

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛИТЬЯ

УДК 621.74.04:620.1:536.2.061.62

На правах рукописи

КОРНИЕЦ Ирина Васильевна

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ И АРМИРОВАННЫХ
МАТЕРИАЛОВ

специальность 05.16.04 - литейное производство

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

Киев - 1994

АВ 29.7.18

Диссертация на правах рукописи

Работа выполнена в Институте проблем литья НАН Украины.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00810388 (S)

Научные руководители:

- доктор технических наук, профессор, Затуловский Сергей Семенович;
- кандидат технических наук, Тарасевич Николай Иванович

Официальные опоненты:

- доктор технических наук, профессор Катрус Олег Александрович;
- доктор технических наук Котлярский Франко Марьянович

Ведущая организация - Киевский политехнический институт

Защита состоится "27" мая 1994 года в 10 часов на заседании специализированного совета Д 016.20.01 Института проблем литья НАН Украины.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 252142, г.Киев, ГСП-680, пр.Вернадского 34/1 Институт проблем литья НАН Украины
Телефон для справок: 444-34-50

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем литья НАН Украины

Автореферат разослан "27" апреля 1994 г.

И.о. ученого секретаря специализированного ученого совета Д 016.20.01 доктор техн. наук

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України


А.В.Черновол

Актуальность проблемы. Развитие научно-технического прогресса в машиностроении, станкостроении, энергетике и других отраслях промышленности в значительной мере связано с разработкой и применением новых материалов способных улучшить эксплуатационные показатели двигателей, машин, агрегатов, приборов, повысить их надежность, срок службы и снизить материалоемкость. Успехи науки в области материаловедения за последние десятилетия привели к созданию нового класса материалов - композиционных.

Особое место среди композиционных материалов занимают литые материалы, обладающие рядом несомненных преимуществ по сравнению с обычными способами синтеза - это более низкая энерго- и ресурсоемкость; возможность использования вторичного сырья и отходов производства; возможность механизации и автоматизации производства.

В последние годы появилось большое количество работ по вопросам химии, физики, механики композиционных материалов - это работы К.И. Портного, Д.М. Карпиноса, И.Н. Фридляндера, Л.Браутмана, К. Крейзера, Л.В. Заболотного, Л.П. Хорошуна и др. Среди них можно отметить работы Ф.Д. Оболенцева - о физико-химических процессах при композиционном литье; А.А. Заболоцкого - о композиционных материалах получаемых пропиткой; М.Л. Заславского - о получении армированных отливок литьем под давлением; Л.Б. Медовара - о литых армированных материалах, С.С. Затуловского - о литых макрогетерогенных композиционных материалах, армированных гранулами.

Систематизация и анализ информации о методах исследования гетерогенных систем, особенностях различных стадий получения литых композитов, вариантах взаимодействия исходных компонентов, способах конструирования, может расширить область их применения и определить пути оптимизации технологии. Поэтому целенаправленные исследования по изучению теплофизических особенностей формирования литых композитов и развитие теоретических основ литья композиционных материалов, прогнозирование и оптимизация параметров технологий получения материалов с наперед заданным комплексом физико-технологических свойств несомненно важная и актуальная задача. В данной работе решение указанных задач осуществлялось посредством применения компьютерной техники, методов математического и статистического моделирования, вычислительного эксперимента.

Цель работы и задачи исследования:

- разработать математические модели исследования процессов формирования литых композиционных материалов различного типа с учетом технологических особенностей их получения;
- анализ некоторых теплофизических особенностей формирования литых композиционных и армированных заготовок;
- исследовать влияние технологических, теплофизических и геометрических факторов на термо-временные характеристики формирования литых композиционных заготовок;
- разработать методику прогноза свойств литых композиционных материалов в зависимости от типа композита, массового соотношения компонентов, ориентации волокон (слоев);
- разработать методологию построения компьютерной системы проектирования литых композиционных материалов с наперед заданным комплексом физико-механических и служебных свойств.

Научная новизна. Учитывая технологические особенности получения литых композиционных и армированных заготовок предложены и реализованы различные подходы к построению математических моделей для исследования тепловых процессов их формирования: в модели для зернистых литых композитов учитывается изменение массового состава компонентов и согласно разработанной методике определяется динамика изменения свойств как функции координат и температуры; при моделировании процессов формирования армированных и слоистых заготовок особенности технологических приемов учитываются за счет выбора условий на внутренних и внешних границах.

Впервые методом вычислительного эксперимента установлено влияние геометрических, технологических и теплофизических параметров на процессы формирования литых композитов, получаемых по различным технологическим схемам.

Для литых композиционных материалов разработана методика расчета, предложен алгоритм и создана компьютерная система прогноза физико-механических характеристик в зависимости от массового соотношения компонентов, типа материала, ориентации волокон либо слоев.

Практическая значимость. Предлагаемые математические модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение, а также результаты проведенных теплофизических исследований могут быть использованы при выполнении научно-исследовательских работ и при разработке новых технологических процессов производства литых

композиционных и армированных заготовок, а также в базах знаний специализированных экспертных систем.

Результаты исследований позволили обоснованно выбрать рациональные режимы производства литых макрогетерогенных композиционных материалов (М2+ШХ15, К3Мц1+ШХ15) и штамповых заготовок, которые внедрены на таких предприятиях: завод "Тяжмаш" (г. Мариуполь), Лутугинское объединение прокатных валков; МК "Азовсталь" и др.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием фундаментальных положений механики сплошной среды, современными методами построения математических моделей и компьютерных систем, а также сопоставлением результатов расчета с прямыми замерами на лабораторных и промышленных установках, расхождение между значениями которых не превышают 5-10 %.

На защиту выносятся:

- математические модели для исследования процессов теплопереноса при формировании литых композиционных и армированных заготовок, учитывающие технологические особенности их производства;

- результаты исследований по влиянию геометрических, теплофизических и технологических параметров на затвердевание литых композиционных заготовок;

- методика и компьютерная система прогноза физико-механических характеристик литых композитов в зависимости от их типа, массового соотношения компонентов, ориентации волокон (слоев);

- методологический подход к построению структуры компьютерной системы проектирования литых композиционных материалов с наперед заданным комплексом служебных и физико-механических свойств.

Публикации и апробация работы. Основные положения и результаты работы опубликованы в 12 статьях, доложены на IV и V Всесоюзных научно-технических конференциях "Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерное моделирование" (г.Ижевск, 1990, 1992 г.г.), II школе молодых ученых по численным методам механики сплошных сред (г.Абакан, 1989г.), I Всесоюзной конференции "Теория и практика процессов получения биметаллических и композиционных отливок" (г.Киев, 1991г.), семинаре "Моделирование физико-химических процессов, создание банков данных, расчетно-информационных и экспертных систем в области сварки и родственных технологий" (Алушта, 1993г.), семинаре "Нетрадиционные методы

снижения металлоемкости и повышения качества отливок" (г.Киев, 1993г.).

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературных источников из 129 наименований, приложений и содержит 139 страниц машинописного текста, 38 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В основу литейных технологий получения композитов положено соединение жидкой и твердой фаз. Их формирование происходит в результате реализации многостадийных процессов, из которых можно выделить следующие основные этапы - заливка, смачивание и растекание матрицы, сопровождающиеся возникновением физического контакта между твердой и жидкой фазами, растворение, химическое и диффузионное взаимодействие, кристаллизация и охлаждение. Ведущее место среди перечисленных процессов, определяющих в конечном счете структуру композита и его эксплуатационные свойства, занимают тепловые.

При получении слоистых литых композиционных заготовок, процессы затвердевания, на первом этапе, будут определяться перераспределением тепловых потоков от жидкого металла через форму и свободную поверхность. Величина теплового потока со свободной поверхности определяется температурой окружающей среды и скоростью конвективных потоков у этой границы. При отсутствии принудительного охлаждения поверхностных слоев затвердевающего металла величина этой составляющей падает по мере снижения температуры.

Тепловой поток через донную часть зависит от теплофизических характеристик материала поддона, условий контакта металла с формой. При использовании теплоизолирующих прослоек появляется термическое сопротивление, которое может оказаться определяющим при формировании теплового потока через эту границу.

Следующим лимитирующим звеном тепловому потоку от жидкого металла является толщина формы (подложки) и, наконец, тепловые условия на наружной поверхности формы. Величина теплового потока определяется теплофизическими характеристиками материала и величиной конвективных потоков в жидкой металлической ванне. Их интенсивность определяется технологическими приемами и геометрическими характеристиками изделия.

Для многослойных композиционных заготовок формирование последующих слоев определяется величиной теплового потока через затвердевший слой.

При получении армированных и волокнистых заготовок появляется дополнительная составляющая теплового потока идущая на их разогрев. Вследствие чего у боковых стенок нарушается направленное затвердевание, что приводит к объемному затвердеванию у теплоотводящих поверхностей.

Использование внешних воздействий позволяет управлять интенсификацией тепловых потоков в жидком металле, например, применение давления приводит к уплотнению структуры металла.

При получении литых макрогетерогенных композиционных материалов с использованием гранул можно выделить две характерные зоны теплопередачи - внутренние и у теплоотводящих поверхностей. Внутренние объемы формируются за счет теплообмена между матрицей и включениями. Соотношение начальных температур и теплофизических свойств исходных материалов обуславливают качество их соединения, а также структуру материала в переходной зоне. Перераспределение тепловых потоков между боковой и донной поверхностями зачастую приводит к изменению направленного затвердевания. На свободной поверхности теплообмен происходит за счет радиации и конвекции.

При моделировании процессов формирования литых макрогетерогенных композиционных материалов, армированных гранулами, получаемых литьем и пропиткой считаем, что:

1) время заполнения жидким металлом пространства между гранулами мало по сравнению со временем формирования композита;

2) теплофизические характеристики зависят от температуры и определяются исходя из массового соотношения матричного металла и гранул;

3) получаемый композит является зернистым (согласно принятой в работе классификации) материалом со случайной структурой, что дает возможность проводить осреднение при определении параметров среды.

При моделировании процессов формирования армированных и слоистых материалов особенности технологических приемов учитываются за счет выбора условий на внутренних и внешних границах и выбором геометрии расчетной области. Таким образом, в общем случае уравнение, описывающее изменение теплового состояния в

многосвязной неоднородной среде с учетом фазовых превращений можно представить в виде:

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = \operatorname{div} (\lambda_i \cdot \nabla T) + f_i \quad (1)$$

где $W_i = \int_0^T c_i \cdot \gamma_i \cdot dT + \kappa_i \cdot \gamma_i \cdot \eta(T)$ - энтальпия, c_i, γ_i, λ_i - теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности соответственно, зависящие от температуры и координат; κ_i - скрытая теплота кристаллизации; $\eta(T)$ - объемная доля жидкой фазы при фазовом переходе; f - объемная плотность джоулевых источников, $i = 1, \dots, n$ - количество сред (слоев).

При неидеальном тепловом контакте двух сред (слоев) удельные потоки энергии непрерывны при переходе через границу l , однако искомое решение оказывается разрывным

$$\left[(\lambda_i \cdot \nabla T) \cdot n_{l_i} \right]_{l_i} = 0 \quad (2)$$

$$\alpha_i [T]_{l_i} = (\lambda_i \cdot \nabla T) \cdot n_{l_i} \quad (3)$$

где α_i - коэффициент теплопередачи между неоднородностями (слоями, волокнами); $[T]$ - скачок температур, который претерпевает температурное поле на границе неидеального контакта по направлению нормали к границе l ; $l_i = \partial \omega_i$ - внутренние границы, n_{l_i} - проекция вектора нормали к границе l_i .

Граничные условия в общем случае можно представить в виде (теплообмен за счет радиации и конвекции одновременно):

$$\lambda \cdot \nabla T = \varepsilon_{\Lambda} \cdot \sigma_{\Lambda} \cdot \varphi_{\Lambda} (T_{\Lambda}^4 - T_{cp.}^4) + \alpha \cdot [T]_{\Lambda} \quad (4)$$

где $\Lambda = \partial \Omega$ - внешние границы; σ - постоянная Стефана-Больцмана; ε - степень переизлучения; φ - степень черноты; $\Omega = \sum_1^i \omega_i$.

В начальный момент времени считаем заданной температуру каждого из материалов:

$$T_i|_{t=0} = T_{i0} \quad (5)$$

и массовое соотношение компонентов.

Композиционные материалы, армированные гранулами, в основном имеют случайную структуру, обусловленную, как неправильной формой армирующих элементов, так и случайным расположением, применение теории случайных функций при определении эффективных значений макроскопических характеристик позволяет охватить практически все наблюдаемые структуры. Поэтому при моделировании процессов формирования материалов, армированных гранулами считаем, что теплофизические характеристики, входящие в уравнение (1), являются случайными функциями координат и статистически однородны на расстояниях значительно превосходящих размеры неоднородностей среды. Учитывая принятые допущения, теплофизические характеристики определяем исходя из массового соотношения компонентов - матрицы и армирующих гранул следующим образом:

- коэффициент теплопроводности, $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \langle \lambda \rangle = \frac{v_1 \cdot v_2 \cdot \lambda_3^2}{3 \cdot \langle \lambda \rangle + (v_2 - v_1) \cdot \lambda_3} \quad (6)$$

где $\lambda_3 = \lambda_1 - \lambda_2$; $\langle \lambda \rangle = \lambda_1 \cdot v_1 + \lambda_2 \cdot v_2$

- плотность, $\bar{\gamma}$

$$\bar{\gamma} = \gamma_1 \cdot v_1 + \gamma_2 \cdot v_2 \quad (7)$$

- теплоемкость, \bar{c}

$$\bar{c} = c_1 \cdot v_1 + c_2 \cdot v_2 \quad (8)$$

При получении зернистых композиционных материалов одним из определяющих физических процессов наряду с теплопередачей являются процессы пропитки жидким металлом объема, занятого включениями. Предполагаем, что продвижение жидкого металла описывается уравнением Дарси в виде

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} = \theta \cdot \mu \cdot v + \beta \cdot \gamma_{ж} \cdot v^2 \quad (9)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости жидкого металла; P , $\gamma_{ж}$ - давление и плотность жидкого металла; v - скорость течения расплава; $\theta(t)$, $\beta(t)$ - вязкостный и инерционный коэффициенты определяемые экспериментально. Дополнив его уравнением неразрывности среды

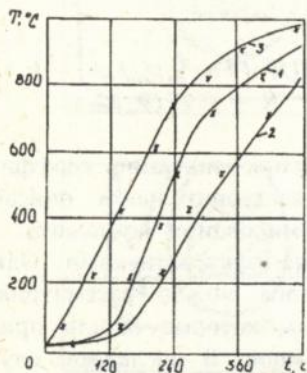
$$\operatorname{div} v = 0 \quad (10)$$

получим замкнутую систему уравнений для описания процессов формирования композиционных материалов.

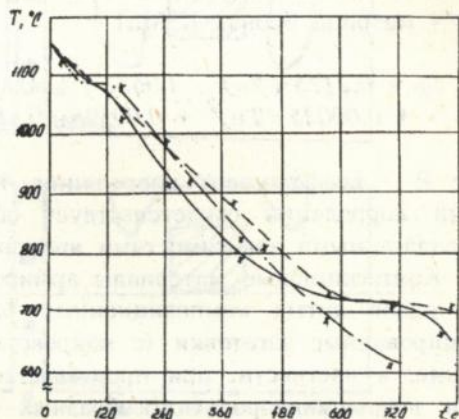
Известно, что окончательная структура литого композита формируется под влиянием двух групп факторов: физико-химических и технологических. Основными факторами в первой группе являются физико-химические свойства армирующих элементов и матрицы, характер их взаимодействия. Во второй группе - геометрические параметры армирующих элементов и матричного материала, способ литья композита и все параметры связанные с соответствующей технологией. Изучение комплексного влияния перечисленных факторов является существенным при создании композитов с наперед заданным комплексом физических и эксплуатационных свойств.

Композиционные материалы, армированные гранулами. В качестве матричных материалов использовались медь М2 и бронза КЗМц1, включений - гранулы стали ШХ15. На рис.1 для сопоставления приведены температурные кривые (расчетные и экспериментальные), полученные в процессе пропитки бронзой КЗМц1 гранул стали ШХ15 (а) и кривые охлаждения армированной отливки медь М2 + гранулы стали ШХ15, полученной литьем (б). Как видно расхождение температур незначительно, что свидетельствует об адекватном описании предлагаемой моделью реальных процессов. При проведении вычислительного эксперимента установлено, что изменение начальной температуры исходных материалов (матрицы и включений) в интервале 1150 - 1250 °С приводит к линейному увеличению времени, необходимому для достижения во всем объеме кристаллизующегося композита температуры меньше или равной температуры плавления матрицы (времени формирования композита).

При получении литых макрогетерогенных композиционных материалов, армированных гранулами, процесс формирования можно разбить на три этапа, каждый из которых отличается характером изменения скорости охлаждения: первый - соответствует снятию теплоты перегрева матричного металла, второй - времени выделения скрытой теплоты фазовых превращений в интервале затвердевания,



a)



б)

Рис.1

Распределение температур при получении литых макрогетерогенных заготовок, армированных гранулами, получаемых пропиткой (а) и литьем (б) : ---- - армированная отливка; x - результаты натуральных экспериментов; - - - моноотливка меди; . . - разогретые гранулы

третий – выравниванию температуры затвердевшего композита. Продолжительность этапов определяется начальным тепловым состоянием компонентов, условиями контакта и свойствами матричного металла и армирующих гранул, а также интенсивностью теплообмена с окружающей средой.

Для изучения комплексного влияния перечисленных выше параметров использовали методы планирования эксперимента и регрессионный анализ. Был составлен план вычислительного эксперимента относительно начальной температуры исходных материалов (T_{II}), которая варьировалась от 1150 до 1250 $^{\circ}\text{C}$, и массового содержания гранул (%vkl) от 10 до 90%. Обработка результатов эксперимента позволила получить в виде полиномов второго порядка зависимость времени формирования композита ($t_{\text{ф}}$, сек) от перечисленных выше параметров. Ниже приводятся эти зависимости для двух матричных материалов:

- матрица медь М2

$$t_{\phi} = 2.0243 \cdot (\%vkl) + 0.0034 \cdot (\%vkl)^2 - 2.0279 \cdot (T_{II}) + \quad (11)$$

$$+ 0.00184 \cdot (T_{II})^2 - 0.00185 \cdot (\%vkl \cdot T_{II}) \quad R = 0.99904$$

- матрица бронза КЗМцI

$$t_{\phi} = 0.2175 \cdot (T_{II}) - 4.0622 \cdot (\%vkl) + 0.0037 \cdot (T_{II} \cdot \%vkl) + \quad (12)$$

$$+ 0.00025 \cdot (T_{II})^2 + 0.00598 \cdot (\%vkl)^2 \quad R = 0.9919$$

где R - коэффициент корреляции. Как видно, значение коэффициента корреляции свидетельствует об удовлетворительном описании предлагаемыми зависимостями времени формирования композита.

Композиционные материалы армированные макроставками. Одним из видов литых композиционных материалов можно рассматривать армированные заготовки (с макроставками), которые нашли применение, в частности, при производстве штампов. В последнем случае они выполняют роль своеобразных демпферов, поглощая основные нагрузки и, таким образом, увеличивают срок эксплуатации.

На рис.2 представлена кинетика формирования армированного штампа, вставка в котором составляет 38% от всей массы, температура жидкого металла при заполнении кристаллизатора - 1525 °С. Его затвердевание происходит за счет теплоотвода через поддон, боковые стенки кристаллизатора и за счет разогрева вставки, что подтверждают предлагаемые температурные кривые. Область между поддоном и нижней частью вставки является областью затрудненного питания, т.к. образовавшиеся "мосты" затвердевшего металла могут привести к образованию внутренних усадочных раковин и значительной пористости.

Для определения условий, обеспечивающих качественное соединение жидкого металла и вставки (температура поверхности вставки достигает значения 0.7-0.8 T₁), был проведен обширный вычислительный эксперимент, позволивший оценить влияния начальной температуры вставки (T_в, °С) на толщину замороженного слоя (δ, см) в ее нижней части, время достижения этой поверхностью (t, сек) заданной температуры и градиент температур, результаты которого представлены на номограмме (рис.3). Так, например для рассматриваемой геометрии - вставка 38% от всей массы, увеличение начальной температуры вставки повышает температуру контактной поверхности и снижает толщину твердой корки. При заливке жидкого металла на вставку с начальной температурой 500 °С ее поверхность прогревается до температуры 800 °С через 20 секунд и толщина замороженного слоя при этом составляет 3.4 см. Из

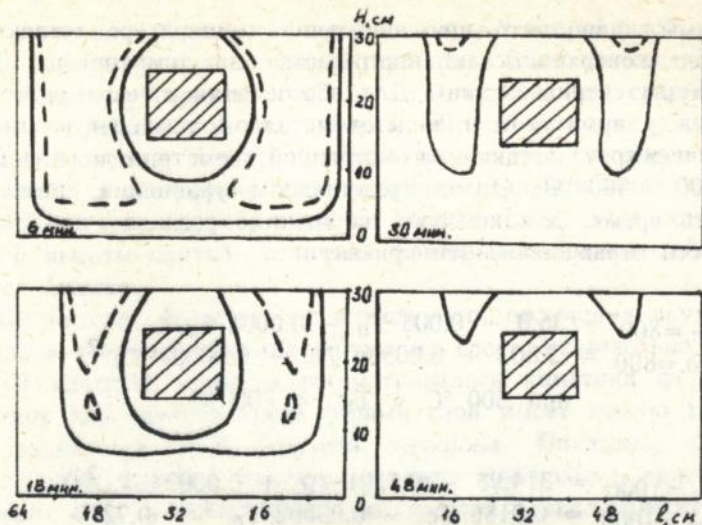


Рис.2

Кинетика затвердевания штамповой заготовки с центральной вставкой при воздействии высокотемпературным сосредоточенным источником нагрева

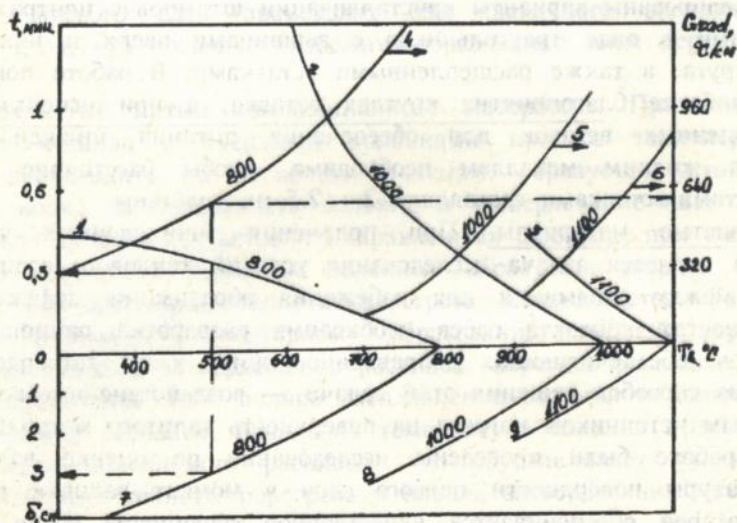


Рис.3

Зависимость времени доятияжения нижней поверхностью вставки заданной температуры (1,2,3), величины градиента температур (4,5,6) и толщину замороженного слоя (7,8,9) от начальной температуры вставки.

номограммы видно, что при начальной температуре вставки ниже 600°C ее поверхность не прогревается до температуры 1000°C (температуры свариваемости). Для обеспечения качественного соединения между арматурой и жидким металлом температура предварительного подогрева вставки рассмотренной геометрии должна быть не менее $700 - 800^{\circ}\text{C}$. Ниже представлены уравнения, позволившие рассчитать время, для которого на границе раздела аналитические зависимости отражающие эти кривые:

$$\begin{cases} t|_{T_{нов.}=800} = 36.0 - 0.005 \cdot T_{в.} - 0.0005 \cdot T_{в.}^2 \\ \delta|_{T_{нов.}=800} = 3.803 + 0.00536 \cdot T_{в.} - 0.00001 \cdot T_{в.}^2 \end{cases} \quad (13)$$

при $300^{\circ}\text{C} < T_{в.} < 800^{\circ}\text{C}$;

$$\begin{cases} t|_{T_{нов.}=1000} = 314.95 - 0.5501 \cdot T_{в.} + 0.00024 \cdot T_{в.}^2 \\ \delta|_{T_{нов.}=1000} = 0.0186 \cdot T_{в.} - 0.00002 \cdot T_{в.}^2 - 0.7219 \end{cases} \quad (14)$$

при $600^{\circ}\text{C} < T_{в.} < 1000^{\circ}\text{C}$.

Помимо штампов со вставками прямоугольного сечения были промоделированы варианты кристаллизации штампов с центральными вставками в виде треугольников с вершинами вверх и вниз и в виде круга, а также расщепленными вставками. В работе показано, что наиболее благоприятна круглая вставка, а при использовании расщепленных вставок для обеспечения питания нижней части штампа жидким металлом необходимо, чтобы расстояние между элементами-вставками составляли 2 - 2.5 их толщины.

Слоистые материалы. При получении многослойных слитков важной является задача исследования условий теплового взаимодействия между слоями, а для избежания образования дефектов на поверхностях контакта слоев необходима разработка рациональных режимов, обеспечивающих направленное снизу вверх затвердевание. Один из способов решения этой задачи — воздействие высокотемпературным источником нагрева на поверхность залитого металла.

В работе были проведены исследования по оценке величины температуры поверхности первого слоя в момент заливки второго при которой обеспечивается качественное соединение слоев. Были рассмотрены случаи, когда заливка второго слоя осуществлялась после достижения поверхностью ранее залитого слоя температуры $0.5 (T_1 + T_s)$ и T_s . В первом случае изотерма ликвидуса имеет разрыв в месте контакта слоев, траектория изотермы солидуса

несмотря на тепловой удар, который оказывает второй слой, практически не деформируется, а время кристаллизации, исчисляемое по изотерме солидус, практически не изменилось по сравнению с гомогенным слитком той же высоты. Во втором же случае на траектории изотермы солидус заметно воздействие теплового удара, выражающееся в повторном частичном подплавлении металла первого слоя. При уменьшении размера второго слоя (при сохранении суммарной высоты слитка) величина повторно подплавившейся зоны становится больше.

Особый интерес представляет возможность получения двухслойного слитка, в котором толщина одного из слоев значительно меньше другого. В качестве примера рассматривалась кинетика формирования слитков для случаев когда первый слой имеет малую толщину, первым заливается слой большей толщины. Показано, что при первом способе, время в течении которого происходит кристаллизация первого слоя незначительно, что создает технологические трудности особенно при заливке порций из различных марок стали. С другой стороны, такой способ имеет то преимущество, что форма поверхности первой порции не претерпевает изменений усадочного характера и остается плоской. Кроме того, в этом случае кристаллизация второго слоя происходит без частичного расплавления первого слоя, что позволяет избежать образование зоны переменного состава.

Волокнистые литые композиционные материалы. При контакте жидкого металла с твердыми волокнами процесс теплопередачи может происходить по нескольким схемам: образуется устойчивая твердая корка на поверхности волокна и затвердевание идет последовательно до момента встречи направленных фронтов; при контакте жидкого металла с холодным волокном образуется твердая корка, которая под действием теплоты перегрева расплавляется. Разогрев волокна приводит к повторному образованию твердой корки и последовательному затвердеванию расплава; перегрев расплава вызывает подплавление либо полное расплавление волокна и дальнейшее затвердевание расплава; начальная температура волокна превосходит температуру заливаемого расплава, что обуславливает увеличение времени снятия теплоты перегрева и начала затвердевания металла.

С целью анализа влияния различных факторов на условия формирования композиционной отливки была проведена серия вычислительных экспериментов, в которых в качестве матричных материалов рассматривали серый чугун (СЧ20) и силумин (АЛ2), армирующие элементы - стальная проволока (0.1 - 0.6% С) диамет-

ром 1, 2, 3 и 4 мм. Исследования проводились для образцов диаметром 50 мм и высотой 100 мм, получаемых в стальных окрашенных формах.

В процессе формирования композиционной отливки температурный градиент по мере прогрева как в матрице, так и в армирующей фазе падает и их величина, как и скорость кристаллизации, зависит от начального соотношения температур жидкой и твердой фазы, от шага армирования и диаметра волокон. В процессе разогрева наблюдается снижение градиента температур как в жидкой, так и твердой фазах. Температура на границе матрица-армирующее волокно при перераспределении температур слабо изменяется и находится в диапазоне 730 — 800 °С (при начальных температурах компонентов - 1300 °С для матрицы и 20 °С для волокон). Увеличение начальной температуры волокон приводит к снижению температурных градиентов в матрице и волокнах и увеличению температуры на границе раздела, которая может достигать значения 850 — 920 °С (при начальных температурах компонентов - 1400 °С для матрицы и 500 °С для армирующих волокон). После нагрева волокон можно ожидать установления температуры в композите на уровне 800 °С в первом случае и 900 °С - во втором.

При начальной температуре волокон 20 °С имеет место образование стабильной твердой корки на поверхности арматуры. Высокие скорости охлаждения и небольшая температура на границе контакта могут привести к образованию несплавления включений и матрицы. При повышении начальной температуры армирующих элементов условия соединения улучшаются.

Для фиксированных начальной температуры матрицы и армирующих волокон проведена серия вычислительных экспериментов, целью которых было установить влияние шага армирования, величины процентного содержания и размера включений на величину максимальной твердой корки перед ее расплавлением. В качестве объекта исследования избран режим кристаллизации, при котором образовавшаяся твердая корка на поверхности армирующих элементов расплавляется под влиянием перегрева жидкого металла. Обработку результатов вычислений проводили относительно безразмерных характеристик δ , Δ , T^{\sim} : $\delta = \delta_{ма.} / (u_2 - r)$ - отношение максимальной твердой корки ($\delta_{ма.}$) перед началом ее подплавления к половине расстояния между армирующими волокнами ($H/2 - r$); $\Delta = r / (u_2 - r)$ - отношение радиуса арматуры к половине расстояния между волокнами; $T^{\sim} = \frac{T_{уст.} - T_в.}{T_м. - T_в.}$ - отношение разности

между установившейся температурой в системе матрица-волокно и начальной температурой волокон к разности начальных температур жидкого металла и волокон.

Из проведенных исследований следует, что максимальная величина твердой корки, образующаяся при контакте жидкого металла с волокном, не превосходит 1/4 расстояния между ними, причем это значение устанавливается при $\Delta > 0.7$. Относительная температура практически не зависит от геометрических характеристик, а ее значение определяется начальными значениями температур исходных материалов. Используя полученные зависимости можно по массовому соотношению исходных материалов оценить шаг армирования и диаметр волокна. В результате проведенных исследований получена номограмма (рис.4), связывающая геометрические характеристики армирования с величиной установившейся температуры и размером твердой корки.

Так, например, для проволоки диаметра 2 мм и шагом армирования 3.0 мм, из части (Г) находим объемное содержание

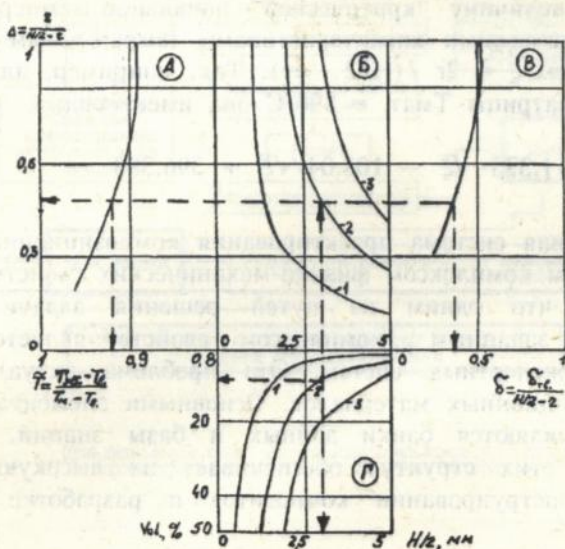


Рис.4

Влияние геометрических параметров армирования на толщину замороженного слоя и установившуюся температуру.

волокон - 10%, части (А) - связь установившейся в объеме

температуры с начальными значениями температур исходных материалов - 0.92, части (В) - относительную величину намороженной твердой корки - 0.4, части Б - зависимость степени армирования от шага армирования для волокон различного диаметра.

При исследовании условий формирования композиционного материала АЛ2-стальная проволока установлено, что низкая температура волокон приводит к образованию устойчивой корочки металла с последующим ее ростом. При высоких начальных температурах наблюдается образование твердой корочки, которая под действием перегретого жидкого металла расплавляется, а затем, после снятия перегрева, начинается последовательная кристаллизация.

Замечено, что при фиксированной геометрии армирования композита и начальной температуре матрицы существует значение начальной температуры волокон ($T_{кр.}$), ниже которой процесс затвердевания обусловлен последовательной кристаллизацией, а выше - затвердевание сопровождается образованием нестабильной твердой корки. Обработав результаты вычислительного эксперимента методами регрессионного анализа, получены аналитические зависимости, связывающие величину "критической" начальной температуры волокон с геометрическими характеристиками (выраженными безразмерным параметром $\xi = 2r / (H/2 - r)$). Так, например, для начальной температуры матрицы $T_{мат.} = 890^{\circ}\text{C}$ она имеет вид:

$$T_{кр.} = - 11.325 \cdot \sqrt{\xi} - 108.04 / \sqrt{\xi} + 396.383 \quad (16)$$

Компьютерная система проектирования композиционных материалов с заданным комплексом физико-механических свойств.

Известно, что одним из путей решения задачи получения материала с заданным комплексом свойств является создание профильных экспертных систем. Эта проблема актуальна и для литых композиционных материалов. Основными элементами экспертных систем являются банки данных и базы знаний. Полнота и достоверность этих структур обеспечивает их высокую эффективность при конструировании композитов и разработке параметров технологии.

Предлагаемая компьютерная система представляет собой многоуровневую линейную структуру, схема которой представлена на рисунке 5. При работе с системой можно выделить несколько важнейших звеньев.

Первый - выбор вида композита и технологии его получения.

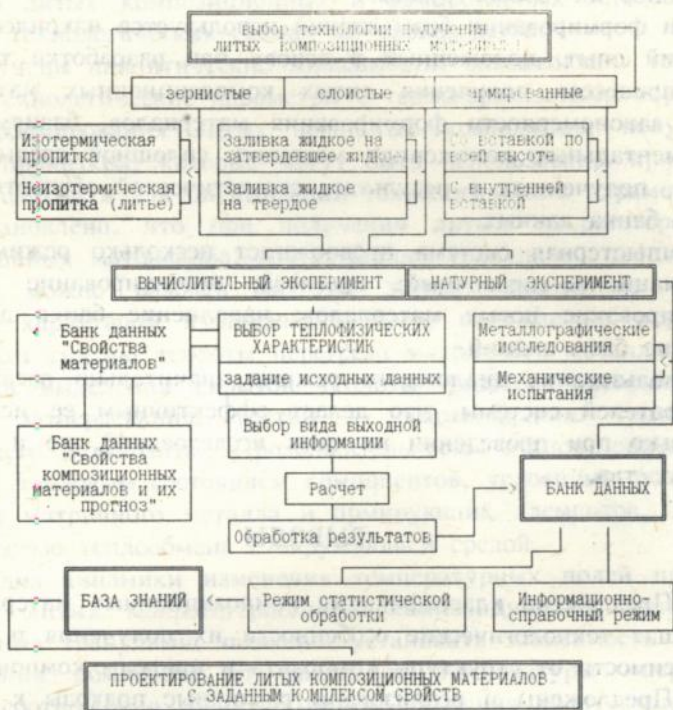


Fig. 5

Принципиальная схема организации компьютерной системы проектирования литых композиционных материалов

Второй - определение вида, условий и результатов эксперимента, в случае необходимости его проведение.

Третий - работа с банком данных (обработка, поиск аналогов и др.).

Четвертый - получение необходимых характеристик (результаты прогноза либо оптимизации). В зависимости от исходной задачи возможно участие в работе не всех звеньев, а какого-то одного звена либо их любой группы.

При формировании базы знаний используется накопленный эмпирический опыт, положенный в основу при разработке технологических процессов получения литых композиционных материалов, а также закономерности формирования материалов, базирующиеся на фундаментальных положениях механики сплошной среды и зависимостях, полученных в результате статистической обработки характеристик банка данных.

Компьютерная система предполагает несколько режимов работы: информационно-справочный; прогноза; проектирование технологии; проектирование новых материалов; наполнение банка данных; наполнение базы знаний.

Использование диалогового режима значительно расширяет круг пользователей системы, что делает эффективным ее использование не только при проведении научных исследований, но и в условиях производства.

ВЫВОДЫ

1. Предложена классификация композиционных материалов, учитывающая технологические особенности их получения и назначения в зависимости от структуры композита и природы компонентов.

2. Предложены и реализованы различные подходы к построению математических моделей для исследования теплофизики формирования литых композиционных материалов различных типов с учетом технологических особенностей их получения. В модели для зернистых литых композитов учитывается объемное содержание каждого из компонентов, согласно разработанной методике определяются его свойства как функции координат и температуры. При моделировании процессов формирования армированных и слоистых материалов особенности технологических приемов учитываются за счет выбора условий на внутренних и внешних границах.

3. Используя методы теории случайных функций разработана методика расчета физико-механических характеристик литых компо-

зиционных материалов, предложен алгоритм и создана компьютерная система прогноза свойств композита в зависимости от его типа, массового соотношения компонентов, ориентации волокон (слоев).

4. Разработанное на базе предложенных математических моделей программное обеспечение для ПЭВМ позволило провести серию вычислительных экспериментов по исследованию закономерностей перераспределения тепловых потоков, изменению термо-временных параметров литых композиционных и армированных заготовок при различных технологических схемах их производства.

5. Получены аналитические зависимости, связывающие геометрические и технологические параметры с термо-временными характеристиками формирования литых зернистых композитов, получаемых литьем и пропиткой, которые могут быть использованы при разработке технологий и для оптимизации технологических параметров.

6. Установлено, что при получении литых макрогетерогенных композиционных материалов, армированных гранулами, процесс формирования можно разбить на три этапа, каждый из которых отличается характером изменения скорости охлаждения: первый — соответствует снятию теплоты перегрева матричного металла, второй — времени выделения скрытой теплоты фазовых превращений в интервале затвердевания, третий — выравниванию температуры затвердевшего композита. Продолжительность этапов определяется начальным тепловым состоянием компонентов, условиями контакта и свойствами матричного металла и армирующих элементов, а также интенсивностью теплообмена с окружающей средой.

7. Анализ динамики изменения температурных полей при формировании литых макрогетерогенных композиционных материалов, армированных гранулами, позволил установить зависимость времени формирования композита от начальной температуры матрицы и массового соотношения гранул. Причем последняя носит существенно нелинейный характер при массе армирующих элементов более 70%.

8. Изучены особенности формирования штамповых заготовок, армированных макроставками, и предложены рекомендации по выбору рациональных режимов их получения:

- показано, что применение вставки сокращает время формирования заготовок штампа почти в два раза (по сравнению с моноотливкой). Для сокращения зоны физической и химической неоднородности и повышения качества заготовки рекомендуется интенсифицировать процесс подпитки двухфазной зоны, например, за счет применения высокотемпературного источника нагрева;

- исследовано влияние геометрии вставки, ее расположения и массы на характер затвердевания и качество затвердевшего металла. При использовании расщепленных вставок из 2-х и более элементов для обеспечения питания нижней части штампа жидким металлом необходимо, чтобы расстояние между элементами-вставками составляли 2 - 2.5 их толщины;

- для практического использования предложена номограмма, позволяющая корректировать технологические параметры, при которых обеспечивается качественное соединение макровставки с жидким металлом в областях затрудненного питания.

9. Изучены особенности формирования волокнистых композиционных материалов, установлено, что характер затвердевания жидкого металла определяется начальным соотношением температуры матричного металла и волокна и геометрическими параметрами армирования. Предложены номограммы, связывающие массовые соотношения исходных материалов, шаг армирования и диаметр волокна с параметрами затвердевания.

Анализ кривых охлаждения показал, что существует значение критической температуры, которое определяет направленное затвердевание материала матрицы на волокнах. Ее значение определяется начальным соотношением температур компонентов и геометрическими параметрами армирования. Получены аналитические зависимости значения критической температуры от параметров армирования.

10. Изучены условия формирования литых слоистых композиционных материалов:

- установлено влияние высокоэнергетического источника нагрева на характер затвердевания жидкого металла, методом вычислительного эксперимента выделены пять диапазонов изменения его интенсивности, характеризующих соответственно: образование встречного фронта затвердевания в верхней части слитка; образование двойной двухфазной зоны (в донной и верхней части); направленное вверх затвердевание слитка; частичное затвердевание слитка с образованием в его верхней части стационарной ванны жидкого металла;

- проанализировано тепловое взаимодействие металла первого слоя с заливаемым перегретым металлом второго слоя, а также изучена связь геометрических и теплофизических условий формирования слоистых композитов с размером переходной зоны между слоями и параметрами затвердевания.

11. Разработана структура компьютерной системы проектирования литых композиционных материалов с заданным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств.

12. Математические модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение, а также результаты проведенных теплофизических исследований могут быть использованы при разработке новых технологических процессов производства литых композиционных материалов, в базах знаний специализированных экспертных систем, системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. А.С.Затуловский, Н.И.Тарасевич, И.В.Корниец, Л.Л.Забельникова. Применение математического моделирования для исследования восстановления штампов в установках с электрошлаковым обогревом // Научно-технический прогресс в производстве ферросплавов и электростали.—НИИМ, Челябинск, 1988.—С.25-28.

2. А.С.Затуловский, А.А.Лейн, Н.И.Тарасевич, И.В.Корниец. Эффективность армирования крупных литых штампов ЭШО // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов.—ОПИ, Одесса, 1988.—С.31-33.

3. Н.И.Тарасевич, В.П.Кутузов, В.К.Диденко, И.В.Корниец, Л.П.Шелковникова. Исследование процесса затвердевания двухслойных прокатных валков для стана 5000 // Новое в механизации черной металлургии. — Днепропетровск, НПО "Черметмеханизация", 1988.—С.5-10.

4. И.В.Корниец. Методы расчета свойств литых композиционных материалов // Суспензионное литье.—Киев, ИПЛ АН Украины, 1988.—С.95-100.

5. Н.И.Тарасевич, И.В.Корниец. Численное моделирование затвердевания ограниченного объема жидкого металла с массивным внутренним холодильником при учете внешнего воздействия на свободной поверхности // Численные методы механики сплошной среды.—КГУ, Красноярск, 1989.—С.58-64.

6. И.В.Корниец. Получение штамповых заготовок в установках с электрошлаковым обогревом // Тез.докл. I Международной конференции молодых ученых в области сварки и смежных технологий.—Киев, ИЭС им.Е.О.Патона, 1989.—С.132-133.

7. Н.И.Тарасевич, И.В.Корниец. Математическое моделирование процессов формирования литых композитов, армированных гранула-

ми. // Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерное моделирование.—УдГУ,Ижевск,1990.—С.35-37.

8. И.В.Корниец, А.В.Гура, Е.А.Липинская. Расчет физико-механических свойств композиционных материалов с помощью ПЭВМ // Прогрессивные технологии и материалы.—Киев, ИПЛ АН Украины, 1990.—С.95-101.

9. Н.И.Тарасевич, И.В.Корниец, З.И.Майзлин. Численное моделирование особенностей формирования литых композитов, армированных гранулами // Теория и практика процессов получения биметаллических и композиционных отливок.—Киев,1991.—С.14-16.

10. Н.И.Тарасевич, Г.Д.Костенко, И.В.Корниец, Е.Н.Стоянова. Исследование тепловых особенностей формирования биметаллических пар методами математического моделирования // Теория и практика процессов получения биметаллических и композиционных отливок.—Киев,1991.—С.19-21.

11. Н.И.Тарасевич, В.С.Гаврилюк, И.В.Корниец. Влияние дифференцированного теплоотвода на структуру и свойства биметаллических отливок // Новые литые материалы и технология их получения.—Киев,ИПЛ АН Украины,1991.—С.42-48.

12. Н.И.Тарасевич, И.В.Корниец, В.В.Мартынюк. Некоторые теплофизические исследования формирования литой дробы // Процессы литья.—Киев,ИПЛ АН Украины,1993.—N 3.—С.20-26.

Формат 60×84.16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1.5. Тираж 100 экз. Заказ 2-09-94.

Типография фирмы "Эссе". Киев, пр-т Вернадского 34/1.

462448

AB 29.718

AB 29.718