

**А.И. Вейник**

# **Литьё в кокиль**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 621  
ББК 34.4  
А11

А11 **А.И. Вейник**  
Литьё в кокиль / А.И. Вейник – М.: Книга по Требованию, 2024. – 416 с.

**ISBN 978-5-458-26925-4**

В монографии рассмотрены теоретические основы и особенности технологии литья различных сплавов, механизация и организация производства отливок в кокилях, а также вопросы качества и эффективности. Приведены методы расчетов оптимальных параметров технологии с применением ЭВМ. Рассмотрены все современные разновидности кокилей. Изложены особенности и конкретные технологические режимы литья в кокиль цветных и черных сплавов, а также специфика применения облицованных кокилей. Приведены сведения об однопозиционных и многопозиционных кокильных машинах, а также автоматических линиях.

**ISBN 978-5-458-26925-4**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2024  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



# Раздел первый

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ

### Глава I

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛИТЬЕ В КОКИЛЬ

##### 1. ПРИЗНАКИ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА

По способу заполнения форм металлом и условиям формирования в них отливок между литьем в кокиль и другими способами литья в металлические формы (центробежным, под давлением, намораживанием, выжиманием и др.) существует большее различие, чем между литьем в кокиль и литьем в обычную песчаную форму. Сходство последних процессов бывает настолько большим, что часто практически трудно найти грань между ними: в кокилях сплошь и рядом применяют песчаные стержни или вставки, а в песчаных формах нередко устанавливают металлические холодильники.

Согласно ГОСТ 17819—72 кокиль — это металлическая форма, которая заполняется жидким металлом под действием гравитационных сил. Рис. 1 дает некоторое представление о том, какие промежуточные варианты форм могут встречаться между песчаной (рис. 1, а) и полностью металлической (рис. 1, е) формами: некоторые из «промежуточных» форм затруднительно определенно отнести к песчаным формам или к кокилям.

По конструктивно-технологическому признаку принято считать [25, 107] кокилями литейные формы, металлические части которых составляют их основу и участвуют в формировании конфигурации и свойств отливки. На основании этого представленные на рис. 1, г, д формы следует называть кокилями, а на рис. 1, б, в — песчаными формами с наружными холодильниками. Иные названия «промежуточных» форм не рекомендуются. Следует указать, что именно сочетание в кокиле металлических и песчаных (или керамических) элементов позволяет в ряде случаев успешно применить литье в кокиль для получения деталей сложной конструкции. При этом лучше всего удастся избежать препятствия усадке отливок и повысить стойкость форм.

С целью регулирования скорости затвердевания отливок рабочие поверхности кокиля облицовывают (футеруют) и окрашивают теплоизоляционными красками. Покрывают на кокиль также и для того, чтобы защитить форму от воздействия жидкого

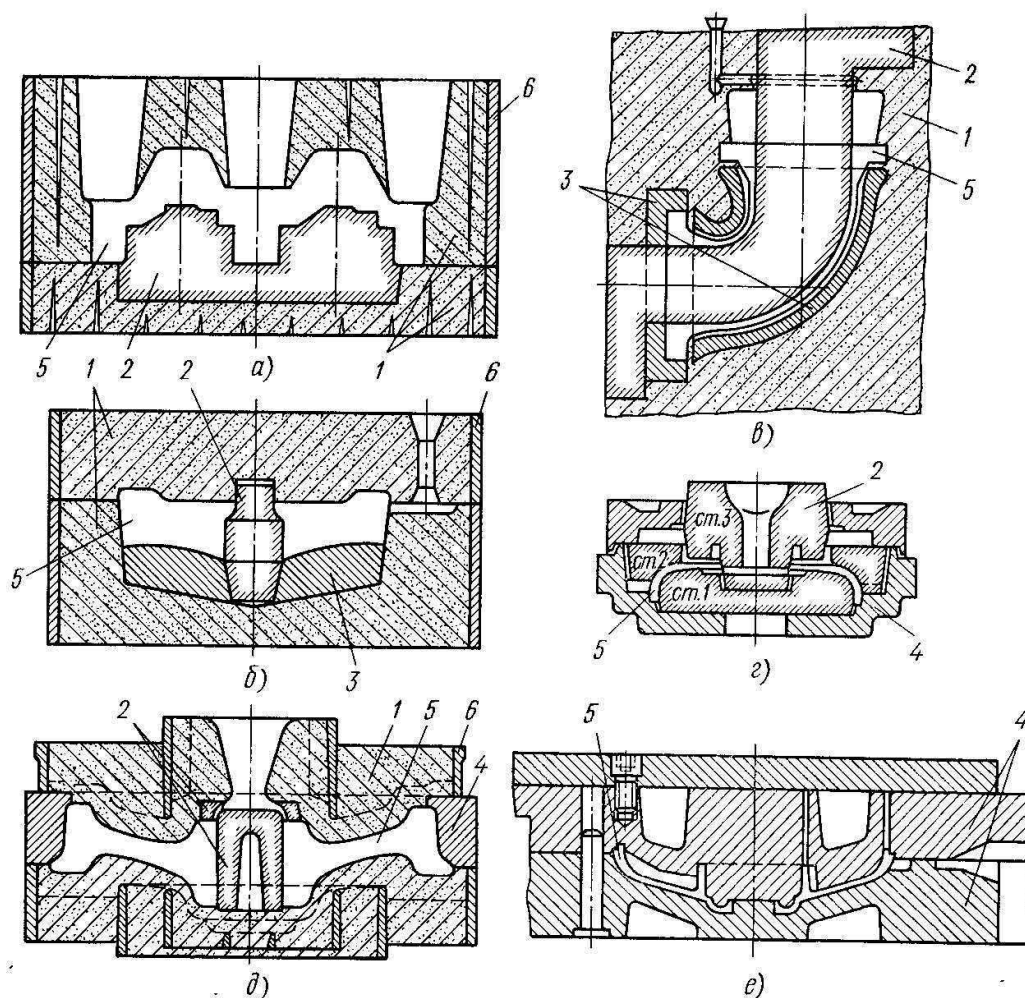


Рис. 1. Конструктивно-технологические признаки литейных форм:  
 а — обычная песчаная; б, в — песчаная с холодильниками; г — кокиль с песчаными вставками; д — кокиль с формой-вставкой; е — кокиль без вставок;  
 1 — песчаная форма; 2 — стержень; 3 — холодильник; 4 — кокиль; 5 — рабочая полость; 6 — опока

металла и газовой коррозии и тем самым увеличить ее долговечность. Покрyтия позволяют значительно уменьшать термические напряжения в кокиле [16]. Толстый слой краски (облицовки) настолько снижает тепловое нагружение кокиля и скорость затвердевания отливки, что могут создаться условия, когда к моменту затвердевания отливки или даже к моменту ее выбивки начальная температура кокиля не изменится.

При постепенном увеличении толщины покрытия форма будет всегда проходить через такое состояние, когда трудно определить, является ли она кокилем, или обычной песчаной формой. «Преобразование» кокиля в обычную песчаную форму зависит не только от толщины краски и облицовки, но и от толщины отливки. Переход металлической части формы из кокиля в опоку может быть точно

рассчитан [20, 107]. Приблизненно кокилем можно считать такую литейную форму, которая удовлетворяет условию  $X_3 \leq X_1$ , где  $X_1$  — характерный размер отливки (половина толщины стенки плоской, радиус цилиндрической и сферической отливок),  $X_3$  — толщина покрытия (краски, облицовки) металлической части формы.

Условие  $X_3 \leq X_1$  представляет собой математическое выражение факта влияния кокиля на термические особенности формирования отливки. Ускоренное охлаждение отливки в кокиле связано со свойствами металлического материала формы. Свойствами металла в качестве материала формы объясняются и две другие особенности рассматриваемого процесса. Речь идет о формировании отливки в газонепроницаемой и неподатливой форме. Исключение составляют только некоторые специальные виды кокилей, которые в большей либо меньшей мере податливы и газопроницаемы. Такие формы рассмотрены в гл. X.

ГОСТ 17819—72 не допускаются термины-синонимы «постоянная форма» и «металлическая форма». Оба эти термина не равнозначны понятию «кокиль». Процесс получения отливок в кокилях, естественно, должен называться «литье в кокиль». За кокилями с относительно толстой облицовкой, наносимой по модели, утвердилось название «облицованный кокиль». Это название использовано в сборнике государственных стандартов «Кокили облицованные (ГОСТ 19507—74—ГОСТ 19516—74)».

## 2. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Литье в кокиль относится к прогрессивным специальным способам литья с большим будущим. Между тем, это один из древних способов изготовления отливок, появившийся чуть ли не на заре возникновения литейного ремесла. Во всяком случае литейщики прибегли к этому способу сразу же, как только возникла необходимость в массовом производстве отливок с точно воспроизводимыми размерами последних. Древние литейщики разных районов применили первые кокили независимо друг от друга. В настоящее время трудно установить, в какой части света и когда впервые стали использовать кокили. Однако достоверно известно, что почти за пять веков до нашей эры литье в кокиль было развито на юго-востоке и в Северном Причерноморье — в Скифии. В это время в сельском хозяйстве ряда государств Востока началось широкое применение литых чугунных мотыг, серпов, осей телег и других сельскохозяйственных сружий труда и деталей оборудования. Огромную потребность в отливках не могли удовлетворить старые способы литья. Взамен их и был использован вновь открытый способ литья в чугунные кокили.

Скифы, пришедшие с Востока на Причерноморье в VII в. до нашей эры, создали здесь могущественное и обширное государство, добившееся больших военных успехов на Ближнем Востоке, в Малой Азии, противостоявшее сильным государствам на Западе. Для военных целей скифам необходимо было огромное количество пустотелых наконечников стрел, причем требовалось, чтобы эти наконечники стрел были строго одинаковы по своим размерам и массе.

Литейное ремесло в Скифии было высоко развито, об искусстве литья замечательных скифских котлов с восторгом писал Геродот; свидетельством тому служат также многие дошедшие до нашего времени литые изделия. Однако для

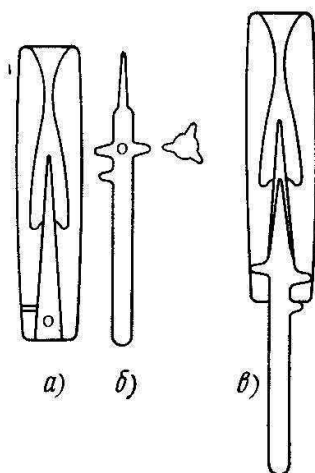


Рис. 2. Кокили Скифии для литья наконечников стрел: а — часть кокиля; б — металлический стержень; в — кокиль в сборе

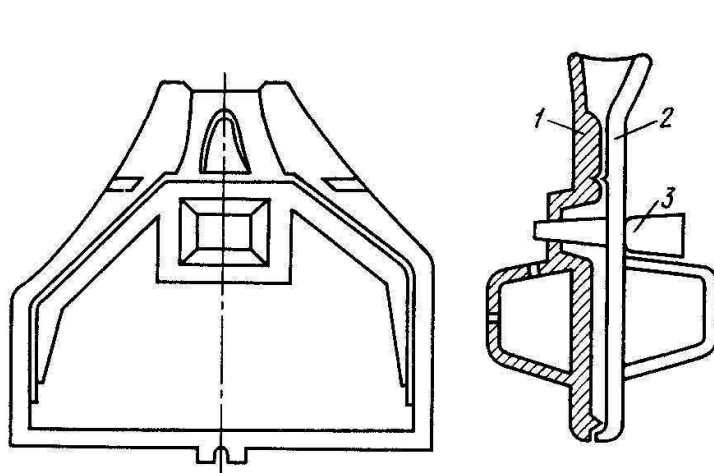


Рис. 3. Кокиль периода Борющихся царств (403—221 гг. до н. э.) для литья чугуинных мотыг:

1, 2 — половинки кокиля; 3 — металлический стержень

массового изготовления наконечников стрел существовавшие ранее способы литья, в том числе и литье по восковым моделям, оказались непригодными. Для решения проблемы литейщикам пришлось искать новые пути. Так скифами было впервые изобретено литье в кокиль. Правда, как указывает Б. А. Шрамко, одна из находок археологов — четырехместный кокиль дает основание предполагать, что в Причерноморье литье было известно и в доскифский период. Но других, более достоверных данных, подтверждающих такое предположение, пока не имеется.

Что касается археологических находок скифского периода, то они, как и находки периода Борющихся царств (403—221 гг. до н. э.), свидетельствуют об умелом использовании кокилей древними литейщиками.

Трудно сказать, почему эти древние способы литья в кокиль не получили широкого распространения и почему литейщики последующих столетий и эпох их не заимствовали. Во всяком случае не из-за несовершенства этих процессов. На рис. 2 и 3 приведены эскизы кокилей, свидетельствующие о том, что более 20 веков тому назад литейщики владели сложными способами литья в кокиль, используя даже металлические стержни. Интересно отметить, что после этого способ литья в кокиль не использовался литейщиками более 10 столетий, хотя не исключена возможность его неоднократного появления и исчезновения.

«Пробелы» в истории литья в кокиль объясняются не утерей древних секретов, а тем, что в разные периоды отсутствовали благоприятные условия эффективного использования кокилей. Такие условия появились в России в XVI в., когда потребовалось массовое изготовление чугунных пушечных ядер с достаточным воспроизводством размеров и масс. Существовавшие в то время способы сравнительно развитого литейного производства в России не были пригодны для литья таких ядер, хотя с их помощью решались более сложные проблемы — изготовление колоколов, пушек и других сложных и ответственных отливок. Возрожденный же способ литья в кокиль позволил решить проблему чугуинных ядер. А когда отпала необходимость в чугуинных ядрах, процесс литья в кокиль вновь «забыли» на несколько веков. Возрождается этот способ лишь в конце прошлого столетия, и уже для литья стальных заготовок: в 90 годах XIX в. на вагоностроительном заводе в г. Риге было освоено литье в кокиль стальных дисков массой 200—300 кг. По тому времени литье стальных дисков было смелым инженерным решением, давшим значительный эффект. Простые кокили успешно были применены для литья чугуинных вагонных колес с отбеленными ребрами.



В дальнейшем кокили нашли еще более широкое применение для литья самой разнообразной продукции: вагонных колес, буферов электровозов, тяжелых корпусов редукторов, различной аппаратуры, хозяйственных изделий, тонкостенной посуды и т. д. Впервые было освоено массовое литье в кокиль чугуновых изделий толщиной менее 3 мм.

Советскими учеными была разработана строго научная теория литья в кокиль. Большой вклад в теорию и практику кокильного литья внес основоположник советской научной школы специальных способов литья проф. Н. Н. Рубцов. Многие труды советских ученых переведены почти на все основные языки мира. Советский опыт заимствовали многие технически развитые страны. Литье в кокиль особенно успешно развивается в странах социалистического содружества: ГДР, ЧССР, ПНР и др.

В настоящее время многие цехи и заводы полностью заменили песчаные формы на кокили, получив при этом большой экономический эффект и значительно улучшив качество отливок. Положительный опыт накоплен на заводах «Водоприбор» (Москва), им. П. Монтана (г. Баку), им. Малышева (г. Харьков), «Красный Октябрь» (г. Харьков), сельскохозяйственного машиностроения им. Октябрьской революции (г. Одесса), «Вольта» (г. Таллин), моторном (г. Барнаул) и др.

Значительные работы по изысканию новых конструкций кокилей, их материала, способов изготовления и эксплуатации выполнены в физико-техническом институте АН БССР, научно-исследовательском институте специальных способов литья (НИИСЛ), МВТУ им. Баумана, Харьковском автомобильно-дорожном институте и в других научных организациях, а также на заводах.

### 3. ДОСТОИНСТВА ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ И ОБЛАСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Возрастающая популярность процесса литья в кокиль обусловлена его несомненными достоинствами и рядом четко выраженных преимуществ перед традиционными способами изготовления отливок [19—21, 25, 52, 53, 106, 107]. Главные из них относятся к эффективности процесса литья и к качеству отливок. Повышение эффективности литейного производства связано с такими достоинствами литья в кокиль, как многократность использования литейных форм, рост производительности труда и снижение себестоимости отливок, улучшение качества отливок благодаря повышению точности и ускоренному охлаждению металла. Само собой разумеется, что снижение брака отливок, повышение их точности, снижение припусков на обработку и т. п. обеспечивает повышение эффективности процесса литья.

**Снижение расхода формовочных материалов.** С заменой всей или части песчаной формы кокилем сокращается расход формовочных материалов. Польза при этом не только в том, что снижаются затраты на доставку и подготовку формовочных материалов, а разовые формы заменяются многократно используемыми, но и в том, что значительно улучшаются условия труда литейщиков, меньше загрязняется окружающая среда.

**Уменьшение источников брака.** Известно, что литейная форма находится в сложных условиях взаимодействия с отливкой. Достоинство кокиля заключается в том, что характер этого взаимодействия более стабилен, чем в песчаной форме. В результате число

трудно управляемых факторов, обуславливающих брак отливок, уменьшается.

**Качество отливок и свойства сплавов.** Затвердевание отливки в кокилях обеспечивает более высокую плотность металла, а также более высокие механические свойства по сравнению со сплавами, полученными в песчаных формах. Исключением является чугун: в силу особых условий кристаллизации в чугуне кокильных отливок часто образуются карбиды и феррито-графитная эвтектика, отрицательно сказывающиеся на свойствах изделий. Так, износостойкость, вязкость и другие свойства чугуна кокильных отливок нередко ниже, чем в отливках, полученных в песчаных формах. Правда в настоящее время существуют надежные меры повышения таких свойств. Как правило, отливки, полученные в кокилях, имеют хорошие точность и чистоту поверхности, малые припуски на обработку, что значительно облегчает их дальнейшую обработку.

**Повышение производительности.** Известно, что при производстве отливок на изготовление песчаных форм, на приготовление формовочных материалов и на очистку отливок приходится до 80—90% всех трудовых затрат. При литье же в кокили многие из трудоемких операций либо совсем отпадают, либо объем их резко сокращается (например, на сборке форм и очистке отливок). Поэтому переход на литье в кокили часто позволяет повысить производительность труда в литейном цехе в 2—3 раза и больше. При этом ощутимое повышение труда достигается и в механических цехах.

**Механизация и автоматизация.** Кокили отличаются от обычных песчаных форм большой жесткостью и высокой прочностью, достаточно высокой точностью и стабильностью размеров элементов, а также точностью и надежностью сопряжения последних. Для управления качеством отливок при литье в кокиль приходится учитывать меньшее число факторов, чем при литье в песчаную форму. Такие, например, факторы, как влажность, огнеупорность и газотворность формы, в первом случае оказываются несущественными. Все это создает благоприятные условия для механизации и автоматизации процесса. И только механизированные и автоматизированные процессы литья в кокиль в состоянии конкурировать с современными процессами литья в песчаные формы.

**Уменьшение капитальных затрат.** Для изготовления одних и тех же отливок в кокилях требуется значительно меньше производственных площадей, чем при литье в песчаные формы. Это не только потому, что некоторые участки упраздняются или сокращаются (например, смесеприготовительные и обрубные), но благодаря сокращению времени на сборку форм, затвердевание отливок и т. д. По опыту ряда заводов с переходом на кокильное литье съем с 1 м<sup>2</sup> производственной площади увеличивается в 2—4 раза.

Следовательно, для создания литейных цехов и участков литья в кокиль требуется меньше капитальных затрат.

**Ускорение подготовки кадров.** Так как при литье в кокиль упрощаются многие технологические операции, а также заметно уменьшаются трудно устранимые источники брака, то значительно упрощается и задача подготовки кадров литейщиков. Если на подготовку квалифицированного формовщика иногда требуются годы, то квалифицированным кокильщиком становятся за несколько недель или, в крайнем случае, за два-три месяца.

**Снижение себестоимости отливок.** Многократность использования кокилей, уменьшение затрат на изготовление форм значительно удешевляют отливку. Этому же способствует снижение брака и улучшение качества отливок, а также уменьшение капитальных затрат, расхода металла и т. п. Все это в конечном итоге приводит к снижению себестоимости отливок. Во всех цехах страны, где внедрено литье в кокиль, себестоимость отливок на 20—30% ниже, чем в цехах с традиционными способами изготовления отливок.

Изложенное характеризует технико-экономические преимущества литья в кокиль. Более подробные сведения по этому вопросу можно найти в гл. VII и в третьем и четвертом разделах. В гл. VII приведены наиболее общие критерии качества и эффективности и дается сравнение литья в кокиль с другими видами литья. В третьем и четвертом разделах указаны конкретные показатели качества отливок из различных сплавов и экономической эффективности рассматриваемого способа литья.

Литье в кокиль успешно применяется в производстве отливок из серого и высокопрочного чугунов, алюминиевых, магниевых и медных сплавов. В отдельных случаях в кокилях получают детали из стали и ковкого чугуна. Трудно найти такую отрасль машиностроения, где бы не занимались литьем в кокиль либо не использовали отливки, полученные таким способом.

В кокилях получают детали различных габаритных размеров, массы.

Весьма разнообразны конструктивные особенности отливок, получаемых в кокилях: от простых типа опорных плит, колосников, болванок и втулок до сложных типа картеров двигателей, головок блоков цилиндров, ребристых корпусов электродвигателей и стоек плугов. Литьем в кокиль получают детали с особыми свойствами: повышенной герметичности, износостойкости (например, чугунные с поверхностным и местным отбелом), окалиностойкости и др. Важно подчеркнуть, что в кокилях производят детали различного, в том числе весьма ответственного назначения.

## Глава II

# ТЕПЛОВЫЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ

### 1. РОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Главным вопросом теории литья является формирование отливки, которое обусловлено комплексом явлений различной физической природы. В этом комплексе ведущая роль принадлежит тепловым явлениям: изменение температуры отливки — первопричина происходящих в ней процессов. Поэтому тепловые основы являются центральным звеном теории каждого способа литья.

Однако для литья в кокиль тепловые основы играют исключительную роль. Во-первых, в кокилях, как ни в какой другой литейной форме, имеются широкие возможности изменения термических условий формирования отливки: выбором, например, состава и толщины покрытия, способа и режима внешнего охлаждения формы. Во-вторых, тепловое состояние кокиля — решающий фактор его долговечности. Следовательно, изучение теплообмена между отливкой и кокилем является не только теоретической, но и важной практической задачей.

Практические задачи производства отливок в кокилях, которые решаются методами тепловой теории литья, можно разделить на три группы. К первой относятся определение закона изменения температуры и затвердевания отливки в зависимости от толщин покрытия и стенки кокиля, термофизических свойств их материалов, режима охлаждения формы и других факторов. В результате решения задач этой группы устанавливаются закономерности формирования микро- и макроструктуры (условий питания) отливки, характер возникающих в ней термических напряжений и длительность технологического цикла.

Ко второй группе относятся задачи, которые можно рассматривать как обратные по отношению к первой. В круг этих задач входят выбор геометрических и термофизических свойств покрытия и кокиля, а также режима охлаждения последнего с целью обеспечения заданных условий формирования отливки. К таким условиям относятся, например, линейная скорость затвердевания и перепады температур между элементами отливки. При соблюдении заданных условий достигаются необходимые параметры качества отливки: прочность, твердость, точность и т. д.

Третья группа задач охватывает условия эксплуатации кокилей. Вследствие решения задач этой группы определяются: продолжительность термического цикла, которая обеспечивает заданную начальную температуру формы; период, в течение которого температура кокиля соответствует параметрам нанесения покрытия; величина термических напряжений и деформаций кокиля;

разогрев формы потоком расплава как один из факторов ее эрозии и др.

Решение (с разной степенью точности) перечисленных задач оказывается возможным с помощью расчетных формул, приведенных в настоящей главе. Охватывают они наиболее распространенные и типичные случаи литья. Для специальных случаев указывается соответствующая литература.

Следует подчеркнуть, что приведенные формулы относятся к определенным условиям литья. Условия эти оговариваются подробно и поясняются схемой (рис. 4). Получение аналитических решений, пригодных для всех разновидностей отливок и кокилей, либо вообще невозможно, либо сопряжено с громоздкостью конечных результатов. Необходимые упрощения достигаются с помощью специальных методов теории литья [20].

## 2. ТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ В КОКИЛЕ С ТОНКОСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ

**Особенности процесса.** Основной принцип исследования термических явлений в системе отливка — кокиль заключается в установлении их главных особенностей и реализуется с помощью параметрического критерия  $X_3/X_1$  (см. рис. 4). Для термических условий литья в кокиль с тонкослойным покрытием  $X_3/X_1 \ll 1$ . Из этого неравенства вытекают два важных следствия. Первое заключается в том, что теплоаккумулирующая способность покрытия пренебрежимо мала по сравнению с теплоаккумулирующей способностью отливки. Второе сводится к тому, что покрытие

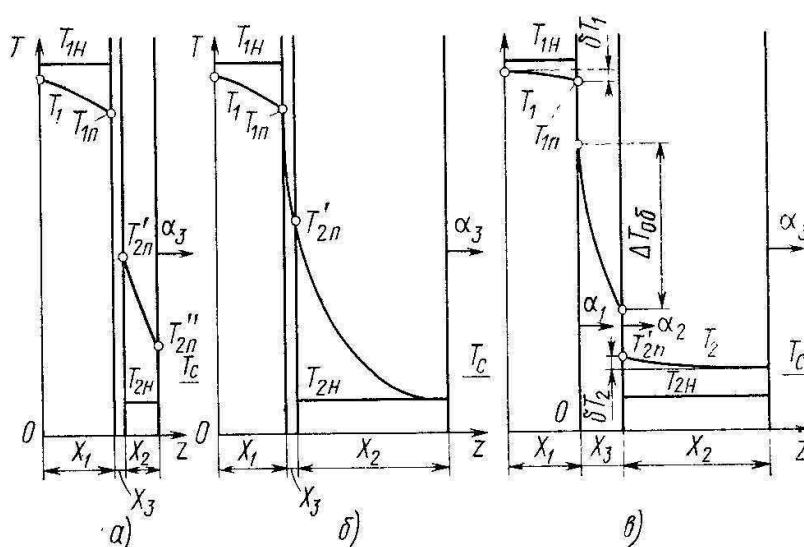


Рис. 4. Схемы температурных полей в отливке и кокиле:

а — тонкостенный кокиль с тонкослойным покрытием; б — массивный кокиль с тонкослойным покрытием; в — облицованный кокиль



можно рассматривать как плоскую (в термическом смысле) однослойную или многослойную стенку. Оба следствия позволяют учесть термическое сопротивление кокильного покрытия как термическое сопротивление плоской (одно- или многослойной) стенки в стационарном случае.

С учетом рассмотренных следствий в монографии [20] детально исследованы условия формирования отливки в гипотетической (фиктивной) среде, температура которой  $T_{с.ф}$  — величина постоянная. Теплообмен между отливкой и такой средой осуществляется с коэффициентом теплопередачи  $\alpha_{1ф}$ . Способы выбора  $T_{с.ф}$  и  $\alpha_{1ф}$  как расчетных параметров рассмотрены ниже. Идеи и выводы работы [20] позволяют рассчитать термические условия формирования отливок во многих разновидностях кокилей.

**Охлаждение потока металла.** Изменение температуры потока металла в кокиле

$$\frac{\theta_1}{\theta_{зал}} = \frac{T_1 - T_{с.ф}}{T_{зал} - T_{с.ф}} = \exp \left[ -A \left( t - \frac{y}{u} \right) \right], \quad (1)$$

$$\text{где } A = \frac{\alpha_{1ф}}{R_c \rho'_1 c'_1}, \quad R_c = \frac{dV_1}{dF_1}.$$

Здесь  $R_c$  — приведенный размер струи;  $\rho'_1$ ,  $c'_1$  — плотность и удельная теплоемкость жидкого металла;  $u$  — скорость движения металла,  $y$  — координата, отсчитываемая от фронта потока (на носике  $y = 0$ ).

Из формулы (1) следует, что температура любого сечения струи уменьшается во времени по экспоненциальному закону.

**Отвод теплоты перегрева.** Закон изменения температуры металла на стадии отвода теплоты перегрева имеет вид

$$\frac{\theta_1}{\theta_{1н}} = \exp \left( -\frac{F_1 \alpha_{1ф}}{M_1 c'_1} t \right), \quad (2)$$

где  $\theta_{1н}$  — начальная температура расплава;  $F_1$  — поверхность отливки;  $M_1$  — масса отливки. Температура  $\theta_{1н}$  определяется по формуле (1), если положить в ней  $t = t_1$  ( $t_1$  — продолжительность стадии заливки).

Из выражения (2) следует, что продолжительность стадии отвода теплоты перегрева

$$t_2 = \frac{M_1 c'_1}{F_1 \alpha_{1ф}} \ln \frac{\theta_{1н}}{\theta_{кр}}. \quad (2')$$

В формуле (2')  $\theta_{кр}$  — температура кристаллизации, отсчитанная от  $T_{с.ф}$ .

**Затвердевание.** Выражения для расчетов стадии затвердевания намного сложнее, чем в предыдущих случаях. Вид этих выраже-