазоры жидкого металла (см. рис. 13). Удаление заливов трудно поддается механизации и требует больших затрат тяжелого ручного труда.

Проникновение металла в зазоры определяется комплексом технологических факторов и свойств, связанных, с одной стороны, с заполняемостью отливки» и с толщиной зазора — с другой стороны.

Заполняемость, а следовательно, величина заливов возрастает с увеличением жидкотекучести металла при повышении его температуры при заливке, снижении содержания влаги в смеси, увеличении скорости подъема зеркала металла (при этом быстрее увеличивается величина давления жидкого металла в месте зазора).

Модельный комплект должен обеспечивать технологические зазоры между частями формы не более 1,5 мм для мелких отливок и 2,5—3 мм для крупных (свыше 3000 кг).

В местах разъема увеличение зазоров и, следовательно, образование заливов происходит из-за неплотного прилегания верхней и нижней полуформ. Причиной этого могут быть неисправности модельных плит (прогиб, коробление, непараллельность плоскостей и т. п.), неудовлетворительное состояние опок (коробление, загрязнение лада, втулок и штырей, трещины и т. п.), некачественное крепление форм перед заливкой, недостаточная величина груза, применение при сборке формы толстой промазки.

К возникновению **зазоров** по разъему может привести высокая деформация смесей при прессовании.

Заливы в местах зазоров между отдельными частями формы образуются при недопустимой разнице размеров знаковых частей фор-

мы и стержня, вследствие излишнего расталкивания моделей при извлечении ее из формы, из-за деформации стержней при транспортировке.

Основные меры по предупреждению образования заливов сводятся к своевременному контролю состояния модельно-опочной оснастки, строгому соблюдению утвержденного технологического процесса изготовления формы. Следует отказаться от прокладки глины по рапему и вместо глины применять асбестовые шнуры, пропитанные масляными связующими.

3.6. Засор

Засор (нпн.: *намыв*) — дефект в виде формовочного материала, внедрившегося в поверхностные слои отливки, захваченного потоками жидкого металла.

Формовочный материал, захваченный потоками жидкого металла и внедрившийся в поверхностные слои отливки, образует дефект, называемый засором (рис. 20).

Внедрение в отливку отдельных частиц формовочного материала является следствием одновременного действия двух неблагоприятных факторов: низкой поверхностной прочности, а также сил, способных оторвать слабосвязанные с формой частицы от общей массы.

Низкая поверхностная прочность формы обычно связана с нарушением установленного технологического процесса. Например, если от момента приготовления влажной разовой формы до ее заливки проходит много времени, то поверхностный слой формы высыхает, что вызывает разрыв связей между поверхностными зернами песка и между наружными и внутренними слоями формы. При использовании сухих песчано-глинистых форм большое значение имеет правильный выбор режима сушки. В частности, очень быстрое охлаждение горячих высушенных форм, благодаря их низкой теплопроводности, приводит к большому температурному градиенту по сечению и к возникновению значительных термических напряжений, вызывающих растрескивание поверхностного слоя формы.

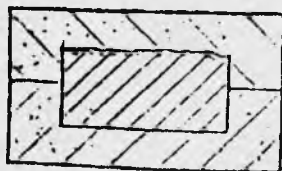


Рис. 20. Засор поверхностного слоя формы

К силам, вызывающим отрыв от формы или стержня слабо связанных с ними частиц, относятся силы, возникающие при движении в форме потока металла. При конструировании формы следует избегать удара струи металла в ее стенки; струя должна поступать в рабочую полость формы по касательной к ее поверхности. Иногда металл в форму целесообразно подавать через несколько каналов, так как стенки единственного канала очень прогреваются, прочность его поверхности падает, и силы трения, возникающие при движении потока, смывают отдельные зерна песка.

Для предотвращения засоров необходимо правильно сконструировать литниковую систему, обеспечить достаточную поверхностную прочность формы при ее изготовлении, хранении и использовании, тщательно очистить полость формы, строго соблюдать технологический процесс.

3.7. Плена

Плена (ндрп.: *заплеск*) — самостоятельный металлический или окисный слой на поверхности отливки, образовавшийся при недостаточно спокойной заливке.

При взаимодействии расплава с атмосферой образуются окислы, причем некоторые из них в сплавах не растворяются и образуют тугоплавкие и плотные пленки (окислы алюминия, хрома, титана). Окисные пленки на поверхности расплава (рис. 21, *а*) при беспокойном поступлении его в форму разрушаются на гребне расплава (рис. 21, *б*). Вытекающий через разрушенную пленку расплав заливает смежные

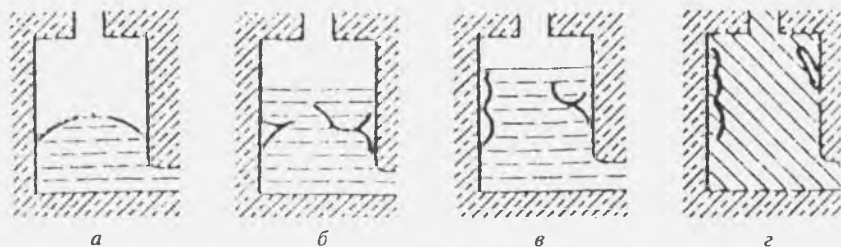


Рис. 21. Схема механизма образования пленки:

а — образование окисной пленки; *б* — разрыв пленки на гребне металла; *в* — прижатие пленки к поверхности формы; *г* — дефект

участки полости формы, а пленка частично или полностью остается на поверхности отливки (рис. 21, в). При большой длительности подъема сплава на его зеркале образуется твердая корочка, которая может быть и окисленной. При прорыве этой корочки по описанной выше схеме образуется пленка несварившегося металла с образованием неровной волнистой поверхности отливки.

Образование окисных плен наиболее характерно для высоколегированных специальных сталей и сплавов.

Увеличение склонности к образованию плен вызывают алюминий, хром, титан. Никель, кобальт, молибден, кремний и марганец, наоборот, понижают склонность сплава к образованию плен.

На образование в отливках плен существенно влияют температура расплава и атмосфера в полости формы.

При достаточно высоком перегреве плен не образуются.

В атмосфере форм с закрытыми прибылями процесс образования плен замедляется вследствие уменьшения количества кислорода.

При использовании открытых прибылей процесс пленообразования происходит более интенсивно.

Для предотвращения плен необходимо повышать температуру и скорость заливки. Подбором требуемой скорости заливки можно выводить плену в прибыльную часть. Литниковая система должна обеспечить спокойное заполнение формы. Один из способов уменьшения количества плен заключается в создании в форме активной восстановительной атмосферы путем введения в полость формы мазута, каменноугольной смолы и пека.

3.8. Просечка

Просечка (идп.: *заусенец, рубцы*) — невысокие прожилки на поверхности отливки, возникающие вследствие затекания металла в трещины на поверхности формы или стержня.

Трещины в форме или стержне могут возникнуть до заливки (при изготовлении, транспортировке, сборке) и во время заливки. Раскрывание формы может произойти вследствие малой жесткости опонок, которые деформируются в процессе уплотнения смеси и возвращаются в исходное состояние после снятия уплотняющей нагрузки; при плохо подготовленной постели под опоки. Трещины в форме могут появиться при неправильном режиме сушки (очень быстрый

нагрев при высокой температуре в начале просушки), из-за повышенных влажности смеси, содержания связующего. Трещины в оболочковой форме возникают во время снятия оболочки с модели из-за неправильно сконструированной или плохо отрегулированной толкательной системы. Нарушение режима сушки и прокаливании приводят к образованию трещин в оболочке при литье по выплавляемым моделям.

Растрескивание формы из-за термических напряжений, возникающих в ней под воздействием высокой температуры заливаемого металла, наиболее часто встречается в формах из самотвердеющих смесей с фурановыми, фенольными и другими смолами. Главная причина растрескивания — полиморфные превращения зерен песка, а также тип и количество связующего. Смесей с жидким стеклом довольно устойчивы к образованию трещин.

На образование просечки существенно влияет температура заливаемого металла. Чем меньше температура, тем меньше трещин возникает в форме.

Для борьбы с просечками кроме устранения причин, ведущих к образованию трещин в форме, применяют следующие меры. Если трещина в форме обнаружена до заливки, то ее заделывают специальной пастой или противопожарной краской. Уменьшить растрескивание формы в период заливки можно нанесением толстого слоя цирконовой краски или краски из смеси графита и циркона, хотя применение этих красок не гарантирует полного предотвращения просечек. Эффективным средством, устраняющим появление просечек, является добавление в смесь пылевидных железных оксидов. Они способствуют образованию силиката железа — фаялита $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, который заполняет трещины, образующиеся в форме или стержне во время их нагрева.

3.9. Окисление

Окисление (нп.п.: *пережег, рубашка*) — окисленный слой металла с поверхности отливки, получившийся после отжига отливки из белого чугуна на ковкий чугун.

Одним из самых сложных недостатков отливок из ковкого чугуна является отслаивание их поверхностной корки.

Дефект характерен для отливок из ковкого чугуна и представляет собой окисленный слой металла с поверхности отливки, получившийся после отжига отливок из белого чугуна на ковкий чугун.

В зависимости от процессов, протекающих при отжиге, различают два вида ковкого чугуна: черно- и белосердечный.

Целью отжига чугуна на черносердечный является разложение структурно свободного цементита. Из черносердечного чугуна получают в основном отливки с ферритной основой, реже с перлитной.

При получении отливок из ферритного чугуна отжигом в воздушной атмосфере одновременно с разложением цементита на аустенит и графит происходит окисление поверхности отливки и обезуглероживание тонкого поверхностного слоя. В результате на отливке образуется перлитная кайма, повышающая твердость и ухудшающая обрабатываемость. Толщина перлитной каймы иногда достигает более одного миллиметра, что сказывается на пластических свойствах отливки. Размер перлитной каймы зависит прежде всего от степени обезуглероживания отливки, т. е. от окислительного потенциала газов, окружающих отливку, от температуры и продолжительности отжига.

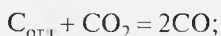
Окислительный потенциал газов зависит от состава печной атмосферы. Перлитная кайма образуется при соотношении $\text{CO}/\text{CO}_2 = 2$ [9, 10].

При соотношении $\text{CO}/\text{CO}_2 < 1$ образуется значительный слой окалины.

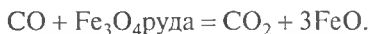
При прочих равных условиях толщина перлитной каймы тем больше, чем длительней выдержка отливок при высоких температурах.

Минимизировать перлитную кайму можно, увеличивая содержание кремния, серы [1]. Перлитная кайма не образуется в отливках, отжигаемых в защитной атмосфере.

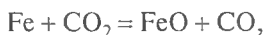
При отжиге чугуна на белосердечный наряду с графитизацией необходимо произвести обезуглероживание (для повышения вязкости металла и улучшения свариваемости). Обезуглероживание обеспечивают отжигом отливок в контейнерах, которые после укладки отливок засыпают рудой. Процесс обезуглероживания идет через газовую фазу, передающую кислород от руды к углероду отливки:



или



Окисление углерода происходит в основном на поверхности отливки, при этом снаружи, на глубине нескольких миллиметров, получается полностью обезуглероженный слой. Содержание углерода по сечению отливки уменьшается за счет диффузии углерода твердого раствора от центра к периферии. При чрезмерно большом содержании кислорода (при избытке свежей руды) происходит окисление чугуна по формуле:



так как углерод из центра диффундирует в недостаточной степени, чтобы предохранить чугун от окисления. В результате на внешней поверхности образуется эвтектика $\text{FeO}-\text{Fe}$ [3]. Между ней и ферритом на глубине появляется промежуточный слой с повышенным содержанием кремния и серы, вдоль которого в дальнейшем происходит отделение поверхностного слоя от основного металла отливки. Уменьшение содержания марганца и углерода, сокращение времени отжига, применение руды с низким содержанием серы способствуют предотвращению отслаивания поверхностного слоя [1].

3.10. Поверхностное повреждение

Поверхностное повреждение (ндп.: *забоина*) — повреждение поверхности при выбивке, очистке и транспортировании.

Поверхностные повреждения возникают при выбивке, очистке и транспортировании отливок, имеют вид вмятин, царапин, забоин. Основной причиной механических поверхностных повреждений являются неправильная технология указанных операций, их небрежное выполнение, неудачный выбор типа и параметров очистного оборудования. Например, к образованию поверхностных повреждений могут привести чрезмерно твердые очищающие тела в галтовочном барабане и большой его диаметр.

Наиболее склонны к поверхностным повреждениям отливки из мягких сплавов.

Правильный выбор оборудования, технологии перечисленных операций и их соблюдение позволяет предотвратить появление поверхностных повреждений.

3.11. Складчатость

Складчатость (ндр.: *наплыв*) — незначительные гладкие возвышения и углубления на поверхности отливки, возникающие вследствие пониженной жидкотекучести металла.

Основной причиной, как следует из определения дефекта, является пониженная жидкотекучесть. (рис. 22, а).

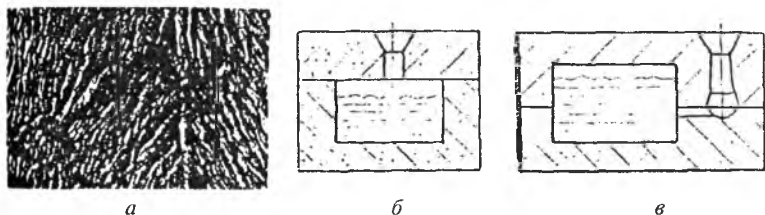


Рис. 22. Складчатость:

а — внешний вид; б — подача металла на зеркало; в — подача металла под зеркало

Образованию складчатости способствуют низкая температура заливаемого металла и конструкция литниковой системы, вызывающая «полнения» поверхности жидкого металла как при его подаче на зеркало сплава (рис. 22, б), так и под зеркало (рис. 22, в). Образованию складчатости способствует также большая длительность подъема уровня жидкого металла при заполнении высоких отливок массивного сечения. В этом случае на зеркале металла может преждевременно образоваться корочка с мелкими возвышениями и углублениями.

Устранение названных причин обеспечит появление отливок без складчатости.

3.12. Грубая поверхность

Грубая поверхность (ндр.: *неровность поверхности*) — поверхность с шероховатостью, превышающей допустимые значения.

Грубая поверхность является дефектом в том случае, если шероховатость поверхности отливки превышает параметры, допустимые технической документацией; ГОСТ 2789—73 устанавливает шесть параметров шероховатости. На практике применяют главным образом параметры R_z и R_a , причем предпочтение отдается параметру R_z .

Шероховатость поверхности отливок зависит от способа литья и вида металла (табл. 4).

Таблица 4. Шероховатость поверхности отливок

Способы литья	Металлы	Параметры шероховатости поверхности отливок, мкм
В песчаные формы	Черные	R_z 320—160
В кокиль	Черные	R_z 320—40
По выплавляемым моделям	Черные	R_z 80—20
Литье в оболочковые формы	Черные	R_z 160—40

Шероховатость поверхности формы определяется в основном размерами зерен песка. Чем крупнее размер песчинок, тем больше шероховатость поверхности формы и, следовательно, поверхности отливки. При смешивании зерен различных размеров пористость смеси, состоящей из неоднородных зерен, будет меньше пористости смеси однородных зерен, и шероховатость поверхности отливки уменьшится. Влияние глинистых составляющих может быть двояким: с одной стороны, при равномерном распределении глинистых составляющих по поверхности зерен увеличивается условный диаметр зерен, следовательно, ухудшается качество поверхности; с другой стороны, при расположении глинистых составляющих в промежутках между зернами снижается пористость смеси, а качество поверхности отливки может повыситься.

Сгорающие добавки также оказывают двоякое действие на шероховатость поверхности отливки. С одной стороны, выделяющиеся из них газы создают дополнительное сопротивление проникновению металла в поры между зернами, что уменьшает шероховатость поверхности отливок, с другой стороны, сгорающая добавка увеличивает поры и облегчает проникновение в них металла, что увеличивает шероховатость отливки. Введение в смесь каменноугольной пыли, пека и древесной муки улучшает качество поверхности отливки. Наиболее эффективно влияние добавок в небольших количествах. Следует иметь в виду, что по мере увеличения содержания добавок увеличивается опасность образования газовых раковин в отливках.

Связь шероховатости поверхности с газопроницаемостью определяется тем, что повышение газопроницаемости в первую очередь за-

висит от увеличения размеров зерен, поэтому с повышением газопроницаемости формы увеличивается и шероховатость поверхности отливки.

Шероховатость поверхности отливки зависит от степени уплотнения формы. Чем выше степень уплотнения формы, тем меньше шероховатость отливки. Однако простой связи между этими явлениями нет, и при увеличении степени уплотнения по достижении некоторой границы (в каждом отдельном случае разной) шероховатость перестает уменьшаться.

Влияние температуры заливаемого металла определяется тем, что с повышением температуры вязкость металла уменьшается, улучшается воспроизводимость неровной формы жидким металлом и увеличивается шероховатость отливки. При сохранении высокой температуры на поверхности формы в течение длительного времени частично сгорают связующие добавки, увеличиваются поры и шероховатость. Но увеличивающееся при этом газовыделение может препятствовать заполнению впадин на поверхности формы и способствовать уменьшению шероховатости. Учитывая сложное воздействие температуры металла на шероховатость, можно утверждать, что с повышением температуры шероховатость отливки увеличивается.

Шероховатость можно уменьшить не только снижением температуры сплава, но и изменением его состава. В частности, в этом направлении действует повышение содержания серы в чугунах.

3.13. Газовая шероховатость

Газовая шероховатость (иногда: *пузырчатость*) — сферообразные углубления на поверхности отливки, возникающие вследствие роста газовых раковин на поверхности раздела металл—форма.

При заливке жидкого металла из формы выделяются газы, являющиеся одной из причин образования газовых дефектов. Все вопросы, связанные с их образованием, подробно изложены в п. 4.2. Здесь лишь кратко представлен механизм образования газовой шероховатости (рис. 23).

Выходящий из поры формы в сторону металла газ образует на границе металл—форма пузырек, который растет до тех пор, пока давление в точке контакта не превысит сопротивление его внедрению в металл.

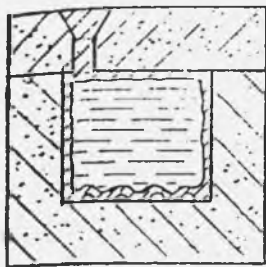


Рис. 23. Газовая шероховатость (схема образования)

Сочетание различных факторов (давление в точке контакта, металло-статический напор, величина поверхностного натяжения металла, наличие и свойства корочки в месте контакта и др.) приводит к внедрению или невнедрению газа в металл. Возможна ситуация при еще достаточно пластичной корке, когда пузырьки газа внедряются в поверхность отливки, деформируя корочку, но давление газа недостаточно, чтобы продавить и проникнуть в жидкий металл. В этом случае и образуются на границе раздела металл—форма сферообразные углубления, т. е. газовая шероховатость.

Глава 4

ДЕФЕКТЫ — НЕСПЛОШНОСТИ В ТЕЛЕ ОТЛИВКИ

Группа *«Несплошности в теле отливки»* наиболее многочисленна и содержит 16 дефектов различного вида происхождения. Дефекты этой группы наиболее опасны из-за возможных последствий, возникающих при эксплуатации.

4.1. Трещины

Основной причиной образования трещины являются напряжения, возникающие при затвердевании и последующем охлаждении отливки. Стандарт включает три вида трещин: горячие, холодные и межкристаллические.

4.1.1. Напряжения в отливке

После образования на поверхности жидкого металла при его охлаждении слоя твердой фазы этот металл получает устойчивые внешние контуры и становится отливкой. С этого момента при уменьшении температуры происходит сокращение линейных размеров отливки, называемое линейной усадкой. Усадка, а также происходящие при охлаждении отливки фазовые превращения вызывают появление в металле *напряжений*. Причиной возникновения литейных напряжений являются неодинаковые линейные или объемные изменения, происходящие в смежных объемах отливки при ее охлаждении.

Временные напряжения, действующие в некоторый момент времени, исчезают с исчезновением вызывающих их сил.

Остальные напряжения остаются в отливке после ее охлаждения. Временные напряжения являются причиной образования горячих и холодных трещин, коробления (изменение геометрии) отливок. Остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями, возникающими при термообработке, транспортировке, механической обработке отливок, могут вызвать их разрушение. Релаксация остаточных напряжений также может привести к изменению геометрии отливок.

Напряжения, существующие в затвердевшей отливке, подразделяются на напряжения первого, второго и третьего рода.

Напряжения первого рода характерны для всей отливки в целом, напряжения второго и третьего рода — для отдельных кристаллов и элементарных решеток.

Возникающие напряжения являются причиной образования трещины. Напряжения классифицируются как механические, температурные (термические), фазовые и др.

Механические напряжения и деформации возникают в отливке вследствие препятствий ее усадке со стороны формы или стержня. Наиболее опасны растягивающие напряжения, именно они вызывают трещины. Сжимающие напряжения с этой точки зрения безопасны, а иногда даже полезны.

Величина механических напряжений зависит главным образом от конструкции отливки, а также от конструкции литейной формы, свойств металла и технологии производства. Чем больше в отливке полостей, оформляемых стержнями или болванами, выступов и поднутрений, затрудняющих ее усадку, тем больше напряжения. Механические напряжения могут возникнуть в отливках простой конфигурации, где роль выступающих частей играют литники и выпоры. Из свойств сплава на развитие механических напряжений влияют прежде всего величина усадки, а также его прочность. Чем выше прочность сплава, тем легче сокращающаяся отливка преодолевает внешние сопротивления, сама при этом оставаясь неповрежденной и недеформированной. Большое значение имеет и пластичность металла, так как чем больше отливка деформируется, тем полнее она разгружается от напряжений.

На величину механических напряжений влияют также свойства формы. Расширяющаяся при нагреве форма дополнительно увеличивает возникающие механические напряжения. Чем выше податливость и ниже прочность формы, тем меньше величина возникающих напряжений.

Температурные напряжения и деформации возникают из-за неравномерной скорости охлаждения различных частей отливки, вызванной геометрической формой отливки, расположением литников и прибылей, теплопроводностью формы, наличием холодильников и другими факторами.

Рассмотрим механизм образования температурных напряжений на примере рамной конструкции отливки (рис. 24).

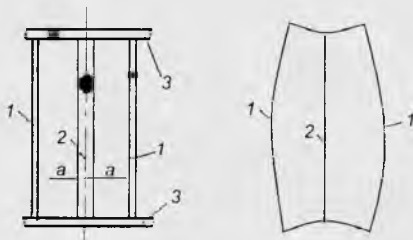


Рис. 24. Рамная конструкция отливки для определения напряжений:

1 — тонкие прутки; 2 — более толстые прутки; 3 — поперечина среднего сечения

Рама состоит из тонких прутков 1, более толстого прутка 2 и поперечин среднего сечения 3. Будем считать, что форма не затрудняет усадку рамы во время охлаждения. Более быстро охлаждающийся тонкий прутки 1 должен иметь большую усадку, чем менее охлаждающийся толстый прутки 2, т. е. усадке тонкого прутка препятствует толстый прутки. Это вызывает растягивающие напряжения в тонком прутке и сжимающие — в толстом. В области высоких температур металлы пластичны, и возникающие напряжения приводят к пластическому растяжению тонкого прутка и пластическому сжатию толстого. При переходе в область упругих деформаций тонкие прутки претерпели большую часть усадки, а толстый, как имеющий более высокую температуру, меньшую часть усадки. При дальнейшем охлаждении до окончательных температур тонкие прутки препятствуют усадке толстого, в нем возникают растягивающие напряжения, а в тонких — сжимающие. Эти напряжения вызывают выпуклый изгиб тонких прутков и вогнутый изгиб поперечин или разрыв толстого прутка.

Указанное относится также к образованию деформаций и напряжений по сечению отливки. В этом случае наружные слои играют роль тонких частей, а внутренние — толстых.

Таким образом, помимо напряжений, возникающих из-за взаимного силового влияния частей отливки, появляются напряжения, обусловленные неравномерным распределением температур по сечениям.

Фазовые напряжения образуются в отливке, если сплав претерпевает фазовые или структурные превращения, сопровождающиеся изменением его объема (удельный объем при содержании 0,9 % С составляет для аустенита $0,1275 \text{ см}^3/\text{г}$, перлита — $0,1286 \text{ см}^3/\text{г}$, мартенсита — $0,1310 \text{ см}^3/\text{г}$).

При различных скоростях охлаждения в различных частях отливок фазовые превращения протекают в разное время, что и вызывает фазовые напряжения в отливке.

При медленном охлаждении стальной отливки распад аустенита с образованием перлита происходит при высоких температурах. Происходящее при этом увеличение объема может компенсироваться пластическими деформациями. При более быстром охлаждении превращение будет происходить при более низких температурах в упругой зоне и может вызвать определенные напряжения. Если фазовые превращения прошли в поверхностном слое, а в средней части нет, то это вызовет растягивающие напряжения в центре и сжимающие на поверхности.

В случае чугунных отливок выделение графита будет происходить в массивных частях с существенным возрастанием удельного объема. При этом растягивающие напряжения возникнут в поверхностном слое, а сжимающие — в середине сечения.

4.1.2. Горячая трещина

Горячая трещина (ндрп.: *усадочная трещина*) — разрыв или надрыв тела отливки усадочного происхождения, возникающий в интервале температур затвердевания. Горячая трещина располагается по границам кристаллов, имеет неровную окисленную поверхность, на которой иногда видны дендриты.

Горячие трещины образуются при кристаллизации металла или при нагреве до температур, близких к линии солидуса (рис. 25). Минимальной пластичностью большинство сплавов обладает в температурном интервале хрупкости (ТИХ), верхней границей которого является температура начала линейной усадки, а нижней — температура солидуса. Горячие трещины образуются, когда $\epsilon_{\text{св}} - \epsilon_{\text{д}} \geq \delta_r$, где $\epsilon_{\text{св}}$ — сво-



Рис. 25. Горячая трещина

бодная усадка сплава в момент образования горячих трещин; ε_d — действительная (затрудненная) усадка сплава в момент образования горячих трещин; δ_t — запас пластичности (максимально допустимая деформация) сплава в температурном интервале образования горячих трещин.

В твердожидком состоянии наиболее вероятно образование кристаллизационных трещин. На границе твердой фазы с собственным расплавом поверхностная энергия особенно низка, зарождение и развитие трещин по стыкам зерен при наличии жидкой фазы облегчается, т. е. сплав охрупчивается жидкой фазой. Процесс образования горячих кристаллизационных трещин сопровождается процессом их залечивания. Возникшая трещина заполняется расплавом, поступающим из соседних объемов отливки под действием металлостатического давления, капиллярных или других сил. Залечиванию трещин способствует повышение жидкотекучести сплавов. Любое воздействие на расплав (например, ультразвук и вибрация), уменьшающее поверхностное натяжение и краевой угол смачивания, улучшает условия залечивания трещин.

При $t < t_{\text{солид}}$ затвердевают жидкие прослойки и скачкообразно увеличиваются прочностные и деформационные свойства, зарождение и развитие горячих трещин приводит к вязкому внутрикристаллическому разрушению сплава.

К горячим трещинам следует отнести также полигонизационные трещины, образующиеся по границам в температурном интервале, непосредственно примыкающем к $t_{\text{солид}}$, при этом разрушение, как и в случае кристаллизационных трещин, носит межкристаллитный характер.

Торможение свободной линейной усадки отливки может привести к локализации деформации в ее отдельных частях, чаще всего в

местах, затвердевающих в последнюю очередь и, следовательно, наиболее опасных с точки зрения образования горячих трещин.

На процесс образования горячих трещин может оказывать влияние характер силового взаимодействия затвердевающей отливки и формы. Затвердевшая корка отливки, даже если она не образует на стенке формы законченного контура, за счет интенсивного теплоотвода претерпевает усадку. В то же время давлением жидкого металла она плотно прижимается к стенке формы и силами трения как бы «наклеена» на стенку. В этих условиях она испытывает двухстороннее растяжение вдоль поверхностей формы, а вся ее объемная усадка реализуется в виде утроенной линейной усадки в направлении третьей оси (по толщине), при этом трещины в корке не образуются, так как перемещение металла вдоль стенки заблокировано силами трения.

Таким образом, трение о стенку формы страхует отливку от образования горячих трещин в начальной стадии ее формирования, одновременно натянутая корка работает как оболочковая конструкция и обжимает незатвердевший металл по периметру отливки. Давление, испытываемое затвердевающим металлом со стороны корки-оболочки, может способствовать самопроизвольной деформации отливки.

Горячая трещина — это разрыв или надрыв в теле отливки усадочного происхождения, возникающий в интервале температур затвердевания (для углеродистой стали 1250—1450 °С, для чугуна 1050—1100 °С).

Горячая трещина располагается по границам кристаллов, имеет неровную окисленную поверхность, на которой иногда видны дендриты.

Чаще всего горячая трещина образуется в местах перехода от толстого сечения к тонкому, в углах отливки, в местах затрудненной усадки.

Их наиболее характерной формой является короткая извилистая трещина «зияющего» вида, края которой расходятся, растянуты.

Горячие трещины образуются в тех случаях, когда возникающие напряжения превышают механические свойства (прочность, пластичность) сплава при высоких температурах, им особенно подвержены отливки из стали и белого чугуна. Эти сплавы имеют большую усадку, и в них возникают большие напряжения из-за сопротивления формы.

На возможность образования горячих трещин оказывают влияние следующие факторы:

1. Наличие значительных перепадов температур в стенках и отдельных частях отливки в период затвердевания и дальнейшего охла-

ждения; наличие термических «узлов». Эти факторы способствуют возникновению температурных напряжений;

2. Недостаточная податливость форм и стержней, способствующая возникновению механических напряжений.

3. Механическое торможение усадки отливки элементами литниковой системы, выпорами, прибылями, стержнями, крестовинами опок и т. д.

4. Термическое торможение усадки вследствие неблагоприятной конструкции отливки.

5. Повышенные температура и скорость заливки, приводящие к возрастанию неравномерности роста твердой корочки в связи с теплопередачей от струи жидкого металла, текущего вдоль внутренней поверхности области затвердевания.

6. Повышенное содержание серы и других примесей, уменьшающих трещиностойкость сплава.

Более подробное описание влияния различных факторов на образование горячих трещин приведено в работах [3, 13].

Основные мероприятия по борьбе с горячими трещинами сводятся к следующим основным положениям:

1. Увеличение податливости формы за счет применения соответствующих формовочных смесей (например, введение в них древесных опилок) и создания полостей в тех частях формы, которые располагаются между выступающими частями отливки. Для увеличения податливости стержней их внутреннюю часть следует заполнять сухими податливыми материалами, а каркасы обматывать соломенными жгутами. Существенно увеличивает податливость форм и стержней введение в смесь фурановых смол.

2. Упрочнение слабых мест в отливках достигается применением ребер жесткости, установкой холодильников, созданием плавных переходов в сопряжениях.

3. Снижение температуры и скорости заливки, если это не вызывает других дефектов в отливке. Ослабление местных разогревов за счет рационального подвода металла способствует созданию условий направленного затвердевания,

4. Уменьшение жесткости конструкции литниковой системы, которая должна иметь возможность деформации (изгиба) ветвей литниковых ходов и питателей под действием усадки отливки.

5. Снижение в сплаве примесей (серы, фосфора), уменьшающих трещиностойкость сплава.

4.1.3. Холодная трещина

Холодная трещина (ндп.: *бой*) — разрыв тела затвердевшей отливки вследствие внутренних напряжений или механического воздействия. Холодная трещина обычно имеет чистую светлую или с цветами побежалости зернистую поверхность.

Холодные трещины образуются в широком интервале температур: от с температуры эвтектоидного превращения до полного охлаждения отливки. Холодные трещины также могут возникнуть при транспортировке, хранении и механической обработке отливок.

Холодные трещины возникают при таких температурах, когда металл уже находится в упругом состоянии (при температурах ниже 700 °С для чугуна и 600—650 °С для углеродистой стали).

Образование холодных трещин наиболее вероятно, если при охлаждении отливки возникают напряжения всех трех видов (механические, температурные и фазовые) и действуют преимущественно в одном направлении.

К возникновению подобных дефектов склонны отливки связанной конструкции кольцевого или рамного типа, имеющие внутри периметра разностенные части (колеса со спицами, кожухи, усиленные ребрами жесткости, контактные блоки и т. п.).

На рис. 26 изображен ременной шкив, конфигурация которого обуславливает его неравномерное охлаждение. Сначала охлаждаются

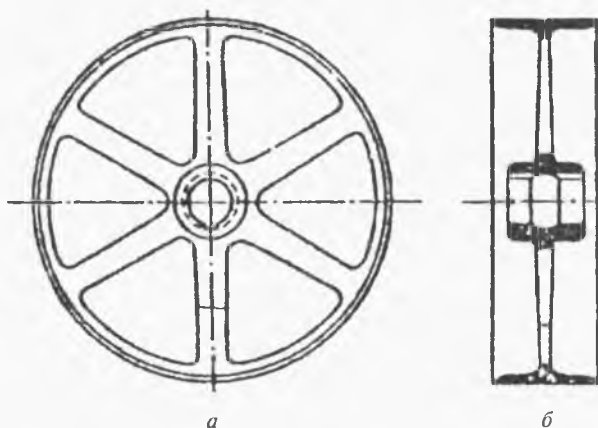


Рис. 26. Образование трещины в ременном шкиве:
а — вид сверху; б — разрез

и претерпевают усадку обод и спицы, ступица вследствие ее большого поперечного сечения переходит в упругое состояние в последнюю очередь. Возникающие в спице растягивающие напряжения могут привести к образованию холодной трещины.

Затрудненная усадка может быть вызвана также недостаточной податливостью форм и стержней, наличием каркасов.

К образованию холодных трещин могут привести кроме указанных нетехнологичной конструкции отливки и низкой податливости формы также низкая прочность или пластичность сплава, несвоевременная выбивка, механические повреждения от ударов при выбивке, загрузке в очистные барабаны, отбивке питателей и прибылей.

М е р ы п р е д у п р е ж д е н и я образования холодных трещин:

1. Создавать условия для возможно равномерного охлаждения отливки во всех ее поперечных сечениях правильным подводом металла и установкой холодильников.

2. Увеличивать податливость форм и стержней с помощью введения специальных добавок.

3. Не устанавливать металлические каркасы близко к поверхностям, омываемым металлом.

4. Обеспечить необходимую жесткость конструкции отливки правильным расположением ребер жесткости.

5. Своевременно производить выбивку отливки.

6. Не допускать ударов при отбивке питателей, прибылей, при загрузке отливок в очистные барабаны.

4.1.4. Межкристаллическая трещина

Межкристаллическая трещина — разрыв тела отливки при ее охлаждении в форме на границах первичных зерен аустенита в температурном интервале распада. В изломе термически обработанной отливки имеет вид сглаженных поверхностей с зеркальным блеском на общем сером фоне волокнистой составляющей излома, образуется под воздействием водорода, растворенного в стали.

Межкристаллическая трещина в изломе термически обработанной пробы (отливки) имеет вид сглаженных поверхностей с зеркальным блеском на общем сером фоне волокнистой составляющей излома.

Разрыв образуется под воздействием водорода, растворенного в стали.

Особенно склонны к образованию рассматриваемого дефекта хромистые, хромомарганцовистые и хромоникелевые стали.

При обработке этих сплавов сильно действующими раскислителями (алюминием или магнием) на границах первичных зерен происходит выделение пленок высокоплавких окислов, и тем самым ослабляется связь между зернами. Указанные раскислители, кроме того, способствуют в значительной мере поглощению водорода, который затем, выделяясь из твердого расплава, вызывает образование трещин. Разрушение по границам зерен может быть предотвращено или, по крайней мере, сильно ослаблено при растворении или видоизменении имеющихся по границам выделений в результате продолжительного *диффузионного отжига* при температурах, близких к температуре плавления (приблизительно от 1100 до 1300 °С).

4.2. Газовая раковина

Газовая раковина (ндп.: *пузырь*) — полость в теле отливки, образованная выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами. Имеет обычно сферическую или округлую форму с блестящей поверхностью, часто синеватого оттенка.

Газовые раковины являются самым распространенным дефектом. В некоторых отраслях машиностроения (транспортное, сельскохозяйственное и др.) доля дефектов по газовым раковинам достигает до 70 % в общем количестве брака [1].

На содержание газов и степень поражения отливки газовыми дефектами оказывают влияние: содержание газов в шихтовых материалах; состав газовой среды в плавильном агрегате; особенности взаимодействия жидкого металла с окружающей средой при обработке сплава в жидком состоянии, транспортировке, заливке в форму; особенности процесса формирования отливки.

В зависимости от происхождения газов дефекты, ими вызванные, объединяют в две группы: внутренние (эндогенные) и внешние (экзогенные).

Получение отливок без газовых раковин и пористости является одной из самых трудных задач литейного производства, поэтому важно знать особенности механизма их образования.

4.2.1. Эндогенные газовые дефекты

Эндогенные раковины образуются при выделении:

- растворенного в жидком металле газа при охлаждении металла;
- газа в результате разложения химических соединений сплава (например, окислов).

Для изучения механизма образования эндогенных газовых раковин рассмотрим особенности растворения газов в металлах и обратного процесса их удаления.

Растворимость газов в металлах и сплавах в значительной степени зависит от природы растворителя; температуры; давления; вида и свойства газа.

В обычных жидкостях повышение температуры уменьшает растворимость газов. В отличие от обычных жидкостей в твердых и жидких металлах растворимость газов с повышением температуры увеличивается. Это объясняется тем, что растворение газов в металлах является эндогенным процессом, т. е. процессом, идущим с поглощением тепла.

Вместе с тем, в некоторых случаях растворимость газов с повышением температуры уменьшается (например, растворимость водорода в титане, цирконии).

Растворимость газа в жидком сплаве при данной температуре определяется по закону Сиверса [5]:

$$S_r = k_r \sqrt{p_r},$$

где S_r — количество растворенного газа;

k_r — константа растворимости;

p_r — парциальное давление газа над поверхностью металла.

Следовательно, растворимость газов зависит от парциального давления газа над зеркалом металла.

Высокое парциальное давление у газов, присутствующих в атмосфере печи при плавке металла, — водорода, азота, кислорода, поэтому эти газы обладают наибольшей растворимостью в сплавах.

Водород в растворе находится в ионном состоянии; азот — частично в атомарном состоянии, частично — в виде нитритов железа, кремния и других элементов; кислород в жидких сплавах — в виде окислов FeO, MnO, Al₂O₃ и т. д.

Оксид углерода растворяется в металлах весьма незначительно.

При уменьшении температуры растворимость газов уменьшается, поэтому при охлаждении жидкого металла происходит зарождение газовых пузырьков и их выделение.

Возможны два случая зарождения газовых пузырьков в жидком кристаллизующемся сплаве: гомогенное и гетерогенное.

Гомогенное зарождение может произойти, когда разность внутреннего давления газа в сплаве и внешнего давления равна или больше давления разрыва сплава, т. е.:

$$p_1 - p_2 \geq p_3,$$

где p_1 — внутреннее давление, которое складывается из суммы давлений всех газов, находящихся в растворе;

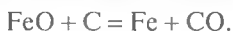
p_2 — сумма гидростатического и внешнего газового (обычно атмосферного) давлений и давления, возникающего в результате усадки;

p_3 — давление разрыва жидкости.

Гомогенное зарождение потребовало бы очень большой концентрации растворенного газа, что не соответствует действительности, поэтому пузырьки возникают на имеющихся поверхностях раздела, т. е. в местах, где нарушается сплошность строения жидкого металла и где величина p_3 существенно меньше, чем в сплошном металле (гетерогенное зарождение). Такими местами могут быть фронт кристаллизации, взвешенные неметаллические включения, подина и стенки плавильного агрегата, копытника, ковша, формы и т. д. В образовавшийся пузырек из одного газа могут диффундировать в атомарном состоянии другие газы, так как их парциальное давление в данном пузырьке практически равно нулю. Достигнув определенного размера, пузырек отрывается от поверхности зарождения и всплывает. Отдельные пузырьки газа при столкновении соединяются, что увеличивает скорость их всплывания. Этот процесс может быть усилен механическим способом, например, энергичным вращением, или встряхиванием жидкой ванны, или введением в плавку новых газов.

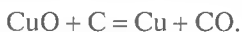
Газы, выделившиеся в жидком металле до его затвердевания, когда вязкость металла мала, не образуют раковины в отливке. Газы, выделившиеся в период кристаллизации металла, вязкость которого сильно возросла, как правило, остаются в отливке. Почти полностью выделяются газы из эвтектических сплавов или чистых металлов, затвердевающих при постоянной температуре. Газовые раковины часто возникают в отливках из сплавов с большим интервалом кристаллизации и низкой степенью эвтектичности.

Причиной образования газовых раковин могут являться химические реакции. К таким реакциям относится восстановление закиси железа углеродом в нераскисленной стали:



Оксид углерода практически не растворяется в металле и образует в нем полости, в которые диффундирует часть растворенных газов — водорода и азота.

При литье медных сплавов может происходить восстановление окиси меди углеродом, входящим в состав покрытий формы:



Эта реакция происходит наиболее интенсивно в зоне высоких температур — вблизи питателя и часто приводит к образованию раковин.

Размер, формы и число газовых раковин, образующихся в жидком металле, в большой степени зависят от свойств газа. Водород образует много мелких сферических раковин. Раковины от выделившегося азота имеют вид запятой длиной 5–6 мм.

Меры, обеспечивающие минимальное содержание газов и предупреждающие образование эндогенных газовых раковин и пористости в отливках, можно разделить на три группы:

- дегазация исходных шихтовых материалов, а также предупреждение поглощения газов металлами во время плавки, при выпуске в ковш, заливке в формы и в процессе затвердевания отливки;
- дегазация жидкого металла перед заливкой в формы;
- предупреждение выделений газов из раствора в процессе кристаллизации металла в форме.

К первой группе относят подготовку и подбор качественных шихтовых материалов, сушку, очистку их и вакуумирование до загрузки в плавильный агрегат, ведение плавки в условиях вакуума или защитной атмосферы, различные методы дегазации в процессе плавки и перед выпуском готового сплава из печи в ковш (раскисление, «кипение» при выплавке стали).

Вторая группа мер предусматривает создание условий для дегазации сплавов вне плавильного агрегата. К ним следует отнести вакуумирование сплава в ковше, разливку в вакууме, выдержку перед раз-

ливкой с медленным охлаждением и последующим быстрым подогревом, обычную выдержку, введение в расплав элементов, реагирующих с растворенным газом и образующих негазообразные продукты, продувку расплава газами (аргоном, хромом), ультразвуковую обработку и другие методы.

К третьей группе мер относится метод кристаллизации под давлением (над формой после заливки в автоклаве создается повышенное давление), при этом методе в металле остается больше газов, чем при атмосферном давлении. Аналогично влиянию высокого давления при кристаллизации действует ускоренное охлаждение, при котором задерживается газовыделение из раствора до перехода в твердое состояние.

4.2.2. Экзогенные газовые дефекты

Экзогенные раковины образуются при проникновении газов в отливку извне в следующих случаях:

- а) при выделении газов из формовочных материалов;
- б) в результате захвата воздуха при заливке металла в форму;
- в) в результате реакций, протекающих у поверхности холодильников, жеребеек и т. п.

Выделение газов из форм и стержней в процессе заливки металла создает на границе соприкосновения металла с формой повышенное давление. Общее количество газов V , отводимых от поверхности металл—форма за время τ , составит:

$$V = k(p_1 - p_2)F\tau/l,$$

где $(p_1 - p_2)$ — перепад давлений между начальной и конечной точками капиллярного канала пористой формы;

F — площадь контакта отливки и формы;

l — толщина формы;

k — коэффициент газопроницаемости, зависящий от среднего радиуса каналов, среднего коэффициента шероховатости, средней длины канала, ее отношения к толщине формы и других факторов.

Аналитический расчет коэффициента газопроницаемости практически невозможен и определяется экспериментально.

Давление газа у стенок отливки в начальный момент:

$$p_{\tau \rightarrow 0} = \sqrt{0,89 b_a v_{\text{зал}} \eta / 10^4 \sqrt{kf}},$$

где b_a — коэффициент аккумуляции теплоты;

$\nu_{\text{зал}}$ — перегрев над температурой ликвидуса при заливке;

η — количество газов, выделяемых формой при поглощении ею 1 ккал (4,187 кДж);

f — относительная пористость уплотненного формовочного материала.

Давление газа возрастает с увеличением теплоаккумулирующей способности формы, величины перегрева металла, количества выделяемых газов и уменьшается с увеличением газопроницаемости и пористости формы. При заливке металла наблюдаются два максимума газового давления [4, 10]. Первый — почти совпадает по времени с началом контакта металла с формой. Через 40—50 с от начала заливки из формы выделяется около 90 % объема всех газов. Второй максимум появляется через 1—2 мин после заливки из-за ухудшения газопроницаемости формы вследствие перекрытия металлом зазоров в знаковых частях формы и образования зоны конденсации влаги с низкой газопроницаемостью.

Когда давление газов, выделяющихся из формы, превышает металлостатическое давление, газы проникают в жидкий металл и всплывают на поверхность. При бурном выделении газов металл «вскипает».

Если газы проникают в металл без затвердевшей корки, то они «всплывают» на поверхность (рис. 27, а, б) или проходят через стенку формы при ее достаточной газопроницаемости (рис. 27, в). При плохой газопроницаемости формы образуется открытая газовая раковина (рис. 27, г). Закрытая раковина получается, если на поверхности металла образуется твердая корка; чтобы раковина не «вышла» на поверх-

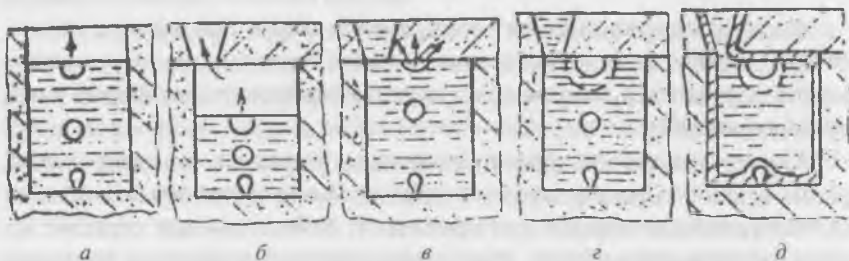


Рис. 27. Схема образования дефектов от выделяющихся из формы газов

ность отливки, толщина твердой корки на поверхности металла должна быть больше 0,1 мм. Если корка металла в нижней части достаточно пластична, то металл может ее продавить и остаться внутри отливки (рис. 27, д) или же образовать внизу отливки открытую раковину.

Газы, выделяемые формой при заливке, образуются в результате: расширения воздуха, содержащегося в порах разовых форм; испарения имеющейся в форме свободной влаги; сгорания органических компонентов смеси; выделения связанной гидратной влаги; термодеструкции (разрушения) органических составляющих смеси; разложения некоторых минеральных примесей; диссоциации газов.

Доля выделяемых различными источниками газов [1, 12] приведена в табл. 5.

Таблица 5. Количество газов, выделяемых различными источниками

Источник выделения газов	Количество газов в форме, %		
	сырой	сухой	оболочковой
Расширение воздуха	До 0,5	До 1	До 0,5
Испарение свободной влаги	50—60	8—12	3—5
Сгорание органических компонентов	2—3	5—8	2—10
Выделение гидратной влаги	0,5—0,9	12—25	0,5—2
Термодеструкция органических веществ	30—40	45—65	80—90
Разложение минеральных примесей	1—5	1—5	1—2
Диссоциация газов	6—10	8—12	10—15

Воздух, содержащийся в порах разовых форм, при заливке металла нагревается, и давление его возрастает. Благодаря газопроницаемости формы часть нагретого воздуха вытесняется через форму в окружающую среду.

Существенное значение на появление дефектов оказывает испарение влаги в сырых формах и стержнях. Количество влаги в объемно-высушенных формах для крупных и ответственных отливок не должно превышать 0,5 %. При поверхностной подсушке толщина подсушенного слоя должна быть такой, чтобы парообразование нижележащих слоев сырой формы начиналось не раньше, чем образует-

ся корка. Эта толщина для чугунных отливок при температуре заливки 1300 °С должна составлять от 8 до 42 мм в зависимости от размера отливок [1]. Рекомендуется подсушивать также формы из быстротвердеющих смесей с большим количеством жидкого стекла.

Следует учитывать, что при продолжительном хранении форм и стержней, изготовленных с гигроскопическими связующими (жидкое стекло, декстрин, сульфитный шелок и др.), опасность появления газовых раковин возрастает.

Сгорание органических веществ в форме не вызывает большого количества газов, так как в форме мало кислорода.

В сырых формах углерод органических веществ может окисляться водяным паром с образованием водорода. Количество выделяемых при этом газов больше, чем при прямом окислении кислородом воздуха.

При термодеструкции органических веществ без доступа кислорода образуются вода, окислы углерода, водород, азот, углеводороды и др. Их количество зависит от содержания связующих материалов. Применение высококачественных связующих улучшает качество отливок.

Выделяющиеся при термодеструкции газообразные углеводороды диссоциируют с выделением большого количества газа. Так, метан при разложении выделяет много водорода, который увеличивает газовое давление в форме.

При разложении слюды, гидратов железа, присутствующих в глине или бентоните, выделяется гидратная вода. При разложении минеральных примесей (известняк, доломит, магнезит и др.) выделяется углекислый газ.

На качество отливок влияет не только газотворность смеси, но и скорость выделения газов. Чем меньше эта скорость, тем больше возможность вывода газов из формы.

Для предотвращения образования газовых раковин, вызванных выделением газов из формы и стержней, необходимо уменьшить газотворную способность смесей, улучшить газопроницаемость форм, не допускать переуплотнения смесей при изготовлении форм и стержней, предусматривать правильную систему вентиляции, по возможности, снижать температуру заливки.

Воздух, попадаемый в полость литейной формы при заливке, приводит к образованию газовых раковин, поверхность которых в отливках из черных сплавов имеет из-за окисления металла матовый синеватый оттенок.

Воздух попадает в литейную форму путем инъекции при течении сплава через литниковую систему (рис. 28, а). Движущийся расплав может захватить воздух еще в литниковой чаше или воронке. Уровень расплава в чаше необходимо поддерживать максимальным, исключая образование вихревых потоков (рис. 28, б).

Воздух и газы могут также засасываться через газопроницаемые стенки каналов литниковой системы в местах, где возможно разрежение из-за большой скорости расплава или из-за обтекания металлом острых углов (рис. 29).

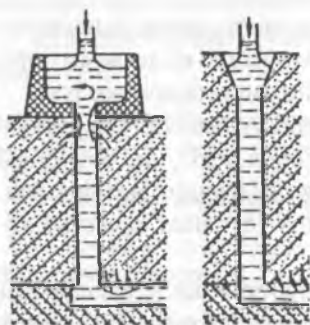


Рис. 28. Схема захвата воздуха в литниковой воронке

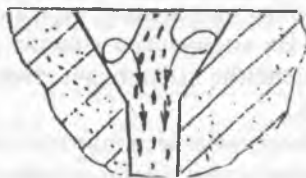


Рис. 29. Схема разрежения и инъекции газов в литниковой системе

В цилиндрических высоких стояках металл падает с большой скоростью и может отделяться от стенок стояка. Поэтому рекомендуется выполнять стояк конической формы, сечения которого определяются соотношением:

$$F_1/F_2 = \sqrt{h_2/h_1},$$

где F_1 , F_2 — площади сечения соответственно нижней и верхней частей стояка;

h_1 — высота металла в литниковой чаше;

h_2 — общая высота стояка и литниковой чаши.

Правильная конструкция стояка не предотвращает засасывания воздуха, если в форме имеются острые грани элементов литниковых систем. Плавное соединение стояка со шлакоуловителем и питателями уменьшает засасывание воздуха (рис. 30).

Инжектирование воздуха и газов в полость отливки особенно опасно, если металл быстро образует поверхностную корку, напри-

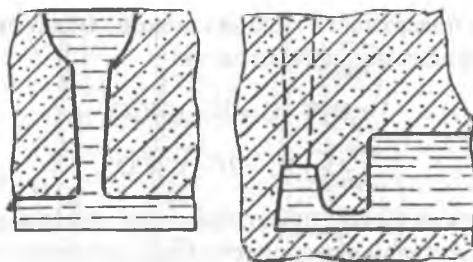


Рис. 30. Оформление переходов между стояком, шлакоуловителем и питателем

мер, для тонкостенных отливок или отливок из стали. В крупных отливках воздушные раковины могут образоваться при сифонной или этажной заливке. Дефектами обычно поражены верхние части отливки.

Правильно выполненная конструкция литниковой системы и соблюдение правил заливки (быстрое заполнение литниковой системы металлом и недопущение прерывности заливки) являются необходимыми условиями предотвращения газовых раковин по причине попадания воздуха в полость формы при заливке.

Газы, образующиеся при применении холодильников, жеребеек и других металлических предметов, образуют газовые раковины, расположенные близко к этим предметам, так как проникновение газов кратковременно из-за быстрого затвердевания сплава у поверхности металлических частей.

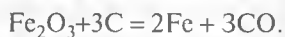
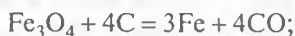
Источниками образования газов при применении металлических предметов могут быть влага, осаждающаяся на металлических телах, поглощенные газы, окисные пленки, особенно гидраты [ржавчина $\text{Fe}(\text{OH})_3$].

Влага конденсируется на холодных металлических холодильниках, устанавливаемых в недостаточно охлажденные формы. Значительное количество водяных паров выделяет ржавчина:



Рабочая поверхность металлических предметов, повторно используемых в литейной форме, покрыта сеткой термических трещин. Содержащийся в них воздух при нагревании расширяется и внедряется в отливку.

Окисленные поверхности холодильников, жеребеек и др. взаимодействуют с углеродом жидкого металла:



Необходимым условием предотвращения газовых раковин, образующихся по вине металлических предметов, являются тщательная их очистка и сушка. Поверхность наружных холодильников рекомендуется покрывать самовысыхающей краской, приготовленной из алюминиевой пудры [13], внутренние холодильники и жеребейки — оловом.

4.3. Ситовидные раковины

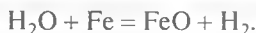
Ситовидная раковина (ндрп.: *ситовидная пористость*) — удлиненные тонкие раковины, ориентированные нормально к поверхности отливки, вызванные повышенным содержанием водорода в кристаллизующемся слое.

Обычно ситовидные раковины сосредоточены в зоне, находящейся на расстоянии 1—6 мм от поверхности отливки. Дефект встречается в стальных и чугуновых отливках.

Образование ситовидной раковины показано на рис. 31.

Удлиненная форма и перпендикулярное к поверхности отливки расположение газовых раковин объясняется ростом дендритов и их давлением на газовую фазу (рис. 31 *а, б*). По мере увеличения кристаллов доступ газа к раковинам затрудняется и одновременно прекращается увеличение их размеров (рис. 31, *в*).

Образование ситовидных раковин в стальных отливках объясняется выделением водорода, вызванным понижением растворимости в стали во время затвердевания и взаимодействия влаги формы со стенками отливки по реакции:



Однако следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Хотя в определении ГОСТа ситовидной раковины сказано, что она вызвана повышенным содержанием водорода в кристаллизующемся слое, тем не менее в ряде работ [1, 3] приводят доказательства, что по-

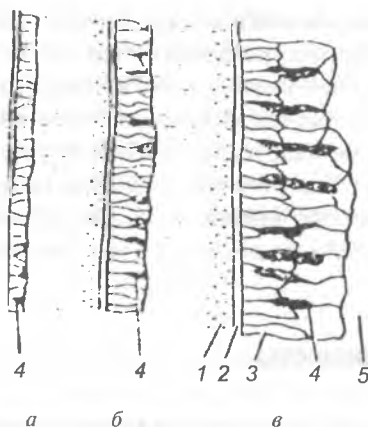


Рис. 31. Образование ситовидных раковин:

а — поверхностный слой окислов железа; *б* — зона столбчатых кристаллов; *в* — ситовидные раковины; 1 — форма; 2 — поверхностный слой окислов железа; 4 — ситовидные раковины; 5 — жидкая сталь

мимо водорода существенной причиной образования ситовидной раковины является окись углерода.

Окись углерода образуется при реакции углерода с оксидами железа, присутствующими в металле и находящимися на поверхности металлических холодильников.

Доказательством влияния CO на образование ситовидных раковин является то, что они не появляются в хорошо раскисленной стали даже при высоком содержании водорода. В то же время недостаточно раскисленная сталь образует ситовидные раковины при малом содержании растворенного водорода. Эти раковины появляются в отливках, полученных в сухих формах, если они содержат окислы железа.

Ситовидными раковинами могут быть поражены стальные отливки, полученные в формах из жидкостекольных смесей. Это, вероятно, связано с активным выделением водяных паров в начале заливки металла.

Основными причинами образования ситовидных раковин в чугунных отливках являются попадание в металл алюминия и увеличение влажности облицовочной смеси свыше 4,5 %. Алюминий ускоряет разложение воды, т. е. увеличивает содержание растворенного в металле водорода.

Меры, предотвращающие образование ситовидных раковин, сводятся к более полному раскислению металла,

уменьшению содержания влаги в формовочных смесях, сокращению простоя собранных форм, уменьшению контакта жидкого металла с влажной формой за счет уменьшения длины литниковой системы, снижению содержания растворенного в металле водорода. Для уменьшения содержания в металле водорода следует учесть, что источником водорода может быть ржавая и влажная шихта, сырая футеровка печей, непросушенные литейные ковши, влажные холодильники, длительный контакт расплавленного металла с атмосферой и другие факторы.

4.4. Усадочные раковины

Усадочная раковина — открытая или закрытая полость в теле отливки с грубой шероховатой, иногда окисленной поверхностью, образовавшаяся вследствие усадки при затвердевании металла.

Усадкой называется уменьшение объема и линейных размеров отливки в период между заполнением формы расплавом и охлаждением отливки до температуры окружающей среды. Основу усадки составляет термическое сжатие, на величину и знак которого оказывают влияние протекающие при формировании и охлаждении отливки фазовые и структурные превращения, а также процессы, связанные с изменением растворимости газов. Полная объемная усадка сплава ϵ складывается из усадки в жидком состоянии при затвердевании ($\epsilon_{вз}$) и в твердом состоянии ($\epsilon_{взм}$). Величина относительной усадки определяется:

$$\epsilon_v = \alpha_{v(t_1-t_2)}(t_1 - t_2);$$

$$\epsilon = \alpha_{l_1-t_2}(t_1 - t_2),$$

где $\alpha_{v(t_1-t_2)}$, $\alpha_{l_1-t_2}$ — коэффициенты объемной и линейной усадки в интервале температур $(t_1 - t_2)$.

Усадка в жидком состоянии $\epsilon_{вж} = \alpha_{вж}(t_3 - t_{ликв})$ проявляется в понижении уровня жидкого металла в форме и ответственна за формирование концентрированной усадочной раковины, которая образуется в местах отливки, затвердевающих в последнюю очередь.

Усадка при затвердевании $\epsilon_{вз}$ связана с изменением объема отливки при затвердевании сплава в интервале $t_{ликв} - t_{солид}$. При этом протекает усадка жидкого металла $\epsilon_{вжж}$, объем которого сокращается от начальной величины V_0 до 0; усадка металла при изменении агрегатного состояния $\epsilon_{взм}$, которая для каждого сплава является величи-

ной практически постоянной; усадка твердого металла, объем которого увеличивается от 0 до конечной величины V_T , увеличение объема металла (предусадочное расширение) ε_{vp} , связанное с выделением газов, расширением кристаллического каркаса из-за разогрева отливки в момент отхода от стенок формы, капиллярным давлением жидкости в двухфазной зоне, выделением графита в чугунах. Общая относительная величина усадки при затвердевании равна:

$$\varepsilon_{vз} = \frac{1}{2} \alpha_{vж} \Delta t_{лит} + \varepsilon_{ви} - \varepsilon_{vp}.$$

По влиянию на формирование усадочных дефектов усадку в интервале $t_{ликв} - t_{н.ж}$ ($t_{н.л.у}$) можно отнести к усадке в жидком состоянии. Для чистых металлов и эвтектических сплавов: $\varepsilon_{vз} = \varepsilon_{va} - \varepsilon_{vp}$.

В процессе усадки при затвердевании формируются дефекты в виде газоусадочной пористости, образующейся в результате усадки изолированных небольших объемов жидкого металла и проникновения в образовавшиеся мелкие пустоты растворенных газов. Газоусадочная пористость может быть рассеянной, поражающей весь объем отливки, и зональной, сосредоточенной в отдельных зонах или частях отливки.

Усадка в твердом состоянии:

$$\varepsilon_{vT} = \alpha_{vT} (t_{солид} - t_R),$$

где t_R — конечная температура охлаждения отливки $\varepsilon_{vT} = 3\varepsilon_{л}$, где $\varepsilon_{л}$ — линейная (свободная) усадка, характеризующая свойства самого сплава и определяющая разницу между первоначальными (до заливки металла) линейными размерами полости формы и размерами отливки после ее охлаждения до температуры t_R . Линейная усадка начинает реализовываться при достижении сплавом $t_{нж}$ ($t_{н.л.у}$) или $t_{солид}$.

При разработке технологии получения отливки и изготовлении модельного комплекса учитывается линейная (действительная) усадка $\varepsilon_{лит}$, характеризующая изменение размеров отливки $l_{отл}$ по сравнению с размерами модели $l_{мод}$:

$$\varepsilon_{лит} = \frac{l_{мод} - l_{отл}}{l_{отл}} \cdot 100, \%$$

Охлаждение жидкого металла, его затвердевание, а также последующее охлаждение в твердом состоянии связаны с сокращением

объема. До тех пор пока металл, залитый в форму, не образовал по внешнему контуру твердой корки и пока он сохраняет подвижность, уменьшение его объема понижает уровень жидкости в верхней части формы: в вертикальном литниковом канале, выпоре или прибыли (рис. 32, *а*). После образования на поверхности металла непрерывной корки (рис. 32, *б*) объем жидкости продолжает уменьшаться при охлаждении до температуры ликвидуса. Усадка расплава и уменьшение его объема при переходе из жидкого состояния в твердое превышает усадку корки, поэтому в определенный момент сплав отделяется от верхней затвердевшей корки и опускается (рис. 32, *в*). В следующий период происходит кристаллизация жидкого металла слоями внутри жидкой корки, пока не затвердеет последняя часть отливки. В результате образуется раковина (рис. 32, *г*). При дальнейшем охлаждении объем отливки несколько уменьшается, и при этом сокращается объем раковины (рис. 32, *д*). Если в раковине образуется разряжение (при непоступлении в нее газов из металла), то тонкая корка может прогнуться внутрь раковины.

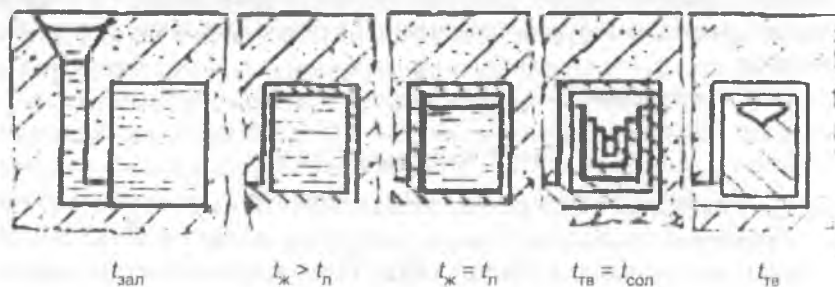


Рис. 32. Схема образования раковин

Описанный механизм образования раковин характерен для отливок из чистого металла или эвтектического сплава.

Значительно более сложен процесс образования усадочных полостей в отливке из сплава, затвердевающего в интервале температур. Образование усадочной раковины в отливках из таких сплавов (стали, ковкого чугуна) сопровождается образованием усадочной пористости, механизм образования которой описан при рассмотрении соответствующего дефекта (п. 4.9).

Размеры усадочной раковины зависят: от коэффициентов объемного сжатия охлаждающейся жидкости, металла при переходе его из

жидкого состояния в твердое и металла в твердом состоянии при его охлаждении; от величины температурного градиента по сечению отливки. Чем больше окажется разность температуры во внутренней и наружной, только что затвердевшей части отливки, тем большим будет объем усадочной раковины. На разность температур между наружной и внутренней частями отливки влияют теплопроводность формы и температура заливки. Чем больше теплопроводность формы, тем больший объем усадочной раковины при прочих равных условиях.

Рассмотренный пример образования усадочной раковины относится к железоуглеродистым сплавам, которые кристаллизуются и остывают только с уменьшением объема, т. е. без роста отливок. Рост отливок наблюдается в графитизирующихся сплавах — серых чугунах и чугунах со сфероидальным графитом. Рост чугуна связан с выделением свободного графита.

При кристаллизации в поверхностном слое протекают процессы с противоположными изменениями объема металла: усадки от понижения температуры и роста от эвтектической кристаллизации с выделением графита. Результирующий эффект может привести к росту или уменьшению объема затвердевшей отливки. Дальнейшие этапы кристаллизации отливки также связаны с противоположным действием двух процессов — усадки и роста.

Склонность серого чугуна к усадке зависит от содержания в нем углерода. Повышенное содержание углерода (выше эвтектического) изменяет соотношение между усадкой и его ростом при графитизации. К положительному эффекту эвтектической графитизации прибавляется эффект от выделения первичного графита. В этом случае создаются условия, при которых компенсируется объемная усадка, и отливка увеличивается в объеме (предусадочное расширение). Чем больше содержание углерода, тем меньше вероятность образования усадочной раковины. В доэвтектических чугунах содержание углерода недостаточно для образования фаз, компенсирующих объемную усадку.

Механизм образования усадочной раковины в чугунах с шаровидным графитом связан с особенностями эвтектической кристаллизации. Магний сфероидизирует графитовые включения и уменьшает скорость их образования. Замедленная эвтектическая кристаллизация проходит как по стабильному, так и по нестабильному вариантам диаграммы железо—углерод с образованием отбела. Образующийся

цементит нестабилен и при повышенном содержании кремния разлагается на аустенит и графит, поэтому в чугунах с шаровидным графитом графитовая фаза образуется как из жидкого металла, так и путем распада цементита. Уменьшенная скорость образования графитовых включений замедляет рост металла, а распад цементита с выделением графита приводит к значительному расширению затвердевающих слоев отливки и соответственно увеличению усадочной полости, поэтому чугун с шаровидным графитом имеет повышенную склонность к образованию усадочной раковины. Графитизирующие факторы (медленное охлаждение, повышенное содержание углерода, кремния и т. д.) уменьшают склонность чугуна к образованию усадочной раковины. Факторы, препятствующие графитизации (повышенное содержание магния, быстрая скорость охлаждения и др.), увеличивают относительную часть кристаллизации по метастабильной системе и, следовательно, повышают склонность чугуна к образованию усадочных раковин.

Относительная величина усадочной раковины различна для разных сплавов. Например, объем усадочной раковины в отливках из стали составляет 3—10 % от начального объема сплава, из серого чугуна — 1,5—2,5 %, модифицированного чугуна — 2—3,5 %, белого чугуна — 2,5—6 %, чугуна с шаровидным графитом — 0—13 %.

Таким образом, можно заключить, что на объем усадочной раковины влияют следующие факторы:

- коэффициент усадки металла или сплава в жидком состоянии, который зависит от их химического состава;
- температура жидкого металла или сплава к началу затвердевания отливки (чем выше эта температура, тем больше объем усадочной раковины);
- величина усадки при затвердевании, зависящая от состава сплава;
- степень графитизации чугунов (чем больше в чугуне графитизирующих элементов, тем меньше его усадка);
- податливость формы и стержня (чем податливее форма и стержень, тем больше усадка, и наоборот).

Усадочная раковина образуется вследствие недостаточности питания отливки в процессе кристаллизации. Основными причинами образования усадочных раковин являются нетехнологичность конструкции литой детали (наличие утолщений и местных скоплений сплава); неправильное питание отливки; отсутствие или неправильное расположение холодильников; неправильные размеры или не-

правильное расположение прибылей; заливка чрезмерно горячим металлом; высокая скорость заливки; повышенная усадка сплава.

Для предупреждения образования усадочных раковин необходимо обеспечить бесперебойное питание жидким металлом всех мест скопления металла в отливке. Для отливок с разной толщиной стенок без применения прибыли металл следует подводить в тонкую часть отливки, наиболее удаленную от толстой; для отливок с резко отличающимися по толщине стенками металл следует подводить через питающую бобышку или прибыль в наиболее толстую часть отливки. Предупреждению образования усадочных раковин также способствуют: установка достаточного числа холодильников для охлаждения тепловых узлов, питание которых затруднено; установка литниковых стояков, обеспечивающих достаточный металлостатический напор; выдерживание металла в ковше; установка соответствующих прибылей (в том числе прибылей с избыточным давлением).

4.5. Песчаные раковины

Песчаная раковина — дефект в виде полости, частично или полностью заполненной формовочным материалом.

Песчаные раковины могут располагаться как на поверхности отливок, так и внутри и образуются в результате нарушения целостности формы и стержней, которое происходит по следующим причинам:

- использование некачественных формовочных и стержневых смесей;
- неравномерное и недостаточное уплотнение смеси;
- недостаточное крепление выступающих частей формы;
- применение неисправной модельно-опочной оснастки;
- неисправность формовочных машин;
- неправильное устройство литниковой системы.

Местоположение, размер и число песчаных раковин зависят от места и характера разрушения формы. Нередко разрушение формы сопровождается образованием нароста, а также происходит в результате ее размыва при неправильной конструкции литниковой системы и нарушении правил заливки формы расплавленным металлом (заливка струей металла с большой высоты, перерыв струи металла и др.).

Размыв формы уменьшается с упрочнением ее поверхностного слоя. Прочность песчано-глинистых смесей для сырой формовки в зависимости от способа уплотнения следующая [8] (табл. 6).

Таблица 6. Прочность песчано-глинистых смесей для сырой формовки

№ п/п	Способ уплотнения	$\sigma_{сж}$, МПа
1	Встряхивание	0,04—0,06
2	Встряхивание с прессованием	0,05—0,16
3	Пескодувно-прессовое	0,1—0,22
4	Прессование	0,06—0,12
5	Воздушно-импульсное	0,05—0,1
6	Газо-импульсное	0,08—0,16

Основными мероприятиями по предупреждению образования песчаных раковин являются: правильный выбор состава формовочных и стержневых смесей в зависимости от характера производства, сплава и размеров отливки; качественная разработка и строгое выполнение технологии изготовления форм и стержней; увеличение поверхностной прочности формы; выбор правильной конструкции литниковой системы; правильное выполнение формовочных уклонов и галтелей при изготовлении моделей и стержневых ящиков; содержание в порядке модельной оснастки (поверхность модели не должна иметь трещин, царапин, сколов и других дефектов, которые могут вызвать разрушение или повреждение формы). Конструкция литниковой системы не должна допускать высокой скорости движения металла в форме, а питатели следует располагать так, чтобы при заливке струя металла не ударяла в противоположные стенки формы и в стержень.

4.6. Шлаковые раковины

Шлаковая раковина (н.д.п.: *шлак*) — полость, частично или полностью заполненная шлаком.

Размеры и форма шлаковых раковин очень разнообразны. Они могут быть открытыми, расположенными на поверхности отливки, и закрытыми.

Шлаковые раковины возникают из-за проникновения шлака во время заливки в полость формы вместе с металлом. Это происходит при нарушении технологии заливки форм расплавленным металлом, при неправильной конструкции литниковой системы и т. д. Шлак имеет плотность $(2,8—3,2) \cdot 10^3$ кг/м, т. е. он значительно легче расплавленного металла и всплывает в нем. Во время плавки необходимо добиваться высокого перегрева металла, так как вязкость металла при этом понижается и частицы шлака легче всплывают на поверхность.

Всплыванию шлака способствует выдержка его в разливочных ковшах перед заливкой в формы.

Чтобы шлак не выходил из литейного ковша со струей металла, необходимо применять стопорные и чайниковые ковши. Однако при использовании крупных, особенно крановых литейных ковшей, этих мер недостаточно. Предотвратить попадание шлака в полость формы вместе со струей металла должна литниковая система. С этой целью в ней предусматривают специальные шлакоулавливающие элементы: литниковые чаши с перегородками и пробками, шлакоуловитель, фильтровальные сетки. Все эти элементы наиболее полно выполняют свою функцию при заполненной литниковой системе, когда выдержано условие:

$$F_c > F_{\text{шл}} > F_n,$$

где F_c — площадь поперечного сечения стояка;

$F_{\text{шл}}$ — площадь поперечного сечения шлакоуловителя;

F_n — суммарная площадь сечения питателей.

Соотношение между сечениями отдельных элементов выбирают в зависимости от способности расплава переходить от ламинарного движения в турбулентное, от эрозионной устойчивости формы, жидкотекучести сплава, конструкции отливки и т. д.

По сравнению с чугуном сталь создает поток с большей турбулентностью, что затрудняет улавливание шлака.

Улавливание шлака начинается в литниковой чаше. С этой целью применяют пробки (рис. 33), которые извлекают после заполнения чаши металлом, одновременно обеспечивая необходимый уровень металла в чаше. Пробки делают из шамота, а для небольших отливок применяют чугунные пробки, обмазанные огнеупорным составом.

На рис. 34 изображены литниковые чаши с перегородками. В чаше (рис. 34, а) шлак остается наверху, а металл поступает в отвер-

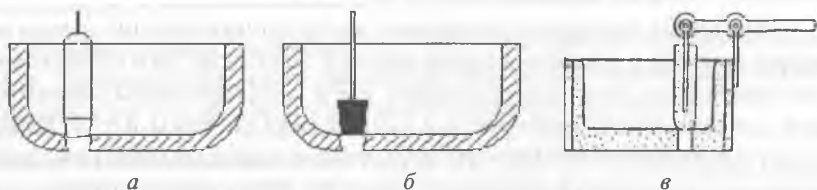


Рис. 33. Литниковые чаши с пробками:

a — с шамотной пробкой; *б* — с чугунной; *в* — чаша вмещает весь объем металла отливки

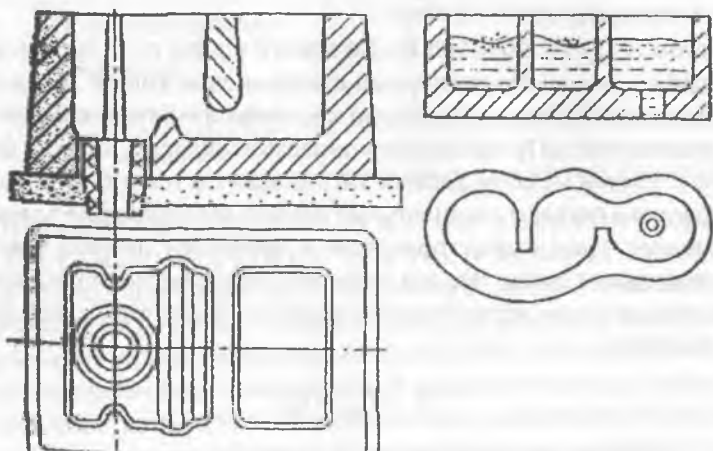


Рис. 34. Литниковые чаши с перегородками

стие снизу. Чаша (рис. 34, б) обеспечивает центробежное движение металла и улавливание шлака.

Металл в шлакоуловителях движется турбулентно. При таком движении свободное всплывание шлака затрудняют силы, действующие в вертикальном направлении, поэтому длина шлакоуловителя должна быть достаточной, чтобы шлак успел всплыть. Путь, который должна пройти частица, чтобы всплыть на зеркало металла в шлакоуловитель, равен:

$$L = h \cdot 1,2 \cdot v_m / v_{ш},$$

где h — высота шлакоуловителя, м;

v_m — скорость металла в шлакоуловителе, м/с;

$v_{ш}$ — вертикальная составляющая скорости всплытия шлака, м/с.

Из формулы видно, что чем больше скорость металла, тем длиннее должен быть путь движения металла в литниковой системе. Это условие обеспечивается при расстоянии от стояка до первого питателя 50—150 мм [1]. При большем расстоянии металл охлаждается и насыщается газами.

Хорошее улавливание шлака достигается применением дроссельных литниковых систем, центробежных шлакоуловителей, шлакоуловителей с верхней перегородкой, фильтровальных сеток. Конструкция и размеры этих элементов приведены в работе [7] и др.

Применение указанных способов улавливания шлака и соблюдение правил заливки (непрерывная струя при полностью заполненной литниковой системе) позволяют избежать образования шлаковых раковин.

4.7. Залитый шлак

Залитый шлак (ндп.: *шлак*) — дефект в виде частичного заполнения литейной формы шлаком.

В этом случае образуются не отдельные шлаковые включения в виде шлаковых раковин, а слой шлака в верхних частях полости формы. Этот дефект поражает значительные части отливки. Образование дефекта «залитый шлак» возможно при сливе из ковша остатков металла вместе со шлаком (наиболее вероятно при сливе стали из стопорного ковша).

4.8. Графитовая пористость

Графитовая пористость (ндп. *течь*) — дефект отливок из серого чугуна в виде сосредоточенных или паукообразных выделений графита, вызывающих неплотности металла при испытании гидравлическим или газовым давлением.

Этот дефект наблюдается в отливках из серого чугуна.

Связь графита с составляющими металла — ферритом, аустенином или цементитом — очень слабая. Графитовая пористость усугубляется неравномерным изменением размеров отдельных фаз при нагреве и охлаждении из-за различных величин коэффициентов термического расширения составляющих графита, аустенита, феррита, цементита.

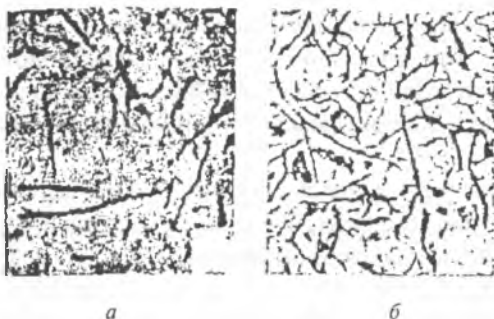


Рис. 35. Микроструктура с графитовыми включениями:
а — изолированные включения; *б* — соединенные

Графитовой пористостью можно пренебрегать, если включения графита изолированы друг от друга (рис. 35, *а*). Это характерно для чугунов с малым содержанием углерода. В эвтектических и заэвтектических чугунах графитовые включения переплетаются, что сказывается на герметичности отливок (рис. 35, *б*). Такие отливки нельзя термообрабатывать в соляных ваннах, так как соляной раствор проникает в металл по графитовым включениям, и металл корродирует. Уменьшить вероятность негерметичности отливок можно увеличением скорости охлаждения.

4.9. Усадочная пористость

Усадочная пористость (ндп.: *течь*) — дефект в виде мелких пор, образовавшихся вследствие усадки металла во время его затвердевания при недостаточном питании отливки.

К концу затвердевания центральной части отливки количество изолированных участков жидкого металла и как следствие пор весьма велико (рис. 36).

Различают пористость рассеянную, осевую и местную.

Местная пористость образуется в тепловых узлах отливки.

Рассеянная пористость равномерно рассредоточена по большей части объема отливки. Развивается при затвердевании массивных отливок из сплавов с большим температурным интервалом затвердевания (например, стали и ковкого чугуна). Когда температура поверхностных слоев достигает линии ликвидуса, начинается образо-

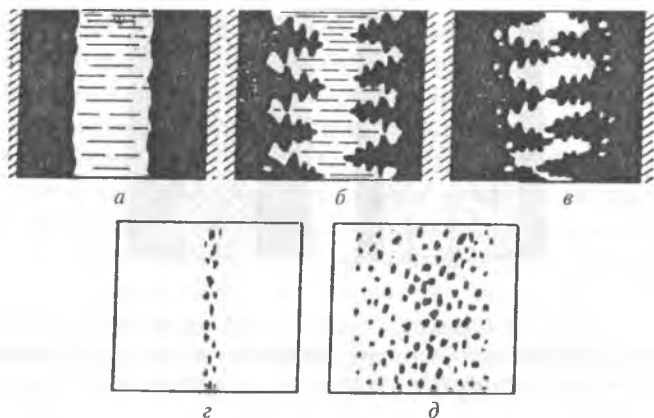


Рис. 36. Характер кристаллизации различных сплавов:

а — серые чугуны, затвердевающие в небольшом интервале температур; *б* — сталь, затвердевающая в широком интервале температур; *в* — объемы жидкого металла между кристаллами, изолированные от питающего узла отливки; *г* — осевая усадочная пористость в чугунной отливке; *д* — рассеянная усадочная пористость в стальной отливке

вание кристаллизационной зоны. Образующиеся в интервалах между температурами ликвидуса и солидуса кристаллы аустенита разрастаются и создают отдельные замкнутые объемы, заполненные жидким металлом. Этот металл, остывая и не имея подпитки, образует мелкие усадочные поры, распределенные по всему объему.

Осевая пористость образуется в центральной части отливки, а также в длинных сечениях. При охлаждении сплава кристаллизация происходит в переходной двухфазной области, постепенно перемещающейся от периферии к центру отливки.

Если жидкость, находящаяся в горячей части отливки, проникает к местам кристаллизации за счет капиллярных сил и компенсирует усадку твердеющего сплава, то в этих слоях образуется плотный металл без усадочных пор (рис. 37). Однако циркуляция жидкости внутри переходной области может происходить достаточно интенсивно до смещения в центр переходных зон, развивающихся с разных сторон. После того как циркуляция в переходной области прекращается или замедляется, перемещение жидкого сплава к местам кристаллизации затрудняется, и в соответствующих местах отливки образуются усадочные поры. Эти поры располагаются в осевой центральной части отливки.

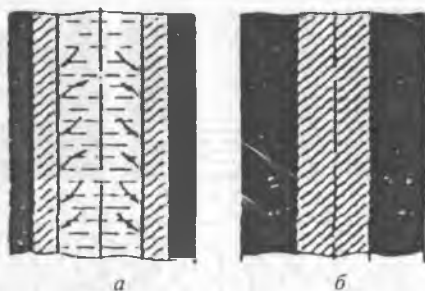


Рис. 37. Схема образования осевой пористости:

а — жидкий сплав проникает в переходную область отливки; *б* — сплав в центре отливки кристаллизуется без поступления жидкого сплава извне

На образование усадочной пористости существенное влияние оказывает фосфор. В сером чугуна содержание фосфора может достигать 0,3—0,4 %. Фосфор образует с железом и углеродом легкоплавкую тройную фосфидную эвтектику ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}-\text{Fe}_3\text{P}$), кристаллизующуюся при температуре 950 °С. Поэтому отдельные микроучастки отливки, занятые фосфидной эвтектикой, остаются в жидком состоянии после кристаллизации основы отливки. При кристаллизации эвтектики ее объем уменьшается, и образуются усадочные поры. При низком содержании фосфора поры разобщены, при высоком содержании фосфора создаются условия для соединения усадочных пор и отливки получают негерметичными.

Для предотвращения образования усадочной пористости применяются те же меры, которые направлены на предупреждение образования усадочных раковин. Эти меры сводятся к созданию направленного затвердевания от отдаленных частей отливки к источнику питания и обеспечению условий достаточного питания жидким сплавом. Это достигается рациональным выбором места подвода металла и применением прибылей, особенно работающих под давлением.

4.10. Газовая пористость

Газовая пористость (ндп.: *ситовидная пористость, течь*) — дефект в виде мелких пор, образовавшихся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании.

Основной причиной образования мелких газовых пор является растворенный в расплавленном металле водород, образующий много мелких сферических раковин. Как показали исследования [14], для образования водородной пористости в сером чугуне содержание водорода должно превышать 0,0001 %. Однако ГОСТ 19200—80 и литература, использованная при написании данного пособия, не дают ответа на вопрос, каков размер пор, называемых в определении мелкими. На основании анализа данных различных литературных источников можно, видимо, ориентировочно считать, что мелкий газовой порой является пора размером до 3 мм.

Причиной образования газовых пор может быть и растворенный в металле азот. В этом случае поры имеют вид трещины в виде запятой.

4.11. Рыхлота

Рыхлота — скопление мелких усадочных раковин. Обнаруживается при механической обработке отливки или методами дефектоскопии.

Представляет собой губчатую структуру, резко снижающую физико-механические свойства отливки (рис. 38).

Кажущаяся безупречно плотной разрезанная отливка может иметь микроусадочные раковины. Эти мельчайшие раковины можно обнаружить при механической обработке и методами дефектоскопии.

Рыхлота очень часто располагается в зоне, находящейся под усадочной раковиной, поэтому при применении прибылей их размеры следует выбирать с учетом того, чтобы в прибыльной части оказалась и рыхлота.

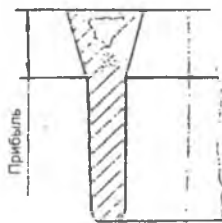


Рис. 38. Усадочная раковина и рыхлота

4.12. Непровар жеребеек (холодильников)

Непровар жеребеек (холодильников) — несплошности соединения металла отливки с поверхностью жеребеек (холодильников) из-за их загрязнения, несоответствия массы, низкой температуры закаливаемого металла.

Кроме причин, указанных в определении дефекта, к его образованию может привести близкое расположение жеребеек или холодильников к поверхности отливки или смещение к стенкам формы.

Существенно влияют на образование данного дефекта условия свариваемости внутренних холодильников с металлом отливки. Вредное влияние на свариваемость холодильников оказывают окислы железа — ржавчина и окалина. Даже после полной очистки поверхности холодильников может произойти вторичное окисление их на воздухе. Холодильники следует тщательно очищать в дробильной камере. Вторичная окисная пленка расплавляется при нагреве холодильника заливаемой сталью до температуры, близкой к температуре солидуса.

При выборе размеров холодильника следует учитывать, что если внутренний холодильник имеет слишком большой диаметр, он не сваривается с основным металлом, а если диаметр слишком мал, то холодильник будет расплавлен заливаемым металлом и не выполнит своего назначения.

Выбор размеров внутренних холодильников производится в соответствии с табл. 7.

Таблица 7. Размеры внутренних холодильников

Тип сопряжения	Диаметр внутреннего холодильника в зависимости от толщины основной стенки, %
L-образный	27
T-образный	50
X-образный	70

Более подробные рекомендации по размерам приведены в работе [13].

Дополнительными мерами предупреждения не провара являются: расположение холодильников в центральной части теплового узла отливки; соединение сваркой составных частей холодильника пространственной конструкции; преимущественное применение холодильников в частях отливки, которые вместе с холодильником удаляются при механической обработке; утолщение тела отливки в местах расположения жеребеек путем устройства отдельных приливов, срезаемых при обработке отливки.

4.13. Вскип

Вскип (ндп.; *кип*) — скопление раковин и наростов, образовавшихся вследствие парообразования в местах переувлажнения литейной формы или проникновения газов из стержней в полость литейной формы.

Основные причины образования вскипа: повышенная влажность формы или стержня; излишне большой и недостаточно просушенный слой краски; местное переуплотнение формы и высокая газотворная способность смесей; недостаточно эффективная вентиляция формы и стержней; применение влажных и окисленных жеребеек и холодильников.

Меры предупреждения образования вскипа заключаются в организации контроля смесей, форм и стержней, жеребеек и холодильников с целью устранения указанных причин.

4.14. Утяжина

Утяжина (ндп.: *утяжка*) — углубление с закругленными краями на поверхности отливки, образовавшееся вследствие усадки при затвердевании.

Образуется чаще всего в местах, примыкающих к тепловым узлам отливки.

Утяжина может сопровождаться образованием различных усадочных дефектов внутри отливки.

Если при затвердевании отливки в усадочной раковине образуется разряжение, то тонкая корка может прогнуться внутрь под действием атмосферного давления и образовать утяжину.

В случаях, когда отливка имеет развитые плоские поверхности и закрытую прибыль, в начальной стадии затвердевания поверхностная корка может полностью изолировать внутреннюю часть отливки (рис. 39).

В форме за счет выделения газов из формовочной смеси возникает давление, равное или больше атмосферного. Вследствие этого корка на плоских поверхностях прогибается как мембрана. В результате уровень металла в прибыли не опускается. При утолщении и охлаждении поверхностной корки она остается жесткой и перестает прогибаться. Усадочная раковина получается из-за малого гидравлического

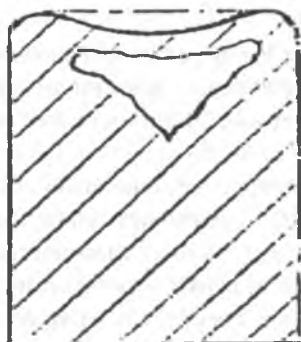


Рис. 39. Утяжина

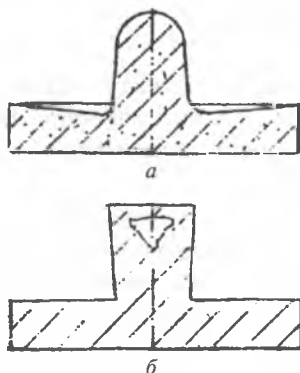


Рис. 40. Влияние атмосферного давления на образование утяжины:
а — закрытая прибыль; б — открытая прибыль

давления металла для нормального питания отливки при отсутствии воздействия атмосферного давления. Полученное на отливке углубление с закругленными краями является утяжиной, которая в данном случае сопровождается усадочной пористостью (рис. 40, а).

Для предотвращения указанных явлений необходимо применять меры, обеспечивающие атмосферное давление в усадочной раковине, т. е. применять открытые прибыли (рис. 40, б) — атмосферные или газовые.

Глава 5

ДЕФЕКТЫ ОТ ВКЛЮЧЕНИЙ

5.1. Металлические включения

В группу «*Включения*» входят три дефекта.

Металлическое включение — инородное металлическое включение, имеющее поверхность раздела с отливкой.

Металлические включения образуются при неполном растворении в расплаве металлических примесей, вводимых в ковш или в литейную форму. Они возникают в результате нерастворения ферросплавов, особенно с высокой температурой плавления таких, как феррохром, ферромolibден и др. Образование металлических включений при введении ферросплавов в ковш происходит в том случае, если они вводятся в ковш перед заливкой, когда не остается времени для их расплавления.

5.2. Неметаллические включения

Неметаллическое включение (ндп.: *черные пятна*) — дефект в виде неметаллической частицы, попавшей в металл механическим путем или образовавшейся вследствие химического взаимодействия компонентов при расплавлении и заливке металла.

Эндогенные включения могут образовываться в результате взаимодействия компонентов сплава с примесями, футеровкой печи и ковшей, окружающей атмосферой. Экзогенные включения образуются вследствие механического захвата металлом частиц, образовавшихся вне расплава (частицы огнеупоров, материала формы и стерж-

ней, шлака). Эндогенные включения состоят главным образом из оксидов, сульфидов и нитридов, экзогенные — из сложных оксидов металлов и неметаллов, силицидов и некоторых других соединений. Экзогенные включения могут частично или полностью прореагировать с компонентами сплава и фактически превратиться в эндогенные включения. По внешней форме включения могут быть глобулярные (сферические), кристаллические, дендритные, пленочные и неправильной формы. Экзогенные включения отличаются неправильной угловатой формой, большими размерами и сложной структурой.

Легкоплавкие эндогенные неметаллические включения, растворимые в основе сплава в жидком состоянии, формируются как самостоятельная фаза только при кристаллизации сплава. Тугоплавкие нерастворимые или малорастворимые эндогенные включения могут существовать в жидком металле в виде мелких частиц. Изменение скорости охлаждения практически не влияет на количество, форму и размеры малорастворимых включений (например, оксидов в стали), а увеличение скорости охлаждения и как следствие скорости кристаллизации сплава способствует измельчению и уменьшению объемной доли растворимых включений (например, сульфидов в стали).

При длительной выдержке расплава тугоплавкие включения могут укрупняться за счет процесса объединения. В большинстве случаев они имеют кристаллическую или глобулярную форму и располагаются в теле отливки сравнительно равномерно. Иногда они могут служить центрами кристаллизации новой фазы (например, графита в чугунах) и тогда играют положительную роль. Легкоплавкие включения часто образуют с компонентами сплава легкоплавкие эвтектики, располагающиеся по границам зерен и резко снижающие механические свойства сплава (рис. 41).

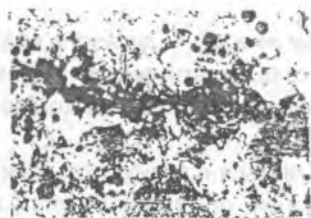


Рис. 41. Неметаллические включения в отливках из чугуна с шаровидным графитом

Их размеры меньше размеров песчаных шлаковых включений. Некоторые неметаллические включения, например в стали, неизбежны, и их следует оценивать как дефекты самого процесса. Аналогичные включения есть и в чугуне, но они мало меняют его свойства, так как основное влияние на свойства чугуна оказывают включения графита.

Неметаллические включения в застывшем сплаве являются телами, на-

рушающими сплошность и единообразие структуры. Тугоплавкие для данного сплава включения обычно располагаются внутри кристаллов, а легкоплавкие входят в эвтектические «сетки» и располагаются по границам зерен. Количество, форма и распределение включений сказываются на механических свойствах стали и высокопрочного чугуна. Если включения имеют острые углы, то они действуют как концентраторы напряжений и ухудшают механические свойства. Включения в сером чугуне мало изменяют его свойства, так как основное влияние на свойства этого чугуна оказывают включения графита.

Различают три основных источника неметаллических включений:

1. Особенность технологического процесса приготовления сплавов и их последующей кристаллизации. Часть неметаллических включений имеется в шихтовых материалах. Если при расплавлении они растворяются в сплаве, то при понижении температуры во время кристаллизации эти элементы выделяются из раствора в виде мельчайших частичек и образуют неметаллические включения (растворимыми являются оксиды FeO и сульфиды FeS и MnS).

2. Химические реакции, происходящие в сплаве (например, при раскислении). В результате образуются нерастворимые в сплаве вещества (оксиды MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , нитриды и др.). Возможно образование оксидных включений при разливке в результате вторичного окисления.

3. Частицы шлака, футеровки печей, желоба, ковшей, а также литниковой системы и формы.

Часть неметаллических включений всплывает из сплава в печи и ковше, часть при благоприятных условиях может всплыть в прибыль или сконцентрироваться в верхних горизонтальных слоях отливок, удаляемых при последующей механической обработке. Скорость всплывания частиц определяется уравнением Стокса:

$$v = (2g/9h)r^2(p_m - p_{\text{вкл}}).$$

где v — скорость всплывания включений, м/с;

g — ускорение силы тяжести, м/с²;

r — радиус частицы, м;

p_m и $p_{\text{вкл}}$ — плотность металла и включения, кг/м³;

h — динамическая вязкость металла, Па·с.

Из формулы следует, что скорость всплывания падает с повышением вязкости расплава; так как вязкость расплава понижается с по-

вышением температуры, то всплывание неметаллических включений происходит легче при повышенной температуре расплава.

Эффективными мерами для удаления неметаллических включений из сплавов являются продувка их нейтральными газами и фильтрация.

При продувке расплава нейтральным газом пузырьки его прилипают к поверхности частиц неметаллических включений и облегчают всплывание их на поверхность.

При фильтрации сплав пропускают через пористую среду, которая может либо просто отфильтровать неметаллические включения, либо задержать их вследствие химического взаимодействия с ними.

Следует заметить, что в научно-технической практике и в литературе широко применяют термин «черные пятна», который, согласно ГОСТу 19200—80, является недопустимым. Под этим термином обычно понимают скопления неметаллических шлаковых включений сложного состава, образующихся в отливках из высокопрочного чугуна, модифицированного магнием. Эти включения имеют вид чешуек и пленок толщиной 0,001—0,05 мм (обычно 0,01 мм) и длиной 0,01—10 мм (обычно 1—2 мм) [15]. Особенно часто они наблюдаются в доэвтектическом чугуне (рис. 41). В состав этих неметаллических включений входят MgO , MgS , Mg_2SiO_4 (форстерит) и др. С увеличением содержания магния, кремния и серы увеличивается возможность появления указанных неметаллических включений.

Для предотвращения появления неметаллических включений в высокопрочном чугуне используют криолит (Na_3AlF_6), под влиянием которого шлак разжижается. Температура заливки чугуна должна быть не ниже 1420 °С.

5.3. Корольки

Королек (ндрп.: *выпот*) — дефект в виде шарика металла, отдельно застывшего и не сплавившегося с отливкой. Образуется брызгами при неправильной заливке.

Этот дефект характерен для чугунных отливок. Может быть расположен в открытых или закрытых полостях.

При разбрызгивании металла капли, попадающие на холодные части формы, затвердевают в виде шариков. К разбрызгиванию металла могут привести застывший шлак на носике ковша, большая вы-

сота струи, конструкция литниковой системы, допускающая раздробление потока металла. Если поверхность королька окислится, то при контакте с жидким металлом эта пленка, состоящая из Fe_3O_4 , реагирует с углеродом металла с образованием окиси углерода. Образующаяся из окиси углерода газовая прослойка не позволяет корольку расплавиться. В результате возможно образование газовой раковины с корольком.

При литье в сырые формы может произойти взрывоподобное испарение влаги с образованием брызг металла, поэтому снижение влаги в сырых формах уменьшает вероятность образования корольков. В сухих формах корольки образуются в тех случаях, когда стержень и форма собраны горячими, а при остывании на них конденсируется влага. Особенно склонны к образованию корольков отливки, полученные в металлических формах, в которых происходит быстрое охлаждение брызг металла.

Образование корольков резко снижается при создании в форме восстановительной атмосферы. Такая атмосфера возникает после заливки в форму лишь части металла, что предотвращает образование корольков в начале заливки.

Глава 6

ДЕФЕКТЫ — НЕСООТВЕТСТВИЕ ПО СТРУКТУРЕ

6.1. Отбел

Группа «*Несоответствие по структуре*» включает четыре вида дефектов

Отбел (ндрп.: *твердые места*) — дефект в виде твердых, трудно поддающихся механической обработке мест отливки из серого чугуна, вызванных скоплением структурно свободного цементита.

При высокой скорости охлаждения продолжительность пребывания сплава в жидком состоянии настолько сокращается, что выделение углерода из жидкой фазы и раздельная кристаллизация графита и аустенита происходят не в полной мере, в результате кристаллизации фаза обогащается железом. В этом случае наряду с аустенитом кристаллизуются карбиды — цементит. Такое торможение кристаллизации графита может привести к образованию в отдельных частях отливки из серого чугуна участков белого чугуна (со скоплением структурно свободного цементита).

Наиболее вероятно появление отбела в тонких стенках отливок в местах, наиболее удаленных от стояка.

Причинами появления отбела могут явиться пониженное содержание углерода и кремния и повышенное содержание карбидообразующих элементов. Появлению отбела способствует повышенное содержание в чугуне серы из кокса при плавке металла в вагранках.

К образованию отбела могут привести низкая температура заливки чугуна, высокая скорость охлаждения залитого металла, повышен-

ная влажность смеси, неправильный выбор и установка холодильников, неправильный подвод металла (в толстую часть отливки).

Предотвратить появление отбела можно устранением указанных причин, а уменьшить опасность его появления — проведением эффективного модифицирования чугуна графитизирующими присадками (ферросилицием, силикокальцием и др.). Устранить появившийся отбел можно графитизирующим отжигом.

6.2. Половинчатость

Половинчатость (ндрп.: *отсер*) — дефект в виде появления структуры серого чугуна в отливках из белого чугуна.

В белом чугуне весь углерод находится в виде цементита. В результате графитизирующего отжига белого чугуна получается ковкий чугун с высокими механическими свойствами. Наличие пластичного графита, характерного для серого чугуна, резко снижает механические свойства ковкого чугуна. Поэтому его наличие в металле отливки недопустимо. Дефект не устраняется термообработкой.

Причиной возникновения такой структуры является повышенное содержание углерода и кремния. Реже причиной служит модифицирование жидкого металла алюминием, повышенное содержание которого также может привести к частичному выделению пластинчатого графита.

Выделению пластинчатого графита может способствовать также замедленная скорость охлаждения отдельных участков отливки в форме, поэтому максимальная толщина стенок для отливок из ковкого чугуна составляет 50 мм (в редких случаях больше).

Для безусловного получения структуры белого чугуна в литье обязательным условием является рациональная конструкция отливок (равномерность толщины стенок, плавность переходов, устранение тепловых узлов и т. п.).

6.3. Ликвация

Ликвация — местное скопление химических элементов или соединений в теле отливки, возникающих в результате избирательной кристаллизации при затвердевании.

Причина ликвации заключается в различной растворимости отдельных компонентов сплава в его твердой и жидкой фазах. В железоуглеродистых сплавах заметно ликвируют сера, фосфор, углерод.

Ликвация вызывает неоднородность механических свойств в различных частях отливки. В зависимости от причин возникновения, размеров и характера распределения ликвационных зон различают:

- внутрикристаллическую (дендритную) ликвацию — неоднородность химического состава в микрообъемах сплава в пределах образования, выросшего из одного центра (кристалла, зерна);
- зональную ликвацию — неоднородность химического состава в макрообъемах (в пределах отливки в целом или отдельных ее частей);
- гравитационную ликвацию (ликвацию по плотности) — расслоение фаз сплава в жидком или жидкотвердом состоянии под влиянием сил тяжести.

Жидкую фазу, обогащенную ликвирующими компонентами, называют л и к в а т о м. Различие концентраций компонентов в твердой (C_t) и жидкой ($C_{ж}$) фазах оценивают коэффициентом распределения

$$K_p = C_t / C_{ж},$$

характеризующим ликвационные свойства сплава.

Количественно ликвация характеризуется степенью ликвации ΔC_l :

при зональной ликвации:

$$\Delta C_l = C_{лок} / C_o,$$

где $C_{лок}$ — концентрация элемента в микрообъеме; C_o — средняя концентрация элемента в сплаве);

при внутрикристаллической ликвации:

$$\Delta C_l = (C_k - C_n) C_o,$$

где C_k , C_n — соответственно конечная и начальная концентрация каждого элемента в пределах микрозерна.

Ликвация оценивается с помощью различных методов микрорентгеноспектрального анализа. Степень ликвации (дендритной и зональной) и характер распределения компонентов сплава в микро- и макрообъемах отливки зависят от свойств сплава, условий формирования отливки и условий охлаждения затвердевшей отливки в форме или в процессе последующей термической обработки. Характер рас-

предела ликвирующего элемента по дендритной ячейке (зерну) зависит от величины K_p . При $K_p < IC_{II} < C_k$ ликвирующий компонент обогащает периферию ячейки (зерна) — прямая дендритная ликвация; при $K_p > IC_{II} > C_k$ ликвирующий элемент обогащает центр ячейки (зерна) — обратная дендритная ликвация.

В период затвердевания в сплавах реализуются: разделительная диффузия — перераспределение компонентов на фронте раздела фаз; диффузия в жидкой фазе; диффузия в твердой фазе. При медленном охлаждении отливки вследствие достаточно полного развития диффузии в твердой и жидкой фазах ликвация практически отсутствует. В реальных условиях диффузия в твердой фазе протекает лишь частично, диффузия в жидкой фазе также тормозится, поэтому в той или иной степени ликвационные процессы всегда развиваются.

До определенного момента увеличение скорости охлаждения вызывает торможение диффузии в твердой фазе и увеличивает степень ликвации, однако очень высокие скорости охлаждения уменьшают степень ликвации из-за торможения всех диффузионных процессов, в том числе разделительной диффузии.

Ликват, первоначально образовавшийся в результате дендритной ликвации, под влиянием особенностей процесса формирования отливки распределяется по сечению отливки, образуя различного вида ликвационные зоны. Ликват перемещается под влиянием смещения фронтом растущих кристаллов к осевой части отливки; конвективного движения у фронта кристаллизации за счет градиента температуры и различной плотности; движения в капиллярах в области твердожидкого состояния в результате усадочных процессов, вызывающих его подсос или выжимание. При повышении концентрации компонентов в центральных участках (осевой зоне) отливки вследствие оттеснения ликвата фронтом растущих кристаллов реализуется прямая зональная ликвация. На величину осевой ликвации влияет не только величина K_p и степень развития диффузии в твердой и жидкой фазах, но и перемешивание расплава на фронте кристаллизации, что увеличивает ΔC в осевой зоне. Диффузия в твердой фазе протекает лишь частично, диффузия в жидкой фазе также тормозится, поэтому в той или иной степени ликвационные процессы всегда развиваются. До определенного момента увеличение скорости охлаждения вызывает торможение диффузии в твердой фазе и увеличивает степень ликвации, однако очень высокие скорости охлаждения уменьшают степень ликвации

из-за торможения всех диффузионных процессов, в том числе разделительной диффузии.

Различают дендритную ликвацию, которая проявляется в микрообъемах сплава, близких к размерам зерен, и зональную — наблюдаемую во всем объеме отливки.

При дендритной ликвации химическая неоднородность отдельных дендритов сплава возникает вследствие избирательной кристаллизации: растущие первыми оси дендритов содержат меньшее количество примесей, чем исходный сплав, а остающийся в межосных пространствах жидкий сплав обогащается примесями. При дендритной ликвации содержание примесей растет от центра зерна к его границе.

Зональная ликвация — это химическая неоднородность сплава в различных частях затвердевающей отливки. Механизм развития зональной ликвации может быть двояким.

При выделении кристаллов с пониженным содержанием ливирующего элемента этот элемент скапливается в жидкости, окружающей кристалл, из-за значительной разницы в концентрации элемента внутри жидкости переходной зоны и в составе маточного расплава, а в центре отливки происходит диффузия элемента к центру отливки, что вызывает зональную ликвацию. Это объяснение справедливо для очень медленного затвердевания, когда для массопереноса диффузией имеется достаточно времени.

В реальных отливках зональная ликвация вызывается движением металла внутри переходной зоны, которую можно рассматривать как капиллярно-пористое тело. Обогащенный примесями металл под давлением сил, обусловленных капиллярными явлениями, вытесняется маточным расплавом из узкого сечения капилляров в более широкое, т. е. к центру отливки.

Кроме этих процессов на зональную ликвацию влияют и другие: конвекционные токи в жидкой части сплава, всплывание загрязненных примесями объемов вследствие их меньшей плотности по сравнению с основным сплавом, действие центробежных сил и т. д.

Разновидностью зональной ликвации является ликвация по плотности, когда компоненты сплава с различной плотностью разделены механически (например, при медленном охлаждении высокосвинцовой бронзы свинец опускается в нижние части отливки).

Зональная ликвация может быть прямой — центральные слои обогащены легкоплавкими примесями, и обратной — количество лег-

коплавких примесей в центральной части меньше, чем в поверхностных слоях. Прямая ликвация характерна для сплавов, затвердевающих последовательно, а обратная — для затвердевающих объемно (слияние переходных областей, растущих с разных сторон, произойдет раньше, чем наружная поверхность отливки охладится до температуры солидуса).

Для устранения явлений дендритной ликвации применяют отжиг отливок, при котором содержание примесей в пределах отдельных дендритов выравнивается. Устранить зональную ликвацию с помощью термообработки невозможно, поэтому для уменьшения зональной ликвации необходимо выравнивать толщину стенок отливки, выполняя их без массивных узлов, в которых трудно достигнуть равномерного затвердевания отливки и избежать скопления ликватов.

Для уменьшения зональной ликвации необходимо: применять рассредоточенный подвод металла в форму, способствующий выравниванию скоростей затвердевания отдельных частей отливки; увеличивать скорость охлаждения отливки за счет использования формовочных смесей с высокой теплоаккумулирующей способностью; изготавливать отливки в металлических формах. Сплавы, склонные к зональной ликвации, необходимо заливать при минимальных перегревах над температурой ликвидуса.

6.4. Флокен

Флокен — дефект в виде разрыва тела отливки под влиянием растворенного в стали водорода и внутренних напряжений. Разрыв проходит полностью или частично через объемы первичных зерен аустенита. В изломе термически обработанной отливки имеет вид сглаженных поверхностей без металлического блеска (матового цвета) на общем сером фоне волокнистой составляющей.

Несоответствие ГОСТу по структуре металла во многих случаях рассматривается более широко. Для ответственных отливок зачастую требуется обеспечить необходимую микро- и макроструктуру, причем в микроструктуре могут регламентироваться размер, форма, количество и равномерность распределения различных структурных составляющих.

Стали аустенитного и ферритного классов не образуют флокенов. Наиболее флокеночувствительными являются стали перлитного и

мартенситного классов, имеющие в своем составе хром (хромистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовые и хромомарганцовистые) и полученные в дуговых печах. Наиболее вероятной причиной флокенообразования считают неблагоприятно проведенный металлургический процесс, связанный с насыщением расплава водородом, создающим внутреннее давление в кристаллической решетке при охлаждении отливки. Сплав не обладает достаточной плотностью, чтобы противостоять этому давлению, что приводит к образованию трещин. Считают, что содержание водорода, приводящее к образованию дефекта, должно быть $>4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла

Однако проведенные исследования [16] образцов из хромоникельмолибденовой стали перлитного класса, полученной в основной дуговой печи, показали, что содержание водорода в каждой из 349 плавок превышало 4 см^3 на 100 г металла (в некоторых случаях доходило до $8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла), а по флокенам было забраковано лишь 17 плавок, содержание водорода в которых было на одинаковом уровне с остальными.

Результаты проведенных исследований [16] свидетельствуют о сложной природе образования флокенов в литой хромоникельмолибденовой стали. Повышенное содержание водорода ($>4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла) не является единственным и обязательным условием образования флокенов в этой стали. Авторы исследований считают, что одной из причин флокенообразования является, возможно, ликвация легирующих элементов (хрома, никеля и др.) в центральной части отливок, это приводит к обогащению некоторых участков сплава водородом, который и вызывает внутренние напряжения, превышающие прочность сплава.

Заключение

Рассмотренные механизмы образования дефектов отливок показывают сложное взаимодействие различных физических и физико-химических явлений на всех стадиях изготовления отливки, способствующих появлению дефектов и брака.

Трудность борьбы с браком обусловлена не только многообразием явлений и причин, приводящих к ухудшению качества продукции, но и сложным, часто противоположным, влиянием различных факторов на разные дефекты.

Следовательно, при разработке мероприятий по предотвращению одного дефекта следует учитывать, что предлагаемая мера может вызвать появление другого.

Например, повышение температуры заливаемого металла уменьшает вероятность образования недоливов, неслитин, спаев, непровода жеребеек (холодильников) и др., но в то же время увеличивает вероятность появления пригара, ужимин, горячих трещин, усадочных раковин, утяжин и др. Увеличение газотворной способности формы увеличивает, например, вероятность образования газовых раковин, но уменьшает вероятность появления пригара. Таких примеров противоположного влияния технологических факторов на появление дефектов существует много.

Учет противоречивого влияния технологических факторов крайне важен, но ставит сложные, порой трудноразрешимые задачи даже перед опытными инженерами-литейщиками.

Для обеспечения решения задач по сокращению потерь от брака необходимо (наряду с решением других вопросов, не рассматриваемых в данном пособии) систематизировать множество причин, влияющих на дефекты, в таком виде, чтобы специалист, занимающийся вопросами брака, имел наглядную информацию о взаимовлиянии этих причин на все дефекты. Кроме того, необходима разработка системы анализа возможных причин образования дефектов и мер по их предотвращению на всех стадиях изготовления отливки.

мартенситного классов, имеющие в своем составе хром (хромистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовые и хромомарганцовистые) и полученные в дуговых печах. Наиболее вероятной причиной флокенообразования считают неблагоприятно проведенный металлургический процесс, связанный с насыщением расплава водородом, создающим внутреннее давление в кристаллической решетке при охлаждении отливки. Сплав не обладает достаточной плотностью, чтобы противостоять этому давлению, что приводит к образованию трещин. Считают, что содержание водорода, приводящее к образованию дефекта, должно быть $>4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла

Однако проведенные исследования [16] образцов из хромоникельмолибденовой стали перлитного класса, полученной в основной дуговой печи, показали, что содержание водорода в каждой из 349 плавок превышало 4 см^3 на 100 г металла (в некоторых случаях доходило до $8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла), а по флокенам было забраковано лишь 17 плавок, содержание водорода в которых было на одинаковом уровне с остальными.

Результаты проведенных исследований [16] свидетельствуют о сложной природе образования флокенов в литой хромоникельмолибденовой стали. Повышенное содержание водорода ($>4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла) не является единственным и обязательным условием образования флокенов в этой стали. Авторы исследований считают, что одной из причин флокенообразования является, возможно, ликвация легирующих элементов (хрома, никеля и др.) в центральной части отливок, это приводит к обогащению некоторых участков сплава водородом, который и вызывает внутренние напряжения, превышающие прочность сплава.

Заключение

Рассмотренные механизмы образования дефектов отливок показывают сложное взаимодействие различных физических и физико-химических явлений на всех стадиях изготовления отливки, способствующих появлению дефектов и брака.

Трудность борьбы с браком обусловлена не только многообразием явлений и причин, приводящих к ухудшению качества продукции, но и сложным, часто противоположным, влиянием различных факторов на разные дефекты.

Следовательно, при разработке мероприятий по предотвращению одного дефекта следует учитывать, что предлагаемая мера может вызвать появление другого.

Например, повышение температуры заливаемого металла уменьшает вероятность образования недоливов, неслитин, спаев, непровода жеребеек (холодильников) и др., но в то же время увеличивает вероятность появления пригара, ужимин, горячих трещин, усадочных раковин, утяжин и др. Увеличение газотворной способности формы увеличивает, например, вероятность образования газовых раковин, но уменьшает вероятность появления пригара. Таких примеров противоположного влияния технологических факторов на появление дефектов существует много.

Учет противоречивого влияния технологических факторов крайне важен, но ставит сложные, порой трудноразрешимые задачи даже перед опытными инженерами-литейщиками.

Для обеспечения решения задач по сокращению потерь от брака необходимо (наряду с решением других вопросов, не рассматриваемых в данном пособии) систематизировать множество причин, влияющих на дефекты, в таком виде, чтобы специалист, занимающийся вопросами брака, имел наглядную информацию о взаимодействии этих причин на все дефекты. Кроме того, необходима разработка системы анализа возможных причин образования дефектов и мер по их предотвращению на всех стадиях изготовления отливки.

Список использованной литературы

1. Бауман Б.В. и др. / под ред. И.Б. Куманина. Литейное производство. М.: Машиностроение, 1971.
2. Василевский П.Ф. Технология стального литья. М.: Машиностроение, 1974.
3. Васильев Е.А. Отливки из ковкого чугуна. М.: Машиностроение, 1976.
4. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1. М.: Гос.научн.-техн.изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1959. С. 937—938.
5. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, 1976.
6. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989.
7. Кинип Э. Пороки отливок. М.: Машгиз, 1958.
8. Коровин В.А., Беляев С.В., Грачев А.Н. Использование шлаковых съемов, образующихся при переплаве лома и отходов алюминия // Литейное производство. 2003. № 11.
9. Коровин В.А., Леушин И.О., Щербаков А.И., Степанов П.П. Повышение термоциклической стойкости материала. Т. 42. Нижний Новгород, Труды Нижегородского государственного технического университета, 2004. С. 65—67.
10. Лакедемонский А.В. и др. Литейные дефекты и способы их устранения. М.: Машиностроение, 1972.
11. Медведев Я.И. Газы в литейной форме. М.: Машиностроение, 1965.
12. Михайлов А.М. и др. / под общ. ред. А.М. Михайлова. Литейное производство. М.: Машиностроение, 1987.
13. Поляков В.В., Косяк Е.А. О природе флокенов в литой стали // Литейное производство. 1985. № 1. С. 9—10.

14. *Попов А.Д.* Поверхностные и подкорковые газовые раковины в стальных отливках // *Литейное производство*. 1973. С. 24—25.
15. Справочник по чугунному литью / под ред. Н.Г. Гиршовича. Л.: Машиностроение, 1978.
16. *Тодоров Р.П., Пешев П.Ц.* Дефекты в отливках из черных сплавов. М.: Машиностроение, 1984.
17. Чугун: справ / А.Д.Шерман и др.; под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. М.: Металлургия, 1991.
18. *Шицман Е.Б., Снежной Р.Л., Нетес Л.Я.* Предотвращение образования окисных плен в отливках из магниевого чугуна // *Литейное производство*. 1970. № 12. С. 6—8.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВОК	5
Глава 2. ДЕФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С НЕСООТВЕТСТВИЕМ ПО ГЕОМЕТРИИ	7
2.1. Недолив и неслитина	7
2.2. Обжим	14
2.3. Подутость	15
2.4. Перекос, стержневой перекос	16
2.5. Разностенность	17
2.6. Стержневой залив	19
2.7. Коробление	19
2.8. Незалив	25
2.9. Зарез	25
2.10. Вылом	26
2.11. Прорыв металла	26
2.12. Уход металла	27
Глава 3. ДЕФЕКТЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВКИ	29
3.1. Пригар	29
3.1.1. Механический пригар	30
3.1.2. Химический пригар	32
3.1.3. Способы предотвращения пригара	34
3.2. Спай	36

3.3. Ужимина	37
3.4. Нарост	43
3.5. Залив	44
3.6. Засор	45
3.7. Плена	46
3.8. Просечка	47
3.9. Окисление	48
3.10. Поверхностное повреждение	50
3.11. Складчатость	51
3.12. Грубая поверхность	51
3.13. Газовая шероховатость	53

Глава 4. ДЕФЕКТЫ — НЕСПЛОШНОСТИ В ТЕЛЕ ОТЛИВКИ

55

4.1. Трещины	55
4.1.1. Напряжения в отливке	55
4.1.2. Горячая трещина	58
4.1.3. Холодная трещина	62
4.1.4. Межкристаллическая трещина	63
4.2. Газовая раковина	64
4.2.1. Эндогенные газовые дефекты	65
4.2.2. Экзогенные газовые дефекты	68
4.3. Ситовидные раковины	74
4.4. Усадочные раковины	76
4.5. Песчаные раковины	81
4.6. Шлаковые раковины	82
4.7. Залитый шлак	85
4.8. Графитовая пористость	85
4.9. Усадочная пористость	86
4.10. Газовая пористость	88
4.11. Рыхлота	89
4.12. Непровар жеребеек (холодильников)	89
4.13. Вскип	91
4.14. Утяжина	91

Глава 5. ДЕФЕКТЫ ОТ ВКЛЮЧЕНИЙ	93
5.1. Металлические включения	93
5.2. Неметаллические включения	93
5.3. Корольки	96
 Глава 6. ДЕФЕКТЫ — НЕСООТВЕТСТВИЕ ПО СТРУКТУРЕ	98
6.1. Отбел	98
6.2. Половинчатость	99
6.3. Ликвация	99
6.4. Флокен	103
 Заключение	105
 Список использованной литературы	106

Коровин Валерий Александрович
Леушин Игорь Олегович

Механизм образования и меры предотвращения дефектов чугунных и стальных отливок

Учебное издание

Редактор *А.А. Чихалкин*
Корректор *Н.Б. Вторушина*
Компьютерная верстка *И.В. Кондратьевой*
Оформление серии *П. Родькина*

Подписано в печать 02.07.2012. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,4.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Тираж 500 экз.
Заказ № 129.

Издательство «ФОРУМ»
101990, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-32-07, 625-52-43
E-mail: forum-knigi@mail.ru

Отдел продаж издательства «ФОРУМ»:

101990, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-52-43
E-mail: forum-ir@mail.ru
www.forum-books.ru

*Книги издательства «ФОРУМ»
вы также можете приобрести:*

Отдел продаж «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 380-05-40 (доб. 252)
Факс: (495) 363-92-12

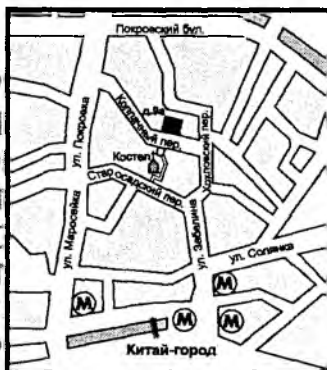
Отдел «Книга-почтой»
E-mail: podpiska@infra-m.ru;
books@infra-m.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «Домодедовская типография»
142001, г. Домодедово, Каширское шоссе, 4, корп. 1



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФОРУМ»

- КУЛЬТУРОЛОГИЯ
- ФИЛОЛОГИЯ
- ПСИХОЛОГИЯ
- ПЕДАГОГИКА
- ЭКОНОМИКА
- ПРАВО
- СЕРВИС И ТУРИЗМ
- ИНФОРМАЦИОННЫЕ
И КОМПЬЮТЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
- ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА



www.forum-books.ru

Адрес: 101990, Москва
Колпачный пер., д. 9а
тел./факс: (495) 625-32-07
625-52-43
e-mail: forum-knigi@mail.ru

Отдел продаж
Издательства «ФОРУМ»
тел./факс (495) 625-52-43
e-mail: forum-ir@mail.ru