

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.74.047

БРАНОВИЦКИЙ
Александр Михайлович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Минск, 2012

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель:

Марукович Евгений Игнатьевич,
лауреат Государственной премии БССР и
Государственной премии Республики
Беларусь, академик, доктор технических
наук, профессор, директор ГНУ «Институт
технологии металлов НАН Беларуси»

Официальные оппоненты:

Павлюкевич Николай Владимирович,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор
физико-математических наук, главный
научный сотрудник ГНУ «Институт тепло-
и массообмена им. А.В. Лыкова»
НАН Беларуси;

Рафальский Игорь Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры металлургии литейных сплавов
Белорусского национального технического
университета

Оппонирующая организация: ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Защита диссертации состоится « 2 » марта 2012 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 12, ауд. 310, тел. ученого секретаря (017) 292 54 06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «30» января 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор _____ И.А.Трусова

© Брановицкий А.М., 2012

© БНТУ, 2012

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Доминирующей тенденцией современного машиностроения является рациональное использование энергетических и сырьевых ресурсов, уменьшение массы и металлоемкости изделий, повышение характеристик машин и механизмов на основе внедрения новых конструкционных материалов с повышенными технико-экономическими показателями. Перспективным в связи с этим является широкое внедрение ресурсосберегающих технологий, к которым относится непрерывное литье. Преимущества непрерывных процессов литья реализуются в сферах производства отливок, механической обработки и эксплуатации готовых изделий. В сравнении со способами литья в разовые формы непрерывное литье позволяет уменьшить капитальные затраты, брак, припуски на механическую обработку, производственные площади, повысить производительность труда и выход годного. В ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» разработан ряд установок для непрерывного литья цветных металлов и чугуна. Для отечественной промышленности актуальной является разработка технологических процессов непрерывного литья для мелкосерийного производства. Эта потребность часто сопряжена с необходимостью переработки собственных металлических отходов предприятий. На РУП «БМЗ» имеется потребность в медных и цинковых заготовках анодов для нанесения гальванического покрытия. Для ювелирной промышленности требуется изготовление заготовок малого сечения (3–8 мм) из драгоценных сплавов. Для разработки технологических режимов получения непрерывнолитых заготовок необходим учет ряда конструктивных, технологических и теплофизических параметров, оказывающих влияние на процесс формирования отливки. Эффективное решение задач определения технологических параметров непрерывных процессов литья требует разработки схем для расчета тепловых условий формирования отливки. Использование таких схем позволяет ускорить процесс разработки технологии литья и уменьшить количество необходимых экспериментальных исследований.

Важнейшей задачей литейного производства является получение отливок с заданными свойствами. Большинство свойств отливки определяется процессами зарождения и роста кристаллов. Для описания процесса кристаллизации получила применение кинетическая теория А.Н. Колмогорова. Использование данной теории, как правило, сопряжено со знанием экспериментальных кривых охлаждения отливки. Однако в случае непрерывного литья температурные измерения в отливке затруднены. В этих условиях актуальна разработка методики применения кинетической теории А.Н. Колмогорова к процессам непрерывного литья.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Исследования и результаты, положенные в основу диссертационной работы, соответствуют перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 гг., утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 мая 2005 г. № 512, в частности, пункту 3.2 «теория, материалы, техника и технологии литейных и металлургических процессов».

Научные исследования проводились в рамках: ГПФИ «Литье», задание «Разработка теоретических и технологических основ принципиально новых методов литья биметаллических заготовок», № ГР 1996242, 1996–2000 гг.; ГПОФИ «Материал», задание «Моделирование на ЭВМ и исследование процесса формирования непрерывнолитых заготовок сложной формы в условиях нестационарного теплообмена», № ГР 20033489, 2003–2005 гг.; отдельного научно-технического проекта по договору № 38/99-4 «Разработать и внедрить технологию и оборудование для получения специальных профилей из драгоценных металлов методом непрерывного литья», № ГР 19992521, 1998–2000 гг.; гранта БРФФИ № Т04МС-024 «Создать теоретические и технологические основы для управления структурообразованием при интенсивном охлаждении алюминиевых сплавов на основе численного моделирования роста кристаллов», № ГР 2005819, 2004–2006 гг.; ГППИ «Металлургия», задание 2.02 «Создание автоматизированной системы управления технологическими процессами непрерывного горизонтального литья», № ГР 20052754, 2005–2009 гг.; ГППИ «Материалы в технике», задание 4.01 «Разработка теоретических и технологических основ управления процессами структурообразования при формировании непрерывнолитой отливки», № ГР 20061134, 2006–2010 гг.

Цель и задачи исследования

Целью работы является определение технологических параметров непрерывного литья заготовок на основе численного моделирования тепловых процессов с идентификацией параметров модели и создание методики расчета кристаллообразования в процессе литья.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику анализа динамики формирования кристаллической структуры в процессе непрерывного литья в зависимости от тепловых режимов;

- определить параметры теплообмена при непрерывном литье на основе температурных данных кристаллизатора и моделирования тепловых потоков;
- определить конструктивные параметры кристаллизаторов и режимы вытяжки цинковых заготовок размером 15×100 мм и медных заготовок размером 12×80 мм;
- апробировать технологические режимы получения медных и цинковых заготовок в условиях опытного производства ГНУ «ИТМ НАН Беларуси»;
- определить технологические режимы получения непрерывнолитых заготовок из ювелирных сплавов малого сечения (3–8 мм);
- разработать и апробировать в лабораторных условиях установки и технологические режимы для непрерывного горизонтального литья слоистых биметаллических заготовок.

Объектом исследования являются процессы затвердевания и кристаллизации при формировании непрерывнолитой заготовки.

Предмет исследования – тепловые условия формирования отливки, технологические режимы непрерывного литья, конструктивные особенности кристаллизаторов и технологической оснастки, структура и качество получаемых заготовок.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика анализа динамики формирования кристаллической структуры, включающая учет гетерогенного зародышеобразования и параметров модели Джонсона–Меля–Аврами–Колмогорова, позволяющая моделировать изменение характеристик структуры (средний радиус и концентрация зерен в различных зонах отливки) непрерывнолитых сплавов при различных режимах охлаждения отливки.

2. Теоретически обоснованные и практически реализованные конструктивные параметры установок и режимы вытяжки цинковых заготовок (скорость вытяжки изменяется в интервале 0,18–0,4 м/мин при перегреве 100 К), а также медных заготовок (скорость вытяжки 0,1–0,24 м/мин при перегреве 150 К), что позволяет изготавливать методом непрерывного литья заготовки типоразмеров 15×100 мм (основа цинк) и 12×80 мм (основа медь) требуемого качества для использования на РУП «БМЗ».

3. Режимы получения непрерывнолитых заготовок из драгоценных сплавов: сплав ЗлСрМ 585-80 (Au – 58,5 %, Ag – 8 %, Cu – остальное) диаметром 3–8 мм скорость вытяжки 0,09–0,2 м/мин при перегреве 150 К; сплав ПСр-70 (Ag – 70 %, Cu – 26 %, Zn – остальное) диаметром 6 мм скорость вытяжки 0,04–0,07 м/мин при перегреве 150 К, позволяющие получить отливки требуемого качества для ювелирной промышленности.

4. Устройства для получения методом непрерывного литья цилиндрических и прямоугольных биметаллических заготовок, в которых в случае цилиндрической геометрии разделительным элементом является цилиндрический металлопровод, входящий одним концом в секцию двухсекционного металлоприемника, в случае прямоугольной геометрии разделительным элементом является пластина. Технологические режимы для непрерывного горизонтального литья прямоугольных биметаллических заготовок размером 40×60 мм для композиций чугуны – бронза (скорость литья находится в интервале 0,1–0,16 м/мин), алюминий – медь (0,07–0,09 м/мин) и алюминий – силумин (0,16–0,26 м/мин) при перегревах 100 К, полученные на основе численного моделирования.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты и положения диссертации, выносимые на защиту, получены лично соискателем. Соискателем проведен анализ литературы по теме исследования, разработана методика анализа динамики формирования кристаллической структуры в процессе непрерывного литья, выполнены расчеты теплообмена и определены технологические режимы процессов непрерывного литья. Работа выполнена под руководством академика, лауреата Государственной премии БССР, лауреата Государственной премии Республики Беларусь, доктора технических наук, профессора Е.И. Маруковича. Совместно с научным руководителем выполнены постановка цели и задач исследований, их предварительный анализ, а также обсуждение полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на 12 международных научно-технических конференциях: Международной научно-технической конференции «Литейно-металлургические процессы и технологии. Экология и охрана труда», 1998 г., г. Минск; 4-th International Conference Simulation, Designing and Control of Foundry Processes FOCOMP'99, 25–26 November 1999, Krakow, Poland; Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2002 – качество и эффективность», 21–22 ноября 2002 г., г. Минск; Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2006. Беларусь», 17–18 мая 2006 г., г. Барановичи; World Foundry Congress, 5–7 June 2006, Harrogate International Centre, Harrogate, United Kingdom; 5-th International Conference Simulation, Designing and Control of Foundry Processes FOCOMP'06, 22–24 November 2006, Krakow, Poland; Международных научно-технических конференциях «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», 3–5 октября 2007 г.; 15–17 октября 2008 г., г. Минск; Международной научно-технической конференции «Литейное

производство и металлургия 2008. Беларусь», 22–23 октября 2008 г., г. Гомель; V Miedzynarodowe Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materialow i Konstrukcji, Augustow, 3-6 czerwca 2009, Augustow, Poland; Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2009. Беларусь», 8–9 октября 2009 г., г. Минск; Международном научном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии», 24–26 мая 2011 г., г. Витебск.

Опубликованность результатов

Результаты исследований опубликованы в 32 научных работах, в том числе: в коллективной монографии, 21 статье в научно-технических журналах, включенных в перечень для опубликования результатов диссертационных исследований (за рубежом – 2); 1 статье в сборнике научных трудов; 8 статьях в сборниках материалов конференций (за рубежом – 4). Получен 1 патент Республики Беларусь на полезную модель. Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертации, составляет 11,1 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 134 страницы, включая 64 рисунка на 35 страницах, 8 таблиц в тексте, библиографический список из 162 наименований на 14 страницах, приложения на 9 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

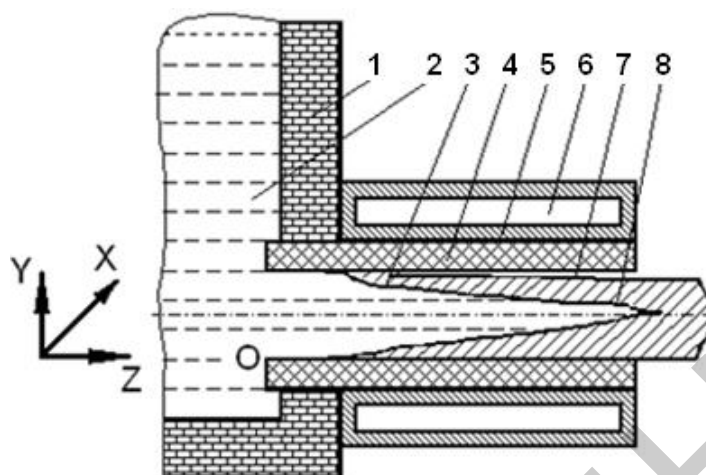
Во введении определен круг вопросов в области технологии непрерывного литья, требующих изучения, обоснована актуальность темы и решаемых задач.

В первой главе приведена классификация способов непрерывного литья, сделан обзор способов получения литых биметаллических заготовок. Рассмотрены технологические особенности процесса непрерывного литья, связанные с нестационарностью процесса литья, цикличностью извлечения заготовки, образованием газового зазора между отливкой и кристаллизатором. Проведен анализ основных методов моделирования процессов непрерывного литья. На основании проведенного анализа сформулированы цели и задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены математические модели для идентификации параметров теплопереноса и анализа динамики формирования кристаллической структуры при непрерывном литье.

Схема процесса непрерывного горизонтального литья представлена на рисунке 1, центр координат в случае прямоугольной отливки находится в точке

О на границе «расплав – нижняя поверхность графитовой пластины кристаллизатора».



1 – металлоприемник; 2 – жидкий металл; 3 – начальная корка; 4 – графитовая вставка; 5 – стальной корпус кристаллизатора; 6 – вода; 7 – зазор между отливкой и графитовой вставкой; 8 – отливка

Рисунок 1 – Схема процесса непрерывного горизонтального литья

Важное значение при расчете теплообмена в процессе непрерывного литья имеет определение коэффициентов теплоотдачи на границах «отливка – кристаллизатор» и «кристаллизатор – вода в рубашке охлаждения кристаллизатора». Это связано с их значительной вариабельностью для различных типов кристаллизаторов. В работе коэффициенты теплоотдачи в процессе непрерывного литья определяли на основе использования экспериментальных температурных данных кристаллизатора и математической модели теплообмена. Монотонность изменения максимальной и минимальной температур кристаллизатора вблизи его рабочей поверхности, а также разности между этими температурами при увеличении коэффициентов теплоотдачи на границах «отливка – кристаллизатор» и «кристаллизатор – вода в рубашке охлаждения кристаллизатора» позволила использовать для нахождения данных коэффициентов метод деления отрезка пополам.

Разработана методика анализа динамики формирования кристаллической структуры в процессе непрерывного литья, использующая модель теплообмена на основе решения уравнения теплопроводности и модель кристаллообразования на основе теории объемной кристаллизации А.Н. Колмогорова с учетом гетерогенного зародышеобразования, которое описывается распределением Гаусса. Методика анализа включает в себя следующие этапы:

1. Определение входных данных процесса непрерывного литья. Этап включает формирование следующих массивов данных: $T_i(\tau = 0)$, λ_i , c_i , ρ_i ,

размеров кристаллизатора $\Omega(x, y, z)$, где T – температура, К; τ – время, с; λ – удельная теплопроводность, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость, Дж/кг; ρ – плотность кг/м³; $i = 1-5$; где индекс 1 относится к расплаву, 2 – графитовой втулке кристаллизатора, 3 – корпусу кристаллизатора, 4 – воде в рубашке охлаждения кристаллизатора, 5 – окружающей среде.

Задается режим извлечения отливки ($V(\tau)$ – скорость вытяжки; τ_1, τ_2 – время движения и остановки в цикле вытяжки; h – шаг извлечения отливки) и определяются температуры $T^{\text{эксп}}(\tau)$ кристаллизатора.

2. Подбор параметров теплообмена. На этом этапе определяются $\alpha_{i,i+1} = f(x, y, z, \tau)$, по условию $|T^{\text{расч}} - T^{\text{эксп}}| < \varepsilon$, где $\alpha_{i,i+1}$ – коэффициенты теплоотдачи на границах соответствующих расчетных областей с индексами i и $i + 1$, Вт/(м²·К); $i = 1-4$.

3. Определение температурного поля системы отливка – кристаллизатор. Температурное поле $T = f(x, y, z, \tau, \lambda_i, c_i, \rho_i, \alpha_{1,2}, \alpha_{2,3}, \alpha_{3,4}, \alpha_{4,5})$ определяется с использованием модели теплообмена на основе решения уравнения теплопроводности

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right). \quad (1)$$

Выделение теплоты кристаллизации учитывали введением эффективной удельной теплоемкости $c_{\text{эф}}$ в интервале температур кристаллизации $[T_{\text{sol}}, T_{\text{liq}}]$.

Начальные условия для решения уравнения теплопроводности задаются как $T_i = T_{0i} = \text{const}$ при $\tau = 0$, где $i = 1-5$.

На границах расчетных областей используются граничные условия 3-го рода

$$\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y} = -\alpha_{i,i+1}(T_i - T_{i+1}), \quad (2)$$

где $\alpha_{i,i+1}$ – коэффициент теплоотдачи на границе расчетной области с индексом i , где $i = 1-4$.

Граничные условия по оси ОХ имеют такой же вид, координата y в (2) заменяется на координату x . Для цилиндрической отливки также используются граничные условия 3-го рода, координата y в этом случае заменяется на радиус r , центр координат находится на оси симметрии отливки.

Для решения уравнения (1) использовали метод конечных разностей с неявной разностной схемой.

4. Определение осредненной скорости изменения объемной плотности энтальпии в зоне кристаллизации по сечению отливки. Осредненную скорость изменения объемной плотности энтальпии за время кристаллизации $\Delta\tau_{\text{крист}}$ определяли как $v_H = L / \Delta\tau_{\text{крист}}$, где L – объемная теплота кристаллизации, Дж/м³. Для определения $\Delta\tau_{\text{крист}}$ использовали модель теплообмена, описанную на этапе 3.

5. Определение параметров модели кристаллообразования.

Для описания образования кристаллов использовали модель гетерогенного зародышеобразования на основе распределения Гаусса

$$\frac{dn(\Delta T)}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\Delta T_{\sigma} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta T - \Delta T_N)^2}{2(\Delta T_{\sigma})^2}\right], \quad (3)$$

где n_{\max} – максимальная плотность зерен, 1/м³; ΔT_N – переохлаждение, при котором появление новых зародышей происходит с максимальной скоростью, К; ΔT_{σ} – среднее квадратическое отклонение распределения, К; $\Delta T = T - T_e$ – текущее переохлаждение, К; T – текущая температура, К; T_e – температура плавления эвтектики, К.

Линейная скорость свободного роста зерен эвтектики описывается зависимостью

$$\frac{dR}{d\tau} = \mu(\Delta T)^2, \quad (4)$$

где μ – кинетический коэффициент, м/(с·К²); R – радиус зерна, м.

На данном этапе находятся параметры n_{\max} , ΔT_{σ} , ΔT_N , μ на основе данных о структуре отливки.

6. Расчет кристаллообразования в процессе непрерывного литья. На этом этапе определяется изменение среднего радиуса эвтектических зерен по сечению отливки $R(x, y, z, \tau) = f(n_{\max}, \Delta T_{\sigma}, \Delta T_N, \mu, v_H)$ на основе модели кристаллообразования. Модель кристаллизации зерен эвтектики включает этапы зародышеобразования, свободного роста зерен и стесненного роста зерен, когда скорость роста начинает замедляться из-за влияния соседних зерен (рисунок 2).

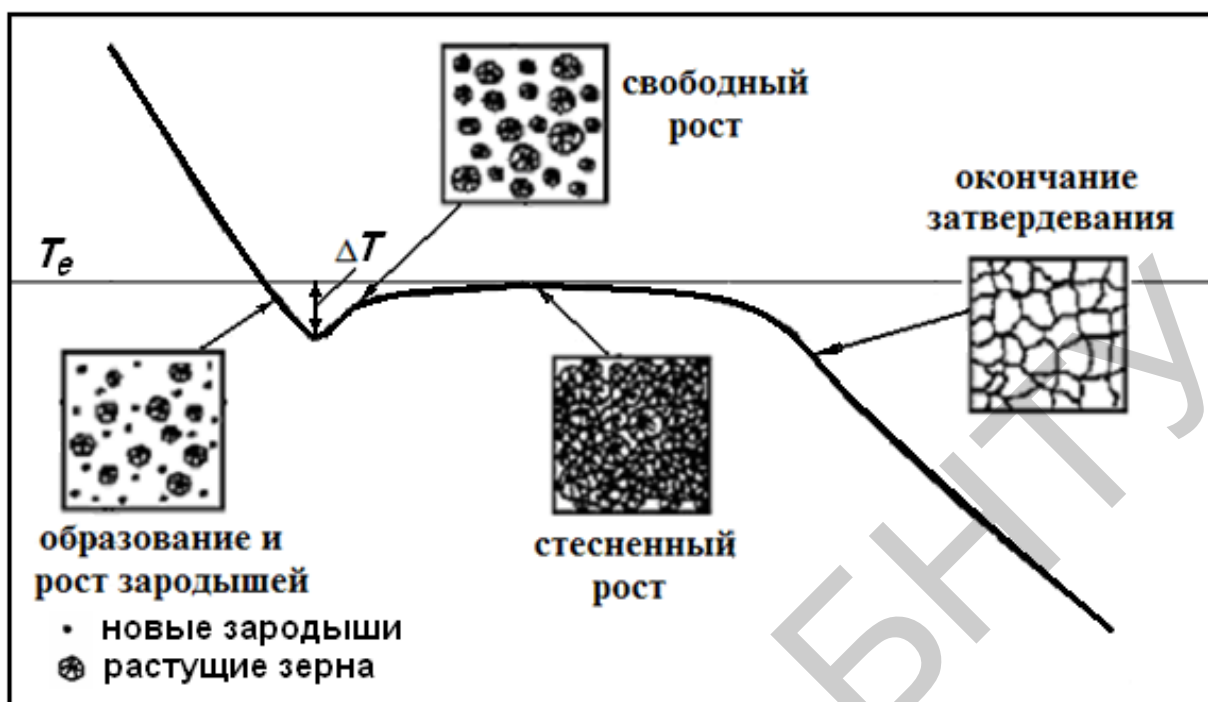


Рисунок 2 – Схема затвердевания эвтектической системы

Образование зародышей прекращается при условии

$$\frac{dT}{d\tau} > 0. \quad (5)$$

С учетом принятого допущения о сферической форме зерен эвтектики радиус зерна определяется выражением

$$R(\tau) = R_0 + \int_0^{\tau} \mu(\Delta T(\tau))^2 d\tau, \quad (6)$$

где R_0 – критический минимально возможный радиус зародыша, м.

Прирост доли твердой фазы f_s в расчетном объеме для среднего радиуса зерна \bar{R} моделировали классическими соотношениями Колмогорова с коэффициентами Аврами для сферической формы зерен

$$\frac{\partial f_s}{\partial \tau} = (1 - f_s) 4\pi n \bar{R}^2 \frac{\partial \bar{R}}{\partial \tau}, \quad (7)$$

где n – концентрация зерен, $1/\text{м}^3$.

Считали, что температура в расчетном объеме не зависит от координат. Для определения зависимости $T(\tau)$ и распределения зерен по радиусу $n(R, \tau)$ внутри объема решали систему уравнений

$$\begin{cases} v_H = \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{4\pi}{3} L \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\int_{R_0}^{\infty} n(R, \tau) R^3 dR \right], \\ \frac{\partial n(R, \tau)}{\partial \tau} = \mu (T(\tau) - T_e)^2 \frac{\partial n(R, \tau)}{\partial R} + \delta(R - R_0) G(T) \end{cases}, \quad (8)$$

где v_H – скорость убывания объемной плотности энтальпии, полагаемая здесь константой, Дж/(м³·с); $\delta(R)$ – функция Дирака; $G(T)$ – функция, определяющая рождение новых зародышей при температуре T с минимальным радиусом R_0 .

Первое уравнение системы (8) описывает закон сохранения энергии для элементарного объема, второе – баланс распределения зерен по радиусам внутри данного объема. Для решения (8) использовали метод конечных разностей, распределение частиц по радиусам дискретизировалось на классы по радиусу R с числом частиц в диапазоне от $R - \Delta R/2$ до $R + \Delta R/2$.

Разработанную методику использовали для анализа кристаллообразования алюминиево-кремниевой эвтектики. На основе этапа 3 методики определена зависимость скорости изменения объемной плотности энтальпии v_H от координат по сечению непрерывнолитой отливки размерами 40×80 мм. Зависимость усредненного времени затвердевания от координат в центральном вертикальном сечении отливки приведена на рисунке 3. Усреднение скорости охлаждения производилось по времени, за которое происходит изменение температуры от $T_e - 2,5$ К до $T_e + 2,5$ К. Скорость охлаждения при данных условиях составила 5–15 К/с в зоне перегретого металла; 0,7–1,5 К/с в зоне кристаллизации вблизи эвтектической температуры; 5–8 К/с в зоне затвердевшего металла.

Значение максимальной объемной плотности зародышей n_{\max} в модели зародышеобразования (3) должно превышать максимальную плотность зерен в отливке на 30–50 %, отсюда полагаем $n_{\max} = 10^{12}$ м⁻³. Произведен выбор параметров зародышеобразования и роста зерен с использованием литературных данных: $\mu = 10^{-6}$ м/(с·К²); $\Delta T_{\sigma} = 1$ К; $\Delta T_N = -5$ К; $T_e = 850$ К.

Как показывают расчеты, образование новых зародышей происходит на этапе, когда размер появившихся первыми зародышей еще достаточно мал, а доля твердой фазы в объеме невелика. Рождение зародышей и фаза интенсивного роста существенно разнесены во времени.

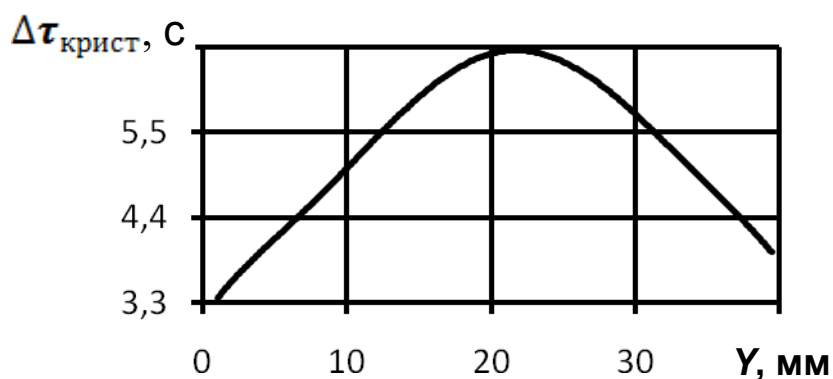


Рисунок 3 – Изменение усредненного времени затвердевания по высоте отливки

До этапа активного роста размер зерен как минимум в 10 раз меньше размера в затвердевшем сплаве. Поскольку далее, на этапе активного роста линейная скорость роста не зависит от текущего размера, полуширина рассчитанной функции распределения зерен по размерам не превышает 5 % от среднего размера. Следовательно, может быть произведен переход к более простой схеме без учета распределения частиц по размерам, при которой новые зародыши появляются не с минимальным, а с текущим радиусом, то есть можно использовать приближение одного размера для всех зерен. При данных условиях считаем, что система растущих зерен описывается средним радиусом \bar{R} , причем на этапе свободного роста практически все зерна имеют размер, близкий к среднему. Считаем, что для среднего радиуса зерна при свободном росте выполняется соотношение (4). Алгоритм расчета среднего радиуса, текущего переохлаждения и доли твердой фазы тогда можно представить как следующую последовательность действий на каждом временном шаге:

1. Расчет при текущем переохлаждении скорости роста зерен по выражению (4) и изменения размеров зерна.

2. На основе изменения радиуса зерна рассчитывается увеличение объема твердой фазы для уже существующих зерен. К данной величине добавляется объем вновь рожденных зерен, полученный на предыдущем временном шаге. Результат умножается на коэффициент, отвечающий за стесненный рост.

3. Расчет изменения температуры на данном шаге. Отток энергии из элементарного объема, определяемый средней скоростью убывания объемной плотности энтальпии, сравнивается с добавочной энергией за счет увеличения твердой фазы. Разность между оттоком и притоком энергии определяет изменение температуры на данном шаге.

4. После расчета новой температуры на данном шаге определяется число рожденных зерен. При уменьшении температуры происходит появление новых зародышей согласно интегралу от функции (3). В случае увеличения температуры, согласно условию (5) появление новых зерен прекращается.

Далее процесс повторяется на новом временном шаге. Для случая коэффициента стесненного роста вида $(1-f_s)$ точное значение $f_s = 1$ недостижимо в численной процедуре. Счет прекращался при $f_s = 0,98$. Временной шаг для такой схемы во избежание временных осцилляций температуры должен быть достаточно малым, от 0,001 до 0,005 с.

Зависимость относительного радиуса зерен алюминиево-кремниевой эвтектики $R/R_{Y=1\text{мм}}$ от расстояния до нижней границы с кристаллизатором, полученная с применением методики анализа кристаллообразования, приведена на рисунке 4. Как показывают расчеты, средний радиус зерна на краю и в центре отливки различается не более чем на 18 %, при этом имеет место немонотонная зависимость радиуса (не превышающая 3 %) от расстояния до края отливки, что обусловлено перемещением отливки в более холодную область кристаллизатора во время ее движения в цикле вытяжки.

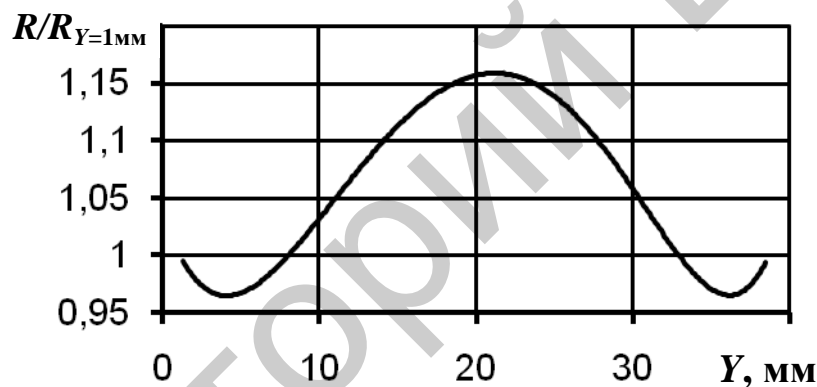


Рисунок 4 – Сглаженная зависимость относительного среднего радиуса эвтектических зерен от расстояния до нижней границы кристаллизатора

Разработанная методика использована для оценки дисперсности микроструктуры при разработке струйных кристаллизаторов для непрерывного горизонтального литья алюминиево-кремниевых сплавов. Результаты работы используются в Корейском институте материаловедения (KIMS) с годовым экономическим эффектом от внедрения разработки 70 тыс. долл. США.

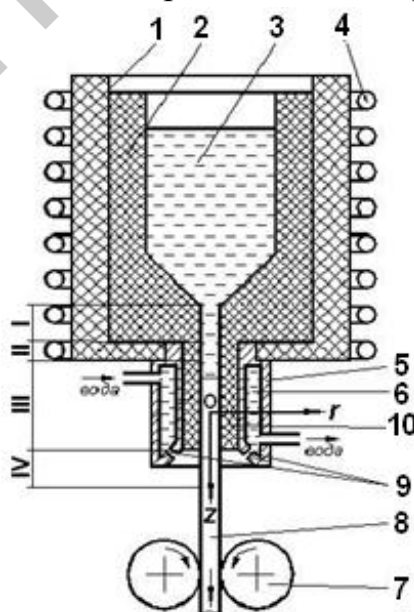
В третьей главе на основе численного моделирования теплообмена определены технологические параметры процессов непрерывного литья заготовок цинковых и медных анодов, заготовок из драгоценных сплавов.

Исследовали температурное поле отливки и графитовых пластин кристаллизатора в зависимости от технологических параметров процесса литья. Задачу решали в трехмерной постановке. Установлено, что в переходной зоне кристаллизатора, при литье заготовок из металлов и сплавов с высокой теплопроводностью, таких как цинк, медь, сплавы на основе золота и серебра, имеет место существенный тепловой поток в осевом направлении

кристаллизатора, растущий с увеличением времени остановки в цикле вытяжки. Определено, что при литье цинковых заготовок размером 15×100 мм для предотвращения перемерзания питающего канала на входе кристаллизатора необходимо использовать промежуточный стакан из материала с низкой теплопроводностью. Установлено, что стабильный процесс литья высококачественных цинковых заготовок для используемых моделей кристаллизаторов протекает в диапазоне скоростей вытяжки 0,18–0,4 м/мин при перегреве 100 К. Производство заготовок цинковых анодов для нужд РУП «БМЗ» освоено на опытно-производственном участке ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» с годовым экономическим эффектом 250,3 млн. руб. (долевое участие автора составляет 30 %).

Исследовали процесс непрерывного горизонтального литья заготовок медных анодов для нанесения гальванического покрытия. Установлено, что для получения высококачественных медных заготовок размером 12×80 мм скорость литья должна находиться в пределах 0,1–0,24 м/мин, при перегреве 150 К и длине неохлаждаемой зоны кристаллизатора – 50–70 мм. Испытания медных анодов, изготовленных по разработанной технологии в условиях РУП «БМЗ» в ваннах пирофосфатного меднения при производстве металлокорда показали, что коэффициент использования материала по массе анода и срок службы анодов находится на уровне серийно используемых импортных анодов.

Приведены результаты исследования теплообмена при литье заготовок малого сечения (3–8 мм) из драгоценных сплавов. Схема установки непрерывного вертикального литья представлена на рисунке 5.



1 – футеровка; 2 – тигель; 3 – расплав; 4 – индуктор; 5 – металлический корпус кристаллизатора; 6 – вода; 7 – вытягивающее устройство; 8 – отливка; 9 – отверстия для вторичного охлаждения; 10 – рабочая втулка кристаллизатора

Рисунок 5 – Схема установки непрерывного вертикального литья

На основании численного моделирования теплообмена установлено, что тепловой поток в осевом направлении отливки может достигать значительной величины уже через 1–2 с после заливки расплава. Максимальный тепловой поток в продольном направлении отливки наблюдается вблизи границы неохлаждаемой и охлаждаемой зон кристаллизатора. Определено, что скорость вытяжки для отливок диаметром 3–8 мм из сплава ЗлСрМ 585-80 для разработанной модели кристаллизатора должна составлять 0,09–0,2 м/мин (при перегреве 150 К), скорость вытяжки отливок диаметром 6 мм из сплава ПСр-70 (при перегреве 150 К) – 0,04–0,07 м/мин.

Технологический процесс непрерывного вертикального литья заготовок из драгоценных сплавов внедрен на филиале Гомельского ПО «Кристалл» «Завод Ювелир», что позволило снизить трудоемкость изготовления профилей не менее чем на 30 %, сократить расход плавильных тиглей в 3–5 раз, довести выход годного при производстве профилей до 99,54 % и получить значительный экономический эффект.

В четвертой главе разработан способ непрерывного горизонтального литья биметаллов, позволяющий осуществлять соединение компонентов в жидкофазном состоянии. Получен патент на устройство для непрерывного горизонтального литья биметаллических заготовок. Расплавы металлов заливают в двухсекционный металлоприемник, из которого они поступают в кристаллизатор, разделенный в случае прямоугольной геометрии пластиной, цилиндрической геометрии – цилиндрическим металлопроводом. Далее биметаллическая отливка извлекается из кристаллизатора вытягивающим устройством.

На основе моделирования теплообмена показана возможность получения непрерывнолитых биметаллических композиций бронза – чугун, медь – алюминий, алюминий – силумин. В случае композиции алюминий – медь, где значительна разница в температурах плавления, алюминий выступает в роли охладителя для меди, что приводит почти к полному затвердеванию меди, тогда как алюминий остается в жидком состоянии. В этих условиях рекомендовано уменьшить теплоотвод от нижней пластины кристаллизатора и увеличить время остановки в цикле вытяжки.

Получены образцы биметаллических заготовок алюминий – свинец, алюминий – цинк, алюминий – силумин и цинк – олово. Приведены результаты анализа зоны взаимной диффузии металлов с применением металлографического, дюрметрического, растровой электронной микроскопии методов исследований, которые показали, что размер диффузионной зоны для исследуемых композиций составляет 0,1–0,6 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика анализа динамики формирования микроструктуры, включающая учет гетерогенного зародышеобразования и параметров модели Джонсона–Меля–Аврами–Колмогорова, позволяющая моделировать изменение характеристик микроструктуры непрерывнолитых сплавов при различных режимах охлаждения отливки [2, 7, 9, 13–15, 18–22, 26–30].

2. Установлено, что средний радиус зерна непрерывнолитой силуминовой отливки размером 40×80 мм по сечению отливки различается незначительно (15–20 % при скорости литья 0,17 м/мин), при этом имеет место слабая немонотонная зависимость радиуса от расстояния до края отливки (не превышающая 3 %), что обусловлено перемещением отливки в более холодную область кристаллизатора во время ее движения в цикле вытяжки [13, 15, 27, 28].

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны режимы вытяжки цинковых заготовок (скорость вытяжки изменяется в интервале 0,18–0,4 м/мин при перегреве 100 К), позволяющие изготавливать методом непрерывного литья заготовки размером 15×100 мм. Установлено, что при литье цинковых заготовок для предотвращения замерзания питающего канала кристаллизатора необходимо использовать на входе в канал кристаллизатора промежуточный стакан из материала с низкой теплопроводностью [2, 7, 10, 24, 25].

4. Разработаны технологические режимы получения медных заготовок – скорость вытяжки 0,1–0,24 м/мин при перегреве 150 К, что позволяет изготавливать методом непрерывного литья заготовки анодов для нанесения гальванического покрытия для нужд РУП «БМЗ» [2, 7, 11, 24, 25].

5. Разработаны режимы для получения непрерывнолитых заготовок из драгоценных сплавов: для сплава ЗлСрМ 585-80 (Au – 58,5 %, Ag – 8 %, Cu – остальное) диаметром 3–8 мм скорость вытяжки находится в интервале 0,09–0,2 м/мин при перегреве 150 К; для сплава ПСр-70 (Ag – 70 %, Cu – 26 %, Zn – остальное) диаметром 6 мм – скорость вытяжки 0,04–0,07 м/мин при перегреве 150 К [3, 5, 6, 16, 17].

6. Разработан и апробирован в лабораторных условиях новый способ получения слоистых биметаллических композиций, при котором компоненты соединяются в жидкофазном состоянии в процессе непрерывной разливки. Разработана установка для непрерывного горизонтального литья биметаллов, получен патент на устройство для непрерывного литья биметаллических

заготовок [32]. Разработаны конструкции кристаллизаторов и металлоприемников для литья плоских и цилиндрических биметаллических заготовок. На основе моделирования теплообмена определена принципиальная возможность получения непрерывнолитых биметаллических отливок для композиций алюминий – медь, чугун – бронза и алюминий – силумин [1, 4, 8, 12, 23, 31].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Технологический процесс получения непрерывнолитых заготовок из драгоценных сплавов внедрен на филиале Гомельского ПО «Кристалл» «Завод Ювелир» с годовым экономическим эффектом 60,54 тыс. долл. США (долевое участие автора составляет 35 %, что эквивалентно 21,189 тыс. долл. США) [Акт внедрения технологии и оборудования для получения специальных профилей из драгоценных металлов методом непрерывного литья на филиале Гомельского ПО «Кристалл» «Завод Ювелир» от 10.12.2004 г.].

Испытания на РУП «БМЗ» медных анодов для нанесения гальванического покрытия при производстве металлокорда, изготовленных по технологии, разработанной в ИТМ НАН Беларуси, показали коэффициент использования материала по массе анода и срок службы анодов на уровне серийно используемых импортных анодов [Акт испытаний опытной партии медных анодов производства ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» от 13.10.2005 г.].

Процесс изготовления цинковых анодов для РУП «БМЗ» внедрен на опытном производстве ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» с годовым экономическим эффектом 250,3 млн. руб. (долевое участие автора составляет 30 %, что эквивалентно 75,09 млн. руб.) [Акт внедрения результатов диссертационной работы на РУП «БМЗ» от 11.07.2007 г.].

Методика анализа динамики формирования структуры использована для оценки дисперсности микроструктуры при разработке струйных кристаллизаторов для непрерывного горизонтального литья алюминиево-кремниевых сплавов. Результаты работы используются в Корейском институте материаловедения (KIMS). Годовой экономический эффект от внедрения разработки составляет 70 тыс. долл. США [Акт внедрения результатов диссертационной работы в Корейском институте материаловедения от 07.10.2010 г.].

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проведении исследований и разработке технологий непрерывного литья на промышленных предприятиях, имеющих литейные цеха. Использование моделирования теплообмена в процессе литья позволяет сократить время разработки технологии и повысить качество непрерывнолитых заготовок.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Разделы в коллективных монографиях

1. Марукович, Е.И. Непрерывное литье биметаллов / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий // Перспективные технологии: монография; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – Гл. 3. – С. 33–55.

Статьи в научных журналах

2. Трехмерная тепловая модель затвердевания непрерывных заготовок с прямоугольным сечением / Е.И. Марукович, В.В. Дозмаров, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // Литье и металлургия. – 1998. – № 3. – С. 32–36.

3. Марукович, Е.И. Расчет затвердевания цилиндрической непрерывной отливки / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, В.А. Харьков // Литье и металлургия. – 2001. – № 2. – С. 25 – 29.

4. Марукович, Е.И. Трехмерная тепловая модель процесса непрерывного литья прямоугольных биметаллических заготовок / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 2. – С. 127–132.

5. Марукович, Е.И. Двухмерная математическая модель для расчета затвердевания цилиндрической непрерывной отливки / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, В.А. Харьков // Литье и металлургия. – 2002. – № 1. – С. 27–30.

6. Оценка тепловых потоков в осевом направлении при непрерывном литье трубной заготовки / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский, Л.В. Чешко // Литье и металлургия. – 2003. – № 1. – С. 81–85.

7. Брановицкий, А.М. Уточнение коэффициентов теплопередачи для решения задачи затвердевания цилиндрических непрерывнолитых заготовок с использованием экспериментальных температурных данных кристаллизатора в установившемся режиме литья / А.М. Брановицкий, Ю.Л. Станюленис, Ю.А. Лебединский // Литье и металлургия. – 2005. – № 1. – С. 91–93.

8. Марукович, Е.И. Анализ температурных полей при затвердевании непрерывнолитой биметаллической отливки / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // Литье и металлургия. – 2006. – № 1. – С. 71–74.

9. Моделирование процессов литья под давлением алюминиевых сплавов / Е.И. Марукович, И.Л. Захаров, А.М. Брановицкий, Д.В. Довнар // Литье и металлургия. – 2006. – № 2, ч. 1. – С. 124–127.

10. Марукович, Е.И. Анализ непрерывного литья заготовок для горячекатаных цинковых анодов / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, В.А. Дементьев // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2, ч. 1. – С. 103–106.
11. Непрерывное литье медных анодов для нанесения гальванического покрытия при производстве металлокорда / Е.И. Марукович, В.А. Маточкин, С.Р. Чудаков, А.М. Брановицкий, В.А. Дементьев, Л.В. Чешко // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 3. – С. 67–72.
12. Study of possibility of continuous casting of bimetallic components in condition of direct connection of metals in a liquid state / E.I. Marukovich, A.M. Branovitsky, Y.-S. Na, J.-H. Lee, K.-Y. Choi // *Materials & Design, Elsevier*. – 2006. – Vol. 27, № 10. – P. 1016–1026.
13. Марукович, Е.И. Математическое моделирование формирования структуры эвтектического силумина / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 3. – С. 156–160.
14. Марукович, Е.И. Оценка теплопередачи между отливкой и кристаллизатором в зоне образования начальной корки при непрерывном горизонтальном литье чугуна / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // *Литье и металлургия*. – 2007. – № 1. – С. 96–100.
15. Марукович, Е.И. Моделирование роста зерен в непрерывнолитых отливках из эвтектического силумина / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // *Литье и металлургия*. – 2007. – № 4. – С. 113–117.
16. Анализ тепловых особенностей формирования непрерывнолитых проволочных отливок / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский, В.А. Дементьев // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 2. – С. 5–7.
17. Marukovich, E.I. New energy saving foundry technologies and equipment / E.I. Marukovich, A.M. Branovitsky // *Revista de Turnatorie. Romanian Foundry Journal*. – 2008. – № 7–8. – P. 25–29.
18. Моделирование процессов заполнения формы и затвердевания отливок при литье под давлением / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, И.Л. Захаров, В.А. Дементьев // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3. – С. 57–63.
19. Разработка ресурсосберегающей технологии непрерывнолитых заготовок электродов / Ю.Л. Станюленис, И.О. Сазоненко, С.Р. Чудаков, А.М. Брановицкий // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3. – С. 220–224.
20. Марукович, Е.И. Моделирование роста дендритов при кристаллизации с малым переохлаждением силуминовых сплавов на основе метода фазового поля / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // *Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2009. – № 1. – С. 4–13.

21. Численное моделирование затвердевания непрерывнолитой бронзовой отливки / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский, В.А. Дементьев // Литье и металлургия. – 2009. – № 3. – С. 57–60.

22. Analysis of precipitation kinetics of manganese and copper sulfides in interstitial free steels / М.Н. Hong, К.У. Choi, Е.И. Marukovich, У.А. Lebedinsky, А.М. Branovitsky // Литье и металлургия. – 2010. – № 3. – С. 11–15.

Статья в сборнике

23. Исследование принципиальной возможности получения биметаллических отливок методом непрерывного литья в условиях непосредственного соединения компонентов в жидком состоянии / Е.И. Марукович, К.-Й. Чой, А.М. Брановицкий, А.Г. Анисович // Респ. межвед. сб. научн. тр.: Металлургия. – Минск: Выш. школа, 2004. – № 28. – С. 68–81.

Материалы и тезисы докладов на научно-технических конференциях

24. Марукович, Е.И. Трехмерная модель затвердевания непрерывной прямоугольной отливки / Е.И. Марукович, В.В. Дозмаров, А.М. Брановицкий // Литейно-металлургические процессы и технологии. Экология и охрана труда : материалы Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 25–27 ноября 1998 г. / Белорусская ассоциация литейщиков и металлургов. – Минск, 1998. – С. 26.

25. Marukovich, E.I. Three-dimensional thermal model of solidification of continuous casted rectangular billets / E.I. Marukovich, A.M. Branovitsky // The 4-th International Conference Simulation, Designing and Control of Foundry Processes 25–26 November 1999, Krakow, Poland. – Krakow, 1999. – P. 181–186.

26. Three-dimensional modelling and simulation of die-casting processes for AlSi alloys / Н.-У. Hwang, J.-К. Choi, E.I. Marukovich, A.M. Branovitsky, I.L. Zakharov // Proceedings of 67-th World Foundry Congress 5–7 June 2006, Harrogate International Centre, United Kingdom. / Institute of cast metals engineers. – Harrogate, 2006. – P. 203/1–203/9.

27. Grain growth modelling for continuous casting ingots of AlSi eutectic / E.I. Marukovich, A.M. Branovitsky, У.А. Lebedinsky, I.L. Zakharov // Proceedings the 5-th International Conference «Simulation, Designing and Control of Foundry Processes» FOCOMP'06, Krakow, 22–24 November. – Krakow, 2006. – P. 157–165.

28. Марукович, Е.И. Численное моделирование структурообразования непрерывнолитых отливок из эвтектического силумина / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы Междунар. научн.-техн. конф.,

Минск, 3–5 октября 2007 г.: в 2 ч. / Минск: Экоперспектива; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2007. – Ч. 1. – С. 25–31.

29. Марукович, Е.И. Моделирование роста дендритов на основе метода фазового поля в непрерывнолитых силуминовых сплавах / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 октября 2008 г.: в 4 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2008. – Кн. 1: Многофункциональные материалы в современной технике микро- и нанoeлектронике. – С. 65–69.

30. Марукович, Е.И. Повышение механических свойств литых материалов / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий // Materialy V Miedzynarodowe Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materialow i Konstrukcji, Augustow, 3-6 czerwca 2009. / Politechnika Bialostocka. – Augustow, 2009. – P. 75–76.

31. Марукович, Е.И. Непрерывное литье биметаллов / Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий // Перспективные материалы и технологии : материалы Междунар. науч. симпозиума, Витебск, 24–26 мая 2011 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2011. – С. 8–11.

Авторские свидетельства и патенты

32. Устройство для непрерывного горизонтального литья биметаллических заготовок: пат. 4141 Респ. Беларусь, МПК В22D 11/00 / А.М. Брановицкий, Е.И. Марукович ; заявитель Инст. техн. метал. НАН Беларуси. – № u 20070499 ; заявл. 09.07.2007 ; опубл. 28.02.2008. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1. – С. 184.

РЭЗІЮМЭ

БРАНАВІЦКІ Аляксандр Міхайлавіч

ВЫЗНАЧЭННЕ ТЭХНАЛАГІЧНЫХ ПАРАМЕТРАЎ БЕСПЕРАПЫННАГА ЛІЦЦЯ ЗАГАТОВАК НА АСНОВЕ МАДЭЛЯВАННЯ ЦЕПЛАВЫХ ПРАЦЭСАЎ

Ключавыя словы: бесперапыннае ліццё, мадэляванне цеплаабмену, тэхналагічныя параметры, крышталізацыя, біметал, адліўка.

Мэта работы – вызначэнне тэхналагічных параметраў бесперапыннага ліцця загатоўак на аснове лікавага мадэлявання цеплавых працэсаў з ідэнтыфікацыяй параметраў мадэлі і стварэнне метадыкі разліку ўтварэння крышталаў у працэсе ліцця.

Распрацавана метадыка аналізу дынамікі фарміравання мікраструктуры, якая ўключае ўлік гетэрагеннага зародкустварэння і параметраў мадэлі Джонсана–Меля–Аўрамі–Калмагорова і дазваляе мадэляваць змяненне характарыстык мікраструктуры бесперапынналітых сплаваў пры розных рэжымах ахаладжэння адліўкі.

Распрацаваны рэжымы выцяжкі цынкавых загатоўак (хуткасць выцяжкі змяняецца ў інтэрвале 0,18–0,4 м/хвіл пры перагрэве 100 К), якія дазваляюць вырабляць метадам бесперапыннага ліцця загатоўкі памерам 15×100 мм. Устаноўлена, што пры ліцці цынкавых загатоўак для прадухілення перамярзання сілкавальнага канала крышталізатара неабходна выкарыстоўваць на ўваходзе ў канал крышталізатара прамежную ўтулку з матэрыялу з нізкай цеплаправоднасцю. Распрацаваны тэхналагічныя рэжымы атрымання медных загатоўак – хуткасць выцяжкі 0,1–0,24 м/хвіл пры перагрэве 150 К, што дазваляе вырабляць метадам бесперапыннага ліцця загатоўкі памерам 12×80 мм.

Распрацаваны рэжымы для атрымання бесперапынналітых загатоўак з каштоўных сплаваў: для сплава ЗлСрМ 585-80 (Au – 58,5 %, Ag – 8 %, Cu – астатняе) дыяметрам 3–8 мм – хуткасць выцяжкі знаходзіцца ў інтэрвале 0,09–0,2 м/хвіл пры перагрэве 150 К; для сплава ПСр-70 (Ag – 70 %, Cu – 26 %, Zn – астатняе) дыяметрам 6 мм – хуткасць выцяжкі 0,04–0,07 м/хвіл пры перагрэве 150 К.

Распрацаваны і апрабаваны ў лабараторных умовах новы спосаб атрымання слаістых біметалічных кампазіцый, пры якім кампаненты злучаюцца ў вадкафазным стане ў працэсе бесперапыннай разліўкі.

Вынікі дысертацыі ўкаранены на доследнай вытворчасці ДНУ «ІТМ НАН Беларусі», філіяле Гомельскага ВА «Крышталь» «Завод Ювелір», Карэйскім інстытуце матэрыялазнаўства (KIMS), РУП «БМЗ».

РЕЗЮМЕ

БРАНОВИЦКИЙ Александр Михайлович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Ключевые слова: непрерывное литье, моделирование теплообмена, технологические параметры, кристаллизация, биметалл, отливка.

Цель работы – определение технологических параметров непрерывного литья заготовок на основе численного моделирования тепловых процессов с идентификацией параметров модели и создание методики расчета кристаллообразования в процессе литья.

Разработана методика анализа динамики формирования микроструктуры, включающая учет гетерогенного зародышеобразования и параметров модели Джонсона–Меля–Аврами–Колмогорова, позволяющая моделировать изменение характеристик микроструктуры непрерывнолитых сплавов при различных режимах охлаждения отливки.

Разработаны режимы вытяжки цинковых заготовок (скорость вытяжки изменяется в интервале 0,18–0,4 м/мин при перегреве 100 К), позволяющие изготавливать методом непрерывного литья заготовки размером 15×100 мм. Установлено, что при литье цинковых заготовок для предотвращения перемерзания питающего канала кристаллизатора необходимо использовать на входе в канал кристаллизатора промежуточный стакан из материала с низкой теплопроводностью. Разработаны технологические режимы получения медных заготовок – скорость вытяжки 0,1–0,24 м/мин при перегреве 150 К, что позволяет изготавливать методом непрерывного литья заготовки размером 12×80 мм.

Разработаны режимы для получения непрерывнолитых заготовок из драгоценных сплавов: для сплава ЗлСрМ 585-80 (Au – 58,5 %, Ag – 8 %, Cu – остальное) диаметром 3–8 мм скорость вытяжки находится в интервале 0,09–0,2 м/мин при перегреве 150 К; для сплава ПСр-70 (Ag – 70 %, Cu – 26 %, Zn – остальное) диаметром 6 мм – скорость вытяжки 0,04–0,07 м/мин при перегреве 150 К.

Разработан и апробирован в лабораторных условиях новый способ получения слоистых биметаллических композиций, при котором компоненты соединяются в жидкофазном состоянии в процессе непрерывной разливки.

Результаты диссертации внедрены на опытном производстве ГНУ «ИТМ НАН Беларуси», филиале Гомельского ПО «Кристалл» «Завод Ювелир», Корейском институте материаловедения (KIMS), РУП «БМЗ».

SUMMARY

BRANOVITSKY Alexandr Mikhailovich

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR CONTINUOUS CASTING OF BILLETS BASING ON THERMAL PROCESSES MODELING

Keywords: continuous casting, heat-transfer modeling, technological parameters, crystallization, bimetal, casting.

Purpose of the research: determination of technological parameters for continuous casting of billets basing on numerical modeling of thermal processes including identification of model parameters and creation of calculation method of crystal formation in the course of casting.

A method of analysis of microstructure formation dynamics was developed. It includes account of heterogeneous nucleation and parameters of Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov model that enables to simulate changes in microstructure characteristics of continuously-cast alloys at different cooling modes of casting.

Drawing modes of zinc billets were worked out: drawing speed changes over the interval 0.18 to 0.4 m/min at 100 K of overheating. It makes it possible to produce billets of 15×100 mm by continuous casting method. It was established that at casting of zinc billets it is necessary to use at inlet to the crystallizer's channel an intermediate bushing produced from material with low heat conductivity in order to prevent over freezing of supply channel of the mold. Technological modes of obtaining of copper billets are the following: drawing speed is 0.1–0.24 m/min at 150 K of overheating. It enables to manufacture 12×80 mm billets by the method of continuous casting.

Modes for obtaining of continuously-cast billets from precious metal alloys were determined. For 3лCpM 585-80 alloy (Au – 58,5 %, Ag – 8 %, Cu – residual) obtaining of billets of 3–8 mm in diameter requires drawing speed over the interval 0.09 to 0.2 m/min at 150 K of overheating; for ПCp-70 alloy (Ag – 70 %, Cu – 26 %, Zn – residual) obtaining of billets of 6 mm in diameter demands drawing speed 0.04–0.07 m/min at 150 K of overheating.

A new method of obtaining of layered bimetal composition, where components connect being in liquid-phase state in the process of continuous casting, was developed and tested in laboratory conditions.

Results of the thesis work were introduced into pilot production at the State Scientific Institution «Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus», at the branch «Factory Uvelir» of Gomel PO «Kristall», at the Korea Institute of Materials Science (KIMS) and at Byelorussian Steel Works.

Научное издание

БРАНОВИЦКИЙ Александр Михайлович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Подписано в печать 25.01.2012.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 113.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65, 220013, Минск.