

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

аспирант Н.Е. ВОЛКОВА

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА
ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ
ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

(Специальность 05.323. Литейное производство)

А в т о р з ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

аспирант Н.Е. ВОЛКОВА

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА
ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ
ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

(Специальность 05.323. Литейное производство)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1971

Работа выполнена на кафедре "Теоретическая и общая теплотехника" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института

научный руководитель – член-корреспондент АН БССР,
доктор технических наук, профессор А.И. Вейник.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Г.А. Анисович,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
В.Р. Ровкач.

Ведущее предприятие – Минский автомобильный завод.

Автореферат разослан " " 1971 г.

Защита диссертации состоится " " 1971 г.

на заседании Объединенного совета по присуждению ученых степеней по механико-технологическим, машиностроительным, автотракторным и торфяным специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Отзывы просим направлять по адресу: г. Минск, 27, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, ученому секретарю совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь совета – кандидат технических наук,
доцент Н.В. Кислов.

В В Е Д Е Н И Е

В настоящее время около 60 % всего производимого металла используется в виде отливок. Например, удельный вес литых деталей составляет в станкостроительной промышленности 70-80 %, в тракторной - 50-70 % и т.д.

Подавляющее количество изделий до сих пор получают в песчано-глинистых формах. В связи с этим очень важно знать процессы, которые протекают в песчано-глинистой форме при ее подготовке и в период взаимодействия с отливкой. Это позволит правильно назначать режимы изготовления форм и стержней и регулировать условия формирования у отливки необходимых свойств.

Механизм переноса, наблюдаемый в песчано-глинистых формах и стержнях, отличается исключительной сложностью: в материале происходят химические и фазовые превращения (перенос массы), перенос теплоты лучеиспусканием, конвекцией и теплопроводностью, испарение и конденсация влаги, фильтрация образовавшихся газов и паров и т.д. До сих пор многие из перечисленных процессов изучены недостаточно. Тем более нет работ, которые рассматривали бы их в комплексе, с учетом всех факторов, влияющих на свойства формы, в следовательно, и отливки. Особенно слабо изучены тепловые эффекты, связанные с фазовыми и химическими превращениями, и влияние этих эффектов на процесс формирования отливки.

В настоящей работе впервые ставится, теоретически и экспериментально решается задача о фазовых и химических превращениях, происходящих в песчано-глинистых формах и стержнях, и о влиянии этих превращений на тепловой режим отливки. Общая задача рассмотрена на примере трех различных температурных уровней: до 100 °C (испарение и конденсация влаги в отдельных капиллярах и капиллярнопористых телах, каковые служат моделью песчано-глинистой формы и литейного стержня), до 300 °C (отвердевание большинства крепителей; рассматривается на примере плавления и полимеризации песчаной смеси на основе пульвербакелита) и до 1400 °C (деструкция, сублимация, горение добавок и крепителей на примере пульвербакелитовой смеси при ее взаимодействии с чугуновой отливкой) - третий случай является наиболее общим и наиболее сложным.

На основе решения поставленной задачи разработан метод расчета теплового режима отливки и формы с учетом фазовых и химических превращений, выведены формулы для выбора оптимального технологического процесса литья чугуна в облицованный кокиль. Результаты работы внедрены в производство.

Глава I

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Свойства литейных форм оказывают решающее влияние на качество отливки. Это в равной мере относится как к металлической, так и к неметаллической (например, песчано-глинистой) форме.

Для правильного понимания механизма явлений, происходящих в песчано-глинистой форме или стержне, которые представляют собой типичное капиллярнопористое тело, надо детально изучить процессы переноса теплоты, влаги, химические и фазовые превращения и т.д. с учетом их взаимного влияния. В настоящее время известно много работ, посвященных изучению перечисленных вопросов. Однако в большинстве случаев в этих работах рассматриваются только отдельные частные задачи переноса, относящиеся либо к теплообмену, либо к массообмену, либо к фазовым и химическим превращениям и т.д. Комплексных работ, анализирующих явления во всей их сложности, почти нет.

Из литературного обзора следует, что большинство известных работ посвящено изучению процессов конвективной и высокочастотной сушки стержней и форм. При этом рассматривается как правило только один частный случай фазовых превращений — испарение влаги. Лишь несколько работ учитывают обратный процесс — конденсацию влаги в форме при ее взаимодействии с отливкой. Что касается фазовых и химических превращений, то в широком плане они практически никем не изучались.

Известны работы, в которых рассматривается чисто химическая сторона проблемы. Например, есть работы, в которых детально изучены химические реакции, протекающие в быстротвердеющих жидкостекольных смесях. В других работах говорится о химичес-

ких превращениях, происходящих в формах на пульвербакелитовой основе, и т.д. Вместе с тем во всех перечисленных случаях остается в стороне вопрос о тепловых эффектах, которые сопровождают фазовые и химические превращения при подготовке формы и ее взаимодействии с расплавленным металлом. Имеется в виду прежде всего характер распределения этих эффектов в интервале изменения температур формы. Совсем нет сведений о том, как влияет характер температурного распределения теплового эффекта на свойства формы, режим ее подготовки и процесс формирования отливки.

В настоящей работе ставится задача теоретически и экспериментально изучить тепловые эффекты фазовых и химических превращений, происходящих в песчано-глинистой литойной форме при ее подготовке и взаимодействии с отливкой. На этой основе предполагается разработать метод расчета теплового режима отливки и формы и дать практические рекомендации по выбору оптимального технологического процесса литья.

Фазовые превращения изучаются на примере отдельного цилиндрического капилляра, благодаря чему оказывается возможным выяснить количественную сторону процесса испарения влаги, проверить существующие расчетные формулы и обобщить полученные результаты на капиллярнопористое тело, каковым является песчано-глинистая форма. Далее исследуются процессы перераспределения влаги в герметически закрытом песчано-глинистом образце (закрытая система). Это позволяет достаточно подробно разобраться в сущности механизма наиболее распространенных фазовых превращений (испарение и конденсация) и составить необходимые расчетные уравнения теплового баланса.

Наконец, в наиболее общем виде теоретически и экспериментально изучаются фазовые и химические превращения на примере песчаной смеси с пульвербакелитом в качестве связующего. В этой смеси наблюдаются процессы плавления и отвердевания, сублимации и горения. Учет этих превращений позволяет вывести формулы для расчета теплового режима формы и отливки.

На основе решения задачи об отвердевании связующих рассматривается весьма актуальный вопрос литья чугуна в облицованные кокили.

Глава II

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРАХ И КАПИЛЛЯРНОПОРИСТЫХ ТЕЛАХ

Весьма характерными фазовыми превращениями, происходящими на уровне температур до 100 °С, являются испарение и конденсация влаги. Соответствующие превращения наблюдаются в песчано-глинистой форме и литейном стержне при их подготовке и взаимодействии с отливкой. Для выяснения физического механизма процессов испарения и конденсации, происходящих в форме и стержне, целесообразно вначале рассмотреть единичный капилляр правильной (цилиндрической) конфигурации. Процессы, происходящие в таком капилляре, отличаются четко выраженными закономерностями, их легче установить. В то же время их можно с известным приближением распространить на капиллярнопористое тело, в котором капилляры неправильной конфигурации соединены параллельно и последовательно.

Впервые задачу об испарении влаги из единичного капилляра решал Стефан. В 1882 г. он теоретически вывел следующую формулу:

$$j_m = \frac{\varphi \mu P_\delta}{R T h} \ln \frac{P_\delta - P_e}{P_\delta - P_n} \quad \text{кг/(м}^2 \cdot \text{сек)} \quad (I)$$

где φ - коэффициент диффузии; μ - молекулярная масса;

P_δ - общее (барометрическое) давление воздуха; R - газовая постоянная; T - абсолютная температура; h - расстояние от края капилляра до мениска жидкости в нем (высота заглубления мениска); P_e - парциальное давление пара в окружающей среде; P_n - парциальное давление пара у поверхности мениска жидкости.

Формула (I) в течение длительного времени была единственной. С ее помощью до настоящего времени рассчитывается процесс испарения жидкости из капилляров. Одновременно формула (I) используется для анализа механизма процесса испарения жидкости из капиллярнопористых тел.

Из формулы (I) видно, что при постоянных прочих условиях обратный поток массы $1/j_m$ должен быть связан с высотой h уравнением прямой линии, проходящей через начало координат. При

этом начале испарения ($h = 0$) соответствует бесконечно большая скорость испарения ($J_{m_0} = \infty$). Именно поэтому величина $1/J_m$, обратная потоку массы, при $h = 0$ равна нулю (соответствующая прямая проходит через начало координат). Кроме того, в формулу (I) непосредственно не входит диаметр капилляра.

Для проверки формулы (I) были созданы экспериментальные установки со строго контролируемыми условиями среды (влажность, температура, давление), окружающей капилляр. Было изучено влияние на процесс испарения жидкости из капилляра следующих факторов: диаметра капилляра d (изменялся от нескольких микронов до нескольких миллиметров), влажности окружающей среды φ (изменялась от 0 до 100 %), рода жидкости (вода, спирт, уайт-спирит, бензин и т.д.), характера взаимного расположения и ориентации капилляров и т.д.

Многочисленные опыты показывают, что независимость величины потока массы от диаметра приближенно соблюдается только для капилляров малых диаметров в условиях нулевой влажности окружающей среды. С увеличением влажности роль диаметра начинает сказываться весьма заметно. Особенно сильно диаметр влияет на скорость испарения при $\varphi = 100$ %. Например, при изменении d от 54 мкм до 1600 мкм начальный поток J_m уменьшается почти в 16 раз. Из опытов следует, что формула (I) при большой влажности окружающей среды не отражает истинной картины процесса. Аналогично не соблюдается линейная зависимость обратного потока массы $1/J_m$ от высоты h . При этом начальный поток J_{m_0} не равен бесконечности, как этого требует формула (I).

Выполненный анализ показывает, что при расчете процессов испарения жидкости из капилляров формулой Стефана надо пользоваться с большой осторожностью. В настоящее время она служит теоретической основой для изучения испарения. Вместе с тем она недостаточно точно отражает влияние на процесс диаметра капилляра (при больших влажностях среды), влажности окружающей среды, характера временной зависимости потока массы и т.д.

Перенос влаги в капиллярах капиллярнопористого тела в принципиальных своих чертах не отличается от переноса влаги в единичных капиллярах. На этом основании при изучении процессов испаре-

ния влаги в капиллярнопористых телах часто используются закономерности, полученные для отдельных капилляров. При этом применяются специальные способы осреднения размеров капилляров капиллярнопористого тела.

При экспериментальном исследовании процессов испарения и конденсации влаги в песчано-глинистых телах на уровне температур до 100°C была выбрана закрытая капиллярнопористая система. Такая система не обменивается массой (влажностью) с окружающей средой. Благодаря этому очень наглядно проявляется механизм переноса влаги, так как испарение, фильтрация и конденсация происходят при неизменном количестве влаги в образце. Для оценки процессов достаточно составить элементарное уравнение баланса массы. В открытых системах (например, при сушке литейных форм и стержней) картина получается менее наглядной, ибо масса теряется в окружающую среду, и поэтому трудно судить, какая часть испарившейся влаги сконденсировалась в соседних участках тела и какая - перешла в окружающую среду. В связи с этим при изучении механизма фазовых и химических превращений, происходящих в капиллярнопористом теле очень плодотворно может быть использована идея замкнутой системы. Полученные результаты дают возможность лучше разобраться в процессах, происходящих в открытой системе.

В качестве замкнутой капиллярнопористой системы был применен песчано-глинистый образец, находящийся в герметически закрытой трубке. С помощью термостатов один конец трубки поддерживается при повышенной температуре T'' , а другой при пониженной T' . Температурное поле по длине образца снимается с помощью термпар. Линейное распределение температуры вдоль оси достигается путем соответствующей термической изоляции боковой (цилиндрической) поверхности образца.

Влажность в различных сечениях образца определяется путем взятия проб и высушивания их в печи до постоянного веса. Пробы влажного песка извлекаются с помощью специального цилиндрического заборника (трубка с острыми краями), погружаемого в образец. Вдоль заборника расположены прорезы, позволяющие рассекать с помощью тонких пластинок пробу на участки определенной длины (10 - 20 мм). Таким способом находится среднее значение влажности в объеме каждого участка пробы. Число участков для образцов различ-

ной длины колеблется от 7 до 15.

С помощью описанной методики было изучено влияние на характер тепло- и массообмена начальной влажности образца, размеров фракции песка, разности температур $\Delta T = T'' - T'$, общего температурного уровня образца и т.д.

Из опытов с песчаными образцами следует, что во влажном капиллярнопористом теле под действием разности температур происходит большое число различных явлений. Причем некоторые из них (испарение влаги, фильтрация жидкости и пара, конденсация пара) оказывают решающее влияние на литейную технологию. Другие (термодинамическая циркуляция жидкости и пара, диффузия) вследствие их малой интенсивности могут не учитываться.

Благодаря использованию закрытой системы были точно установлены термодинамические условия испарения, переноса и конденсации вещества. Испарение влаги и конденсация пара происходят при наличии разности парциальных давлений пара между поверхностью жидкости и соседними зонами тела. Фильтрация пара осуществляется под действием этой разности давлений. При этом процессы фильтрации на несколько порядков превышают по своей интенсивности процессы диффузии. Количественную сторону процессов испарения, переноса и конденсации удается легко найти путем составления уравнения баланса массы: в закрытой системе количество испарившейся влаги в точности равно количеству профильтровавшегося и сконденсировавшегося пара.

Проведенный анализ показывает, что при расчете фазовых превращений, происходящих в литейной форме, вполне допустимо пользоваться общими уравнениями баланса теплоты и массы, причем в качестве движущих сил соответствующих процессов можно выбирать новесные значения величин: температур, парциальных давлений и т.д. Правильно составленные - с учетом найденных выше закономерностей - уравнения баланса позволяют выделить в общем количестве перенесенного пара долю сконденсировавшегося и потерянного в окружающую среду вещества. Опыты с открытой системой подтверждают эти выводы.

Глава III

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ХИМИЧЕСКИХ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ

Выполненный выше экспериментальный анализ механизма фазовых превращений в капиллярнопористом теле позволил составить наиболее общие уравнения баланса теплоты и массы. Имеем:

$$Q = Q_I + Q_{I\text{пер}} + Q_{II} + Q_{II\text{пер}} + Q_{III} + Q_{III\text{пер}} + Q_{IV} + Q_{IV\text{пер}} \quad \text{дж} \quad (2)$$

Индекс I относится к зоне I тела, в котором фазовые и химические превращения полностью завершены (температура T этой зоны выше температуры $T_{\phi.k}$ конца фазовых и химических превращения); II - к зоне II, имеющей температуру $T_{\phi.k}$; III - к зоне III, где температура падает до значения $T_{\phi.n}$ (начала фазовых и химических превращений); IV - к зоне IV, где температура уменьшается до начального значения $T_{\text{нач}}$. Индексом "пер" отмечены количества тепла, отвечающие эффектам перегрева (или переохлаждения) в различных зонах.

Для расшифровки величин Q , отражающих влияние фазовых и химических превращений, надо ввести понятие соответствующей спектральной теплоты. Удельная спектральная теплота представляет собой количество тепла фазовых или химических превращений, которое выделяется или поглощается в процессе изменения температуры тела массой 1 кг на величину dT . Имеем

$$z_{\text{сп.ф}} = \frac{dz_{\phi}}{dT} \quad \text{дж/(кг·град)}, \quad (3)$$

где z_{ϕ} - полное удельное тепло фазового или химического превращения, происходящего в интервале ΔT_{ϕ} . Величина

$$z_{\phi} = \int_{T_{\phi.n}}^{T_{\phi.k}} z_{\text{сп.ф}} dT \quad \text{дж/кг} \quad (4)$$

Если учесть теплоемкость C тела в интервале $\Delta T_{\phi} = T_{\phi.k} - T_{\phi.n}$, то получится эффективная удельная спектральная теплота фазового или химического превращения

$$Z_{\Sigma \text{ ф. эф}} = Z_{\Sigma \text{ ф}} + C \quad \text{дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}). \quad (5)$$

В сложных случаях в капиллярнопористом теле могут происходить одновременно испарение, конденсация, сублимация, а также горение и другие химические реакции. Каждая из них может иметь свой интервал температур превращения. В таких случаях суммарный удельный спектральный тепловой эффект превращения может быть определен по формуле:

$$Z_{\Sigma \text{ ф}} = \pm \sum_{i=1}^{i=n} g_{oi} \frac{dz_{\phi i}}{dT_i} \quad \text{дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}), \quad (6)$$

где n - общее число превращений; g_{oi} - содержание i -той добавки (например, связующего) в смеси, кг/кг. Знак плюс в формуле (6) соответствует поглощению (эндотермический процесс), а знак минус - выделению (экзотермический процесс) теплоты превращения.

Для грубо приближенных расчетов можно пользоваться выражениями:

$$Z_{\Sigma \text{ ф}} = \pm g_o \frac{Z_{\phi}}{\Delta T_{\phi}} ; \quad (7)$$

$$Z_{\Sigma \text{ ф. эф}} = C \pm g_o \frac{Z_{\phi}}{\Delta T_{\phi}} , \quad (8)$$

где Z_{ϕ} и ΔT_{ϕ} относятся ко всем n фазовым и химическим превращениям одновременно.

Второй температурный уровень (до 300 °C) фазовых и химических

превращений теоретически и экспериментально изучен на примере плавления и отвердевания пульвербакелитовой смеси, соприкасающейся с нагретым кокилем или металлической моделью.

Частное решение общего уравнения (2) получено для случая, когда неравновесный перегрев (и переохлаждение) отсутствует и $\Delta T_{\Phi} = 0$ ($Q_{\Phi} = Q_{\Psi} = 0$). Принято, что распределение температуры в сечении тела отвечает уравнению параболы n -го порядка. При этом закон продвижения фронта фазового и химического превращения описывается уравнением

$$\xi = \sqrt{\frac{2n\lambda}{\frac{1}{n+1} \rho c + \frac{\rho z_{\Phi} z_{\Psi}}{T_n - T_{\Phi}}} t} \quad (9)$$

Принято, что в начальный момент ($t = 0$) толщина прореагировавшего слоя $\xi = 0$. В формуле (9) λ - коэффициент теплопроводности тела; ρ - его плотность; T_n - температура поверхности тела, равная температуре модели или кокиля; T_{Φ} - температура превращения; t - время. Из формулы (9) в частном случае получаются известные решения, описывающие процесс затвердевания отливки. По формуле (9) рассчитывается длительность фазового и химического превращения.

Если интервал температур фазовых и химических превращений не равен нулю ($T_{\Phi} \neq 0$), то, соответствующее частное решение уравнения (2) принимает вид:

$$\xi_n = \sqrt{\frac{2n\lambda}{\rho c \left[\frac{1}{n+1} + \frac{T_{\Phi n} - T_0}{T_n - T_{\Phi n}} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{\Phi}}{T_n - T_{\Phi n}}} \right) \frac{z_{\Phi} z_{\Psi}}{c(T_n - T_{\Phi n})} \right]} t}; \quad (10)$$

$$\xi_k = \xi_n \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{\Phi}}{T_n - T_{\Phi n}}} \quad , \quad (11)$$

где ξ_n и ξ_k - координаты фронтов начала и конца превращения; T_0 - начальная температура тела.

Решения (IО) и (II) проверены в экспериментах с пульвербакелитовой смесью, которая насыпается на стальную плиту, расположенную горизонтально. В опытах использовалась смесь, состоящая из песка, плакированного пульвербакелитом в количестве 2,5 % (по массе). Следовательно, относительная масса пульвербакелита в смеси $g_0 = 0,025$. Температура стальной плиты $T_{\text{п}} = 240^{\circ}\text{C}$, начальная температура пульвербакелита $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Толщина отвердевшей корки ξ_k , соответствующей концу фазовых превращений, и толщина ξ_n , соответствующая началу плавления, определялись двумя различными способами. Согласно первому способу, в пульвербакелитовую смесь периодически погружается деревянный или металлический шуп диаметром в несколько миллиметров. Непрореагировавшая смесь легко раздвигается и позволяет нащупать фронт вязкой (расплавленной) массы. Дальнейший нажим на шуп дает возможность установить фронт затвердевшей смеси. Многократные измерения глубины погружения шупа позволяют за один опыт установить весь ход изменения величин ξ_n и ξ_k со временем. Согласно второму способу, смесь через некоторое время после засыпки удаляется путем опрокидывания плиты. Непрореагировавшая смесь осыпается, а расплавленная и затвердевшая — остаются. Глубины выноски шупом фиксируются. Недостатком этого способа является то, что для снятия одной кривой $\xi = f(t)$ надо многократно повторять опыт при различных t . Эксперименты показали, что оба способа дают практически тождественные результаты. При этом расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными: погрешность расчета не превышает 10 %.

Аналогичным способом найдены приближенные аналитические решения задачи о распространении фронта фазовых и химических превращений в тонком теле (корка или облицовка) при $\Delta T_{\text{ф}} \neq 0$. Выведенные формулы, а также выражения (9)–(10), позволяют рассчитывать процесс отвердевания пульвербакелитовой смеси при подготовке формы.

Третий температурный уровень (до 1400°C) фазовых и химических превращений теоретически и экспериментально изучен на примере взаимодействия пульвербакелитовой смеси с чугуновой отливкой. Этот случай взаимодействия представляет большой практический интерес, так как часто встречается в литейном производстве. Однако

решить эту задачу в общем виде очень трудно (получаются громоздкие математические выражения). Здесь мы ограничимся рассмотрением лишь двух простейших частных случаев, когда толщина формы велика в сравнении с толщиной отливки и когда толщина формы (облицовки) мала в сравнении с толщиной отливки. В первом случае можно принять, что отливка охлаждается в неограниченной неметаллической форме, во втором – можно пренебречь теплоаккумулирующей способностью облицовки и считать, что последняя играет только роль термического сопротивления. В обоих случаях принято, что отливка охлаждается с относительно малой интенсивностью ($Bi_1 \ll 1$).

При решении поставленной задачи для первого частного случая (массивная форма) целесообразно воспользоваться методом определения эффективных значений коэффициентов аккумуляции теплоты формы. В общем случае при наличии фазовых и химических превращений для плоской формы эффективный коэффициент аккумуляции теплоты $b_{2\text{эф}}$ может быть найден по следующей формуле:

$$b_{2\text{эф}} = b_2 \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{ф}}}{T_{\text{кр}} - T_{2\text{нач}}} \sqrt{1 + (n_2 + 1) N_{\text{ф}}} , \quad (12)$$

где b_2 – коэффициент аккумуляции материала формы, в которой завершены фазовые и химические превращения; $N_{\text{ф}}$ – известный критерий подобия; индекс 2 относится к форме.

С помощью коэффициента $b_{2\text{эф}}$ продвижение фронта затвердевания в отливке подсчитывается по формуле

$$\xi = \sqrt{\frac{2n_2}{n_2 + 1}} \frac{b_{2\text{эф}} (T_{\text{кр}} - T_{2\text{нач}})}{\rho_1 z_{1\text{эф}}} \sqrt{t} , \quad (13)$$

где индекс 1 относится к отливке.

Охлаждение полностью затвердевшей отливки может быть приближенно рассчитано по формуле

$$\frac{T_1 - T_{2\text{нач}}}{T_{\text{кр}} - T_{2\text{нач}}} = e^{-\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{b_{2\text{эф}}}{\rho_1 x_{1\text{с}}} (\sqrt{t} - \sqrt{t_2})} , \quad (14)$$

где X_I - половина толщины отливки; t_s - длительность охлаждения отливки до момента полного затвердевания металла.

Найденные решения проверены в опытах с охлаждением чугуновой отливки в форме из пульвербакелитовой смеси прежнего состава. В экспериментах измерены температурные поля отливки и формы. Расчет процесса охлаждения отливки по выведенным выше формулам сопоставлен с результатами экспериментов. Расхождения расчетных и опытных данных при определении температуры не превышает 4 %, а при определении времени достижения отливкой температуры 950 °C - 15 %.

Аналогичным приближенным способом решена вторая частная задача об охлаждении отливки в тонкостенной форме с фазовыми и химическими превращениями (корка или облицовка). Полученные решения использованы для выбора оптимального технологического процесса литья чугуна в облицованный кокиль.

Глава IV

ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА

На основе разработанной теории, описывающей фазовые и химические превращения, которые происходят в песчано-глинистой литейной форме, был рассчитан технологический процесс изготовления в облицованном кокиле чугунных гильз для цилиндров двигателя грузовой автомашины ЗИЛ-130. Годовая потребность СССР в цилиндрических гильзах составляет около 18 миллионов штук. Ранее они отливались в землю, поэтому кокильный вариант процесса имеет важное народнохозяйственное значение. К материалу гильз предъявляются повышенные требования, поэтому тщательный теоретический выбор оптимальных параметров технологии является необходимым условием успешного решения поставленной задачи. В результате проведенных теоретических расчетов и доводочных экспериментов в Минском филиале НИИТАвтопрома был осуществлен технологический процесс литья чугуна в облицованный кокиль. Работа по выбору оптимального теплового режима гильзы и облицованного кокиля была выполнена кафедрой

рой Теоретической и общей теплотехники БИИ по договору с Минским филиалом НИИТАвтомпрома. В соответствии с договором, тепловые расчеты осуществлены нами по изложенной выше методике.

Кокиль для отливки гильз имеет вертикальный разъем и состоит из двух половинок, изготовленных из чугуна или алюминия (с анодированной внутренней поверхностью), центральный стержень стальной. Кокиль содержит два гнезда для двух отливок, между ними расположен литниковый стояк, раздающий металл через два вертикальных щелевых питателя. Поверхности кокиля, стержня, питателей, стояка и литниковой чаши, соприкасающиеся с заливаемым металлом, облицованы слоем песчаной смеси толщиной 4 мм. Песок плакирован пульвербакелитом в количестве 2,5 %. Смесь с помощью пескодувной машины надувается в зазор между кокилем и стержнем - с одной стороны - и стальной моделью - с другой. Длительность надува - десятые доли секунды, длительность отвердевания смеси - несколько секунд. Смесь удерживается на кокиле и стержне силами сцепления, от модели облицовка отстает благодаря наличию разделительной смазки СКТ-Р (синтетический каучук термостойкий - разделительный). Перед первой заливкой кокиль и модель подогреваются электрическими нагревателями до температуры 180-200 °С (при этом длительность отвердевания облицовки составляет 30+40 сек), при последующих заливках начальная температура системы устанавливается на уровне 260-280 °С (длительность отвердевания облицовки равна 12+15 сек). Избыточная теплота, поступающая из отливки, отводится от кокиля и стержня водой. Температура заливаемого чугуна равна 1300-1400 °С, длительность заливки $t_z = 12$ сек. Кокиль раскрывается и отливка извлекается через 3 мин ($t_n = 180$ сек). При этом температура отливки составляет около 950 °С.

Работа кокильной машины, изготавливающей цилиндрические чугунные гильзы, показала высокие технико-экономические качества нового метода. Отлитые гильзы были всесторонне испытаны, в том числе на работающих двигателях. Они не хуже аналогичных гильз, отлитых в землю, а по некоторым свойствам кокильные гильзы превосходят земляные. По производительности новый метод во много раз лучше прежнего, стоимость кокильных гильз значительно ниже получаемых в землю. В настоящее время в Минском филиале НИИТАв-

топрама спроектирована и изготавливается многопозиционная полув-
 автоматическая литейная машина для массового производства гильз
 новым методом.

При проектировании машины использованы рекомендации, полу-
 ченные в настоящей работе. В частности, время выдержки отливки
 в кокиль определялось по приведенным выше формулам. Максималь-
 ной производительности литейной машины соответствует минималь-
 ное время выдержки.

Для обеспечения достаточно высокой температуры облицовки,
 чтобы за время охлаждения отливки успел выгореть весь пульвер-
 бакелит, была рассчитана необходимая (минимальная) толщина ано-
 дированного слоя алюминиевого кокиля по формуле:

$$\chi_{\text{ан}} = \frac{\lambda_{\text{ан}}}{\lambda_{\text{ос}}} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{\text{ок.п}}} - 1 \right) \chi_{\text{ос}}. \quad (15)$$

При этом облицовка осыпается и отпадает операция очистки кокиля.

Наконец, интенсивность водяного охлаждения, обеспечивающего
 необходимую начальную температуру кокиля в цилле, определялась
 с помощью специальных уравнений теплового баланса.

ВЫВОДЫ

1. В работе впервые в наиболее общем виде поставлена и тео-
 ретически и экспериментально решена задача о тепловых эффектах
 фазовых и химических превращений, происходящих в песчано-глинист-
 ой литейной форме при ее подготовке и взаимодействии с отливкой.
 Общая задача проанализирована на примере трех различных темпера-
 турных уровней: до 100 °C (испарение и конденсация влаги в отдель-
 ных капиллярах и капиллярнопористых телах, каковые являются мо-
 делью песчано-глинистой формы и литейного стержня), до 300 °C
 (плавление и отвердевание пульвербакелитовой смеси при ее взаимо-
 действии с кокилем или моделью), до 1400 °C (деструкция, суб-
 лимация, горение и т.д. пульвербакелитовой смеси при ее

взаимодействии с залитым чугуном) – последний случай является наиболее общим и наиболее сложным. Разработан метод расчета теплового режима отливки и формы с учетом фазовых и химических превращений, выведены формулы для выбора оптимального технологического процесса литья чугуна в облицованный кокиль. Результаты работы внедрены в производство.

2. Для изучения фазовых и химических превращений составлены общие уравнения баланса теплоты и массы, учитывающие наличие интервала температур $\Delta T_{\text{ф}}$ превращений, неравновесный характер процессов и т.д. Для практических целей рекомендованы упрощенные частные варианты (случаи) этих уравнений.

3. Наиболее общим образом сформулировано понятие удельной спектральной теплоты фазовых и химических превращений. Оно учитывает зависимость теплового эффекта превращений от температуры и скорости изменения температуры. Для практических расчетов рекомендованы упрощенные формулы, по которым определяется суммарный тепловой эффект от n превращений с учетом теплоемкости тела (эффективная суммарная удельная спектральная теплота фазовых и химических превращений).

4. Первый температурный уровень фазовых превращений (до 100°C) изучен на примере испарения и конденсации влаги в цилиндрических стеклянных капиллярах и песчано-глинистых образцах. Экспериментально установлено, что известная теоретическая формула Стефана (1882 г.), по которой часто рассчитывается процесс испарения влаги из капилляров и капиллярнопористых тел, недостаточно точно отражает влияние диаметра капилляра (при больших влажностях φ окружающей среды), влажности окружающей среды и характера изменения потока массы со временем. Например, при $\varphi = 100\%$ расчетная величина потока массы может в несколько раз отличаться от действительной, причем погрешность расчета возрастает с увеличением диаметра капилляра.

5. Экспериментально изучен механизм испарения, переноса (фильтрации) и конденсации влаги в песчано-глинистых образцах (закрытая система). Установлено, что в условиях сушки форм и стержней, а также при их взаимодействии с отливкой можно пренебречь диффузией и круговой термодинамической циркуляцией жидкости и пара в капиллярах и порах тела - в этом процессе влага скапливается у горячего конца образца. Решающее значение имеют два других процесса. В первом влага испаряется в горячей зоне, пар фильтруется в холодную и там конденсируется. Интенсивность этого процесса возрастает с ростом температуры и уменьшением размера фракции песка. В чистом виде этот процесс наблюдается до влажностей 3-4 %. С увеличением влажности растет число заполненных водой капилляров, при этом усиливается действие второго процесса - выжимания влаги из горячей зоны в холодную под действием разности парциальных давлений пара. Интенсивность этого процесса возрастает с увеличением температуры и размеров фракции песка. Анализ показывает, что при расчете обоих этих процессов допустимо пользоваться общими уравнениями баланса массы и теплоты с использованием равновесных значений движущих сил - температуры, давления и т.д.

6. Второй температурный уровень фазовых и химических превращений (до 300 °C) изучен на примере плавления и отвердевания пульвербакелитовой смеси при ее взаимодействии с металлической моделью или кокилем. Общие уравнения баланса теплоты и массы и понятие спектральной теплоты использованы для аналитического решения задачи о продвижении фронта фазовых и химических превращений в массивном (форма) и тонком (корка или облицовка) телах при отсутствии ($\Delta T_{\phi} = 0$) и наличии ($\Delta T_{\phi} \neq 0$) интервала температур превращений. Расчетные формулы проверены путем сопоставления с известными решениями (для случая $\Delta T_{\phi} = 0$) и экспериментально (для случая $\Delta T_{\phi} \neq 0$). В экспериментах измерялась скорость продвижения фронтов начала (плавления) и конца (отвердевания) превращений в пульвербакелитовой смеси, соприкасающейся со стенкой нагретого кокиля. Сравнение опытных и расчетных данных показывает, что погрешность расчета не превышает 5-10 %.

7. Третий температурный уровень фазовых и химических превращений (до 1400 °C) изучен на примере взаимодействия пульвербаке-

литовой смеси с чугуниной отливкой. Общие уравнения баланса теплоты и массы и понятие спектральной теплоты использованы для аналитического решения задачи об охлаждении металлов в форме, в которой происходят фазовые и химические превращения. В экспериментах снято температурное поле чугуниной отливки и кокиля, облицованного пульвербакелитовой смесью. Сравнение опытных и расчетных данных показывает, что погрешность расчета не превышает 4-15 %.

8. На основе выведенных формул разработан метод выбора оптимального технологического процесса литья чугуна в облицованный кокиль. Расчет предусматривает выбор максимальной производительности литейной машины, минимального слоя окисной пленки на алюминиевом кокиле, обеспечивающей выгорание пульвербакелита облицовки за время охлаждения отливки, и необходимого охлаждения кокиля для обеспечения заданной температуры перед новой заливкой.

9. Предложенный метод расчета использован на практике для выбора оптимального режима литья чугуниной гильзы двигателя грузового автомобиля ЗИЛ-130 в облицованный пульвербакелитовой смесью кокиль. Новый процесс позволяет в 1,7 раза повысить производительность труда (по сравнению с центробежным методом), резко сократить расход формовочных материалов, повысить культуру производства, в широких пределах регулировать структуру и свойства гильзы, улучшить чистоту поверхности, повысить точность, увеличить выход годного и разработать автоматизированное оборудование. Согласно технико-экономическому расчету Минского филиала НИИТАвтопрома, внедрение в производство технологического процесса литья автомобильных гильз в облицованные кокили позволит только по одному Житомирскому заводу запасных частей получить суммарный годовой экономический эффект 73 тыс. рублей, а в масштабах всей отрасли автомобилестроения - 986 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

1. Н.Е. Волкова. Экспериментальное исследование процессов испарения и конденсации жидкости в капиллярах и капиллярнопористых телах. Сб. "Охлаждение отливки", стр. 44-50. Минск, изд-во "Наука и техника", 1969.

2. А.И. Вейник, Н.Е. Волкова. Проверка формулы Стефана, определяющей скорость испарения жидкости из капилляра. Сб. "Охлаждение отливки", стр. 51-53. Минск, изд-во "Наука и техника", 1969.

3. Н.Е. Волкова. Тепловой расчет фазовых и химических превращений, происходящих в песчаной смеси облицованного кокиля. Сб. "Вопросы прочности и пластичности металлов", стр. 157-158. Минск, изд-во "Наука и техника", 1970.

4. А.И. Вейник, Н.Е. Волкова. Изучение механизма испарения влаги в литейном стержне при его сушке. Сб. "Новое в литейном производстве". НТО БЕЛМАШПРОМ. Тезисы докладов республик. научно-технич. конф. 24-26 ноября 1970 г., Минск, 1970.

Основные результаты доложены и обсуждены:

1. На XXV, XXVI научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института совместно с работниками промышленности и строительства (Минск, 1969, 1970 гг.).

2. На республиканской научно-технической конференции "Новое в литейном производстве" НТО БЕЛМАШПРОМ (Минск, 1970 г.).

АТ 03126. Подписано в печать 15/III-71г.

Формат 60х84¹/16. I, 3леч.л., I, 5уч.-изд.л. Тир. 200. Зак. 242.

Отпечатано на ротапринте БПИ. Минск, Ленинский пр., 65.