

На правах рукописи



ИВАНИНА ЕЛЕНА СВЯТОСЛАВНА

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
И ПОРИСТОСТИ В ОТЛИВКАХ ИЗ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В
ТУРБОМАШИНОСТРОЕНИИ**

2.6.3. Литейное производство (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет», на кафедре «Машины и технологии литейного производства»

Научный руководитель: **Ершов Михаил Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Машины и технологии
литейного производства» ФГАОУ ВО
«Московский политехнический университет»,
г. Москва

Официальные
оппоненты: **Шаткульский Александр Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой материаловедения, литья и сварки
ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени
П.А. Соловьева», г. Рыбинск

Ларичев Николай Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Литейные технологии» ФГБОУ ВО «Московский
государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)», г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет», г. Волгоград

Защита состоится «21» мая 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте paltievichar@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте по адресу: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=183830

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие методов компьютерного моделирования процессов формирования кристаллической структуры и пористости в отливках ответственного назначения, применяемых в турбомашиностроении, в том числе из никелевых жаропрочных сплавов, является важной научно-технической задачей. В современном литейном производстве применение программных комплексов для моделирования литейных процессов позволяет снизить трудоемкость на стадии разработки технологии и материальные затраты, а также оперативно получить наглядную информацию о формируемой структуре и пористости в отливке. Это делает компьютерное моделирование эффективным инструментом опытного производства.

В настоящее время актуальным направлением является управление формированием кристаллической структуры отливки и гарантированного получения отливок с равноосной, направленной столбчатой и монокристаллической структурой без паразитных зерен и с допустимым уровнем пористости (до 0,1%).

В промышленности для получения рабочих лопаток газовых турбин широко применяется метод направленной кристаллизации (НК). Совершенствование конструкции теплового узла в установке НК за счет отказа от жидкометаллического холодильника для получения крупногабаритных отливок является одной из актуальных научно-технических задач.

Развитие представлений о формировании монокристаллической структуры при помощи различных кристаллоотборников - одно из направлений повышения степени управляемости процессом направленной кристаллизации. Широкое применение кристаллоотборников делает актуальным изучение роста зерен в зависимости от геометрических характеристик канала кристаллоотборника.

Пористость является распространенным дефектом в отливках с направленной структурой. Повышение точности расчетов пористости в лопатках ГТД является актуальным направлением развития методов компьютерного моделирования.

Основываясь на вышеизложенном, можно утверждать, что данная работа, посвященная развитию методов компьютерного моделирования процессов формирования кристаллической структуры и пористости в двухфазной зоне отливки с равноосной, направленной и монокристаллической структурами на базе расширения технологических возможностей способа НК, и уточнение теоретических представлений о применении критерия Ниямы, является актуальной.

В результатах работы заинтересованы предприятия отрасли турбомашиностроения, такие как АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», (ПК «Салют», ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «ОДК-ПМЗ»).

Объект исследований. Процесс направленной кристаллизации крупногабаритных лопаток ГТД с монокристаллической структурой в установке НК при радиационном охлаждении формы, механизм конкурентного роста зерен в стартовой системе отливки (включающей в себя затравку и кристаллоотборник) из

никелевого жаропрочного сплава с различными видами кристаллоотборников, а также методика прогнозирования пористости с помощью критерия Ниямы в отливке типа «Плита».

Предмет исследования. Предметом исследований являются формализованные зависимости для процесса НК, связывающие между собой параметры пористости и структуры отливки, с одной стороны, и тепловые условия кристаллизации с другой

Цель работы: развитие методов компьютерного моделирования процессов формирования кристаллической структуры и пористости в двухфазной зоне отливки с равноосной, направленной и монокристаллической структурой на базе расширения технологических возможностей способа НК, и уточнение теоретических представлений о применении критерия Ниямы.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи:**

1. Компьютерное моделирование процесса направленной кристаллизации протяженных лопаток ГТД при радиационном охлаждении формы с целью совершенствования теплового узла промышленной установки УВНК-8П и определение подходящего режима для получения монокристаллической структуры.

2. Исследование механизма конкурентного роста зерен и разработка рекомендаций по выбору эффективного кристаллоотборника для гарантированного получения монокристаллических отливок.

3. Разработка метода компьютерного прогнозирования усадочной пористости в отливках на основе критерия Ниямы с учетом тепловых условий в двухфазной зоне отливки (литейный сплав и температура кокиля).

Научная новизна:

1. Определен механизм конкурентного роста зерен в плоском кристаллоотборнике при смене положения зоны благоприятного роста монокристалла в канале кристалловода. Показано, что эта зона в плоском кристаллоотборнике меняется только один раз, что обуславливает низкую эффективность такого кристаллоотборника для получения монокристаллов (20%).

2. Получена зависимость между критерием Ниямы и объемной долей пор в центральном сечении отливки типа «Плита» из модельного сплава (МЛ10) по двум взаимно перпендикулярным направлениям, в которой величина пористости зависит от тепловых условий кристаллизации (градиент температуры и скорость охлаждения), а также от технологических факторов (температура кокиля и материал кокиля).

3. Разработана методика компьютерного моделирования для определения пороговых значений критерия Ниямы, на основе которой возможна быстрая оценка микропористости в отливках типа «Плита».

4. Для модельного сплава (МЛ10) в условиях технологии литья в кокиль получена функциональная зависимость между объемной долей усадочных пор, градиентом температуры и скоростью кристаллизации для отливки типа «Плита», на основе которой может быть построена шкала для оценки пористости по значениям градиента температуры и скорости кристаллизации.

Практическая значимость работы:

1. Установлены технологические параметры процесса направленной кристаллизации при радиационном охлаждении формы, которые обеспечивают получение монокристаллической структуры крупногабаритных лопаток газотурбинного двигателя из никелевых жаропрочных сплавов в промышленной установке УВНК-8П.

2. Разработана методика моделирования процесса направленной кристаллизации крупногабаритных лопаток при радиационном охлаждении формы в установке УВНК-8П, позволяющая упростить технологический процесс за счет отказа от жидкометаллического холодильника.

3. На основе компьютерного моделирования процесса конкурентного роста зерен в криволинейном канале кристалловода разработаны рекомендации по выбору конструкции кристаллоотборника, обеспечивающего гарантированное получение монокристаллических заготовок для рабочих и сопловых лопаток ГТД.

4. Результаты диссертационной работы позволяют определять температурно-временные параметры технологического процесса получения протяженных тонких фасонных отливок без усадочных дефектов при направленной кристаллизации.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Методика компьютерного моделирования процесса направленной кристаллизации крупногабаритных лопаток ГТД, включающая два этапа расчета и упрощенную 3D-модель лопатки, позволяющая усовершенствовать технологический процесс НК за счет замены жидкометаллического холодильника в установке НК на радиационное охлаждение формы, устанавливающая возможность получения крупногабаритных лопаток ГТД с характеристиками дисперсности дендритной структуры, соизмеримыми с отливками, получаемыми при охлаждении формы в расплаве алюминия.

2. Закономерность конкурентного роста зерен в плоском кристаллоотборнике, на основе которой проведено сравнение эффективности плоского зигзагообразного кристаллоотборника с кристаллоотборником-геликоидом и разработаны рекомендации по выбору оптимальной конструкции кристаллоотборника для гарантированного получения монокристаллических отливок.

3. Методика определения порога значений критерия Ниямы для модельных сплавов (14X17H2Л и МЛ10), необходимого для прогнозирования зон пористости по температурным полям в отливке в процессе затвердевания.

4. Зависимость вида $P=f(G,W)$, связывающая пористость с условиями кристаллизации, справедливая для любой температуры кокиля в исследованном диапазоне температур (200°C, 300°C, 400°C, 500°C) для модельного сплава (МЛ10) в отливке типа «Плита».

Методология и методы исследования:

В проведенных исследованиях применялись следующие методы: теоретический, расчётно-аналитический, а также метод компьютерного моделирования процессов, протекающих в двухфазной зоне отливки с использованием программных продуктов Unigraphis NX, Altair HyperMesh СКМ

Полигон Софт, ProCAST, ProCAST модуль SAFE, Altair HyperMesh. Для статистической обработки данных использовались программы Excel и GetNy.

Достоверность научных положений и полученных результатов обеспечивается комплексом теоретических и расчётно-аналитических исследований, а также использованием современных систем компьютерного моделирования, имеющих многолетний опыт использования и прошедших верификацию результатов численных расчетов с результатами диагностики реальных отливок с помощью современных методов контроля.

Личный вклад автора: представленные в работе результаты получены соискателем при выполнении научно-исследовательских работ в период 2017-2024 гг. Автором совместно с научным руководителем была поставлена задача научного исследования, систематизирован теоретический материал о никелевых жаропрочных сплавах, методах получения отливок из этих сплавов, а также о факторах, оказывающих влияние на структуру отливок.

Разработана методика вычислительного эксперимента для совершенствования установки НК с радиационным охлаждением формы, проведены расчеты и численная обработка полученных результатов.

Проведено сравнение плоского и спиралевидного кристаллоотборников. Разработана методика расчетов для выбора оптимальной конструкции кристаллоотборника, обеспечивающей гарантированное получение монокристаллических заготовок для рабочих и сопловых лопаток ГТД.

Разработана методика количественного прогнозирования усадочной пористости в отливках по тепловым условиям в двухфазной зоне отливки. Определен порог значения критерия Ниямы для случая кристаллизации отливки типа «Плита» при различных технологических процессах (для модельного сплава МЛ10 при литье в кокиль с температурой 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, а также литье в ХТС).

Получена зависимость связи пористости с тепловыми условиями кристаллизации, а именно градиентом температур и скоростью кристаллизации.

В диссертации представлены результаты исследования, полученные автором самостоятельно. Обсуждение и анализ результатов проведены при участии соавторов публикаций по теме диссертационной работы.

Связь с научными программами. Исследование проводилось в рамках гранта РФФИ «Аспиранты», научный проект №19-38-90099/19 (2019-2024).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Санкт-Петербург, 2017 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение» (Чебоксары, 2017 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД» (Москва, 2019 г.); на Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии 2017» (Москва, 2017 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна:

машиностроительные технологии», (Москва, 2018 г.; Москва, 2019 г.; Москва, 2020 г.); на Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2020 г.); на X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2020 г.); на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. 2024» (Ростов-на-Дону, 2024 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 14 публикациях, 10 из которых в материалах научных конференций, 4 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, из них 2 статьи в журналах, включенных в международную наукометрическую базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Содержит 136 страниц печатного текста, а также 51 рисунок, 15 таблиц и список использованных источников из 94 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе выполнен литературный обзор, в результате которого выявлены затруднения существующих теоретических положений, сформулировано существо научно-технической проблемы по модернизации установки УВНК-8П, оптимальному подбору кристаллоотборника для получения монокристаллической структуры и применению критерия Ниямы для прогнозирования усадочной пористости. Определена цель работы, заключающаяся в развитии методов компьютерного прогнозирования качества отливок из никелевых жаропрочных сплавов с направленной и равноосной структурой.

Исследовательская часть работы выстроена по трём взаимодополняющим направлениям, представленных во второй, третьей и четвертой главах:

Во второй главе на основании результатов вычислительных экспериментов сделан вывод о возможности существенного упрощения технологии направленной кристаллизации в установке УВНК-8П за счет отказа от использования жидкометаллического холодильника. Установлено, что в установке с УВНК-8П с радиационным охлаждением формы можно получать крупногабаритные лопатки ГТД из сплава ЖС32, по характеристикам дисперсности дендритной структуры, не уступающие отливкам, получаемым при охлаждении формы в расплаве алюминия.

Для проведения вычислительного эксперимента разработаны 3D-модель прототипа усовершенствованной установки УВНК-8П без жидкометаллического холодильника (рис. 1), а также упрощенная 3D-модель крупногабаритной лопатки ГТД (рис. 2), которая имеет переходы от тонких сечений к массивным сечениям, имитирующие переход от пера к замку лопатки ГТД.

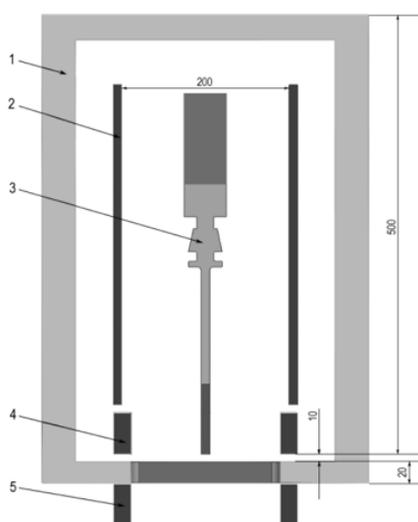


Рисунок 1 – Эскиз установки УВНК-8П:
1 – кожух печи подогрева форм; 2 – верхний нагреватель; 3 – отливка (форма не показана); 4 – нижний нагреватель; 5 – боковой холодильник.

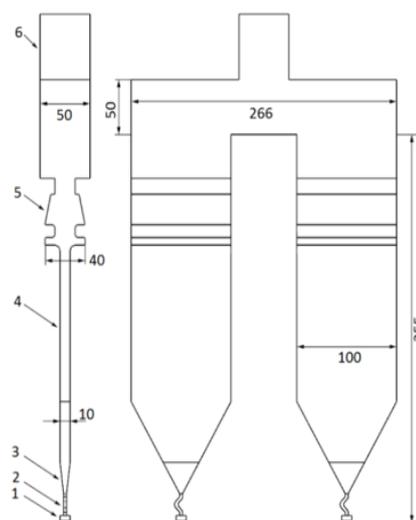


Рисунок 2 – Эскиз отливки:
1 – заправка; 2 – кристалловод; 3 – стартовый конус; 4 – «перо модельной лопатки»; 5 – «замок» модельной лопатки; 6 – литниковая система.

Определены исходные данные для вычислительного эксперимента: выбраны режимы процесса направленной кристаллизации, определены теплофизические свойства материалов конструктивных элементов печи, рассчитаны свойства сплава ЖС32 по его химическому составу.

Разработана методика вычислительного эксперимента. Процесс формировался в два этапа. Первый этап – моделирование процесса выхода печи на режим. На втором этапе полученные данные использовались в качестве начальных условий для моделирования процесса направленной кристаллизации. Были выбраны варьируемые параметры процесса – температура в печи подогрева формы и скорость перемещения формы.

Проводилось две серии расчетов. В первой серии моделировался процесс кристаллизации отливки из сплава ЖС32 в условиях радиационного охлаждения. Во второй серии моделировался процесс кристаллизации с погружением формы в ванну с расплавленным алюминием, что соответствует промышленной технологии направленной кристаллизации в установке УВНК-8П.

Результаты компьютерного моделирования показали, что при направленной кристаллизации отливок длиной до 350 мм в промышленной установке УВНК-8П радиационное охлаждение формы обеспечивает значения градиента температуры (рис. 3) и расстояния между первичными ветвями дендритов (рис. 5(а)), близкие к получаемым значениям при охлаждении формы в расплаве алюминия (рис. 4-5(б)).

Установлено, что в установке с УВНК-8П с радиационным охлаждением формы можно получать крупногабаритные лопатки ГТД из сплава ЖС32, по характеристикам дисперсности дендритной структуры, не уступающие отливкам, получаемым при охлаждении формы в расплаве алюминия.

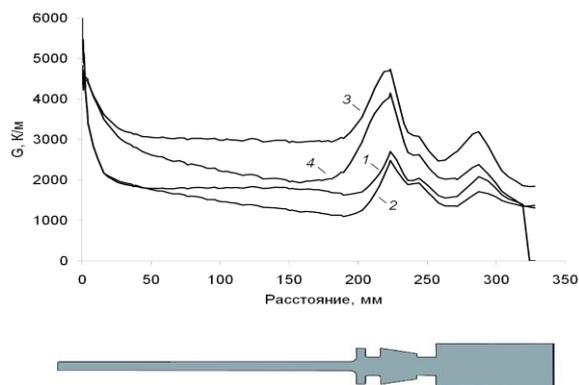


Рисунок 3 – Распределение градиента G по длине отливки для радиационного охлаждения формы. 1 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 2 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$; 3 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 4 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$.

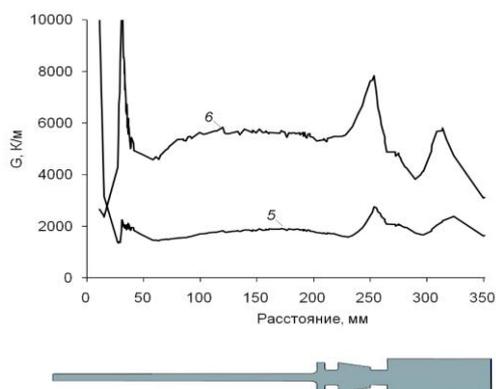
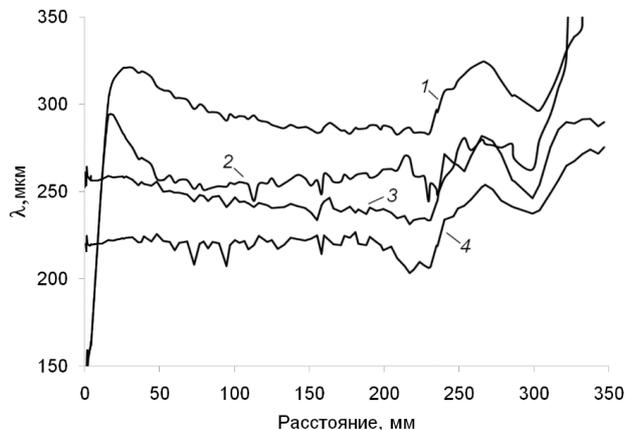
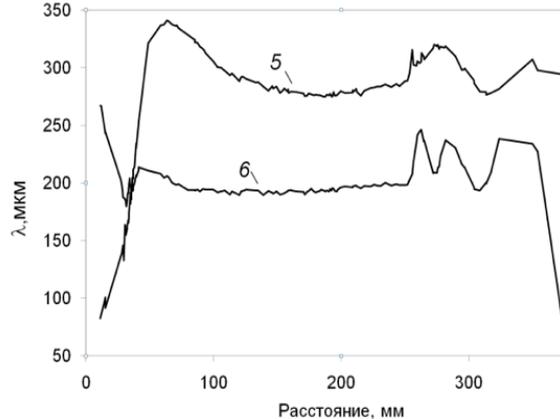


Рисунок 4 – Распределение градиента G по длине отливки для конвективного охлаждения формы. 5 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $T_{al} = 700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 6 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $T_{al} = 1000^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$.



а)



б)

Рисунок 5 – Расстояние между первичными осями дендритов λ_1 для никелевого жаропрочного сплава ЖС26 в случае радиационного (а) и конвективного (б) охлаждения формы.

1 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 2 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$; 3 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 4 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$; 5 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $T_{al} = 700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 6 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $T_{al} = 1000^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$.

Установлено, что расстояние между первичными осями дендритов в структуре крупногабаритных лопаток ГТД, получаемых в установке УВНК-8П с радиационным охлаждением формы, составляет 200-300 мкм в пере лопатки и 250-350 мкм в замке. Также вычисления показывают, что по объемной доле пористости, а также по размеру пор, результаты являются соизмеримыми в случае конвективного и радиационного охлаждения формы (рис. 6-7).

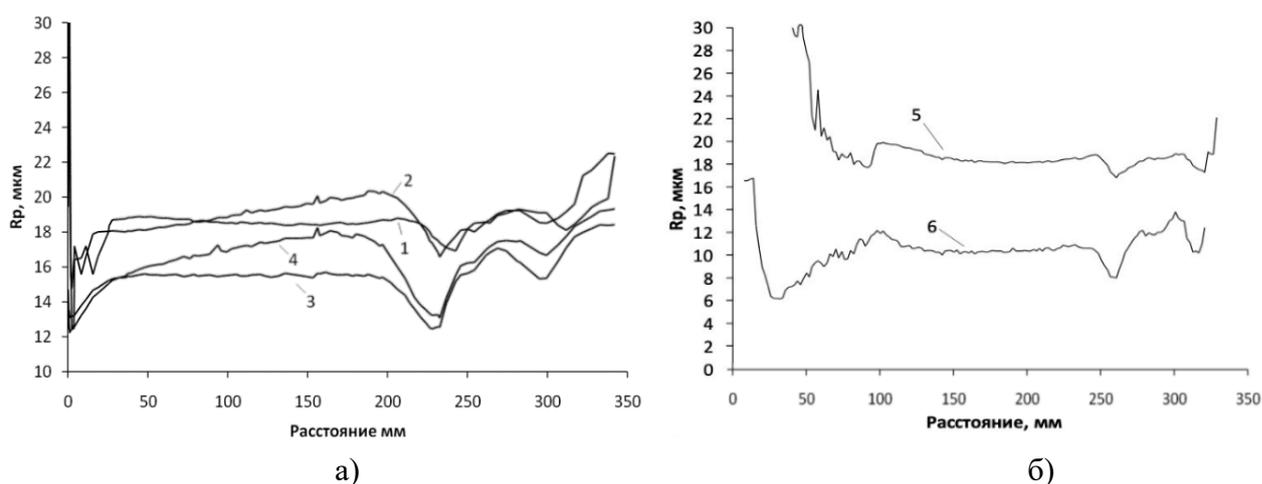


Рисунок 6 – Приведенный радиус R_p микропор для радиационного (а) и конвективного (б) охлаждения формы.
 1 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 2 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$; 3 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 4 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$; 5 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $T_{al} = 700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 6 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $T_{al} = 1000^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$.

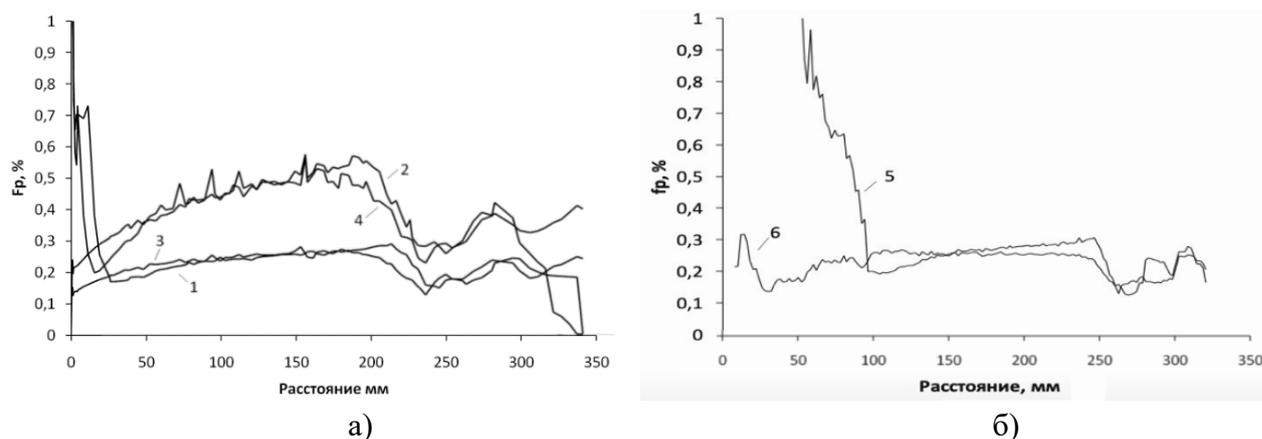


Рисунок 7 – Объемная доля микропор f_p в случае радиационного (а) и конвективного (б) охлаждения формы.
 1 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 2 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$; 3 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 4 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $V = 10\text{мм/мин}$; 5 – $T_h = 1540/1500^\circ\text{C}$, $T_{al} = 700^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$; 6 – $T_h = 1740/1700^\circ\text{C}$, $T_{al} = 1000^\circ\text{C}$, $V = 5\text{мм/мин}$.

В третьей главе при помощи компьютерного моделирования процесса направленной кристаллизации исследован механизм отбора одного зерна в криволинейном канале кристаллоотборника и проведено сравнение эффективности плоского зигзагообразного кристаллоотборника со спиральным кристаллоотборником-геликоидом. На рисунке 8 показаны эскизы рассматриваемых в работе стартовых систем.

Разработана методика проведения вычислительного эксперимента, который проводился в два этапа. На первом этапе моделировался процесс нагрева печи с пустой формой, установленной на кристаллизаторе, от исходной температуры до заданной рабочей температуры. На втором этапе моделировался процесс кристаллизации. Были проведены три серии расчетов. Первая серия была проведена для исследования конкурентного роста двух зерен в плоском кристаллоотборнике. Во второй серии расчетов исследовался процесс конкуренции

множества зерен произвольной кристаллографической ориентации в плоском кристаллоотборнике. В третьей серии расчетов моделировался процесс спонтанного зарождения и роста зерен в затравочном узле со спиральным кристаллоотборником – геликоидом.

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что кристаллоотборники простой геометрической формы, рассматриваемые в данной работе, менее эффективны, поскольку смена зоны благоприятного роста в них происходит всего один раз. Как показала серия из 30 расчетов, образование монокристалла происходит только в 6 случаях (рис. 9), т.е. в 20%.

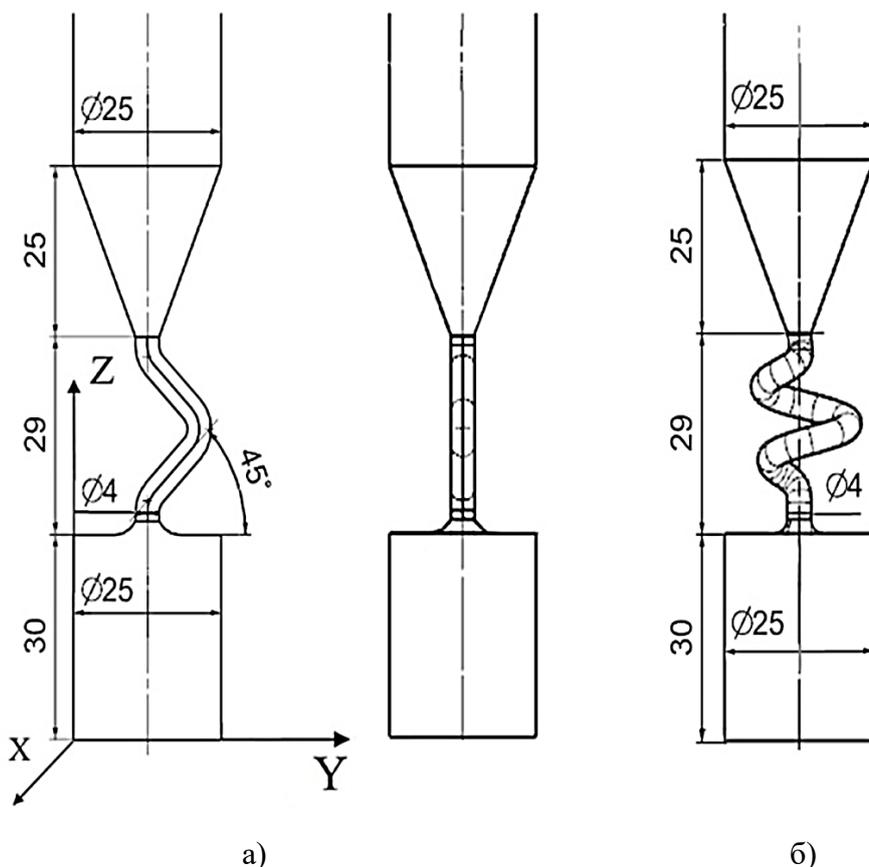


Рисунок 8 – Эскизы стартовых систем, использованных в расчетах.
а) – система с плоским зигзагообразным кристалловодом; б) – стартовый узел со спиралевидным геликоидом.

Моделирование процесса формирования монокристаллической структуры в стартовой системе с кристаллоотборником-геликоидом показало, что при проведении 30 расчетов в 100% случаев на выходе получается монокристаллическая структура.

Подтверждено, что в поперечном сечении криволинейного канала кристаллоотборника существует зона наиболее благоприятных условий конкурентного роста. Зерна, оказавшиеся в этой зоне, получают позиционное преимущество. Они имеют меньше препятствий для роста и больше шансов для захвата большей площади поперечного сечения канала. На начальном этапе кристаллизации зерна, стартовавшие из благоприятной зоны, реализуют свое

позиционное преимущество. Это приводит к сокращению числа зерен в сечении кристаллоотборника до 1-3 зерен. Так как в канале геликоида происходит многократная циклическая смена зоны благоприятного роста, это приводит к гарантированному получению монокристалла.

Подтверждено, что наиболее действенным способом отбора одного зерна в криволинейном канале кристаллоотборника является частая смена расположения зоны благоприятных условий конкурентного роста.

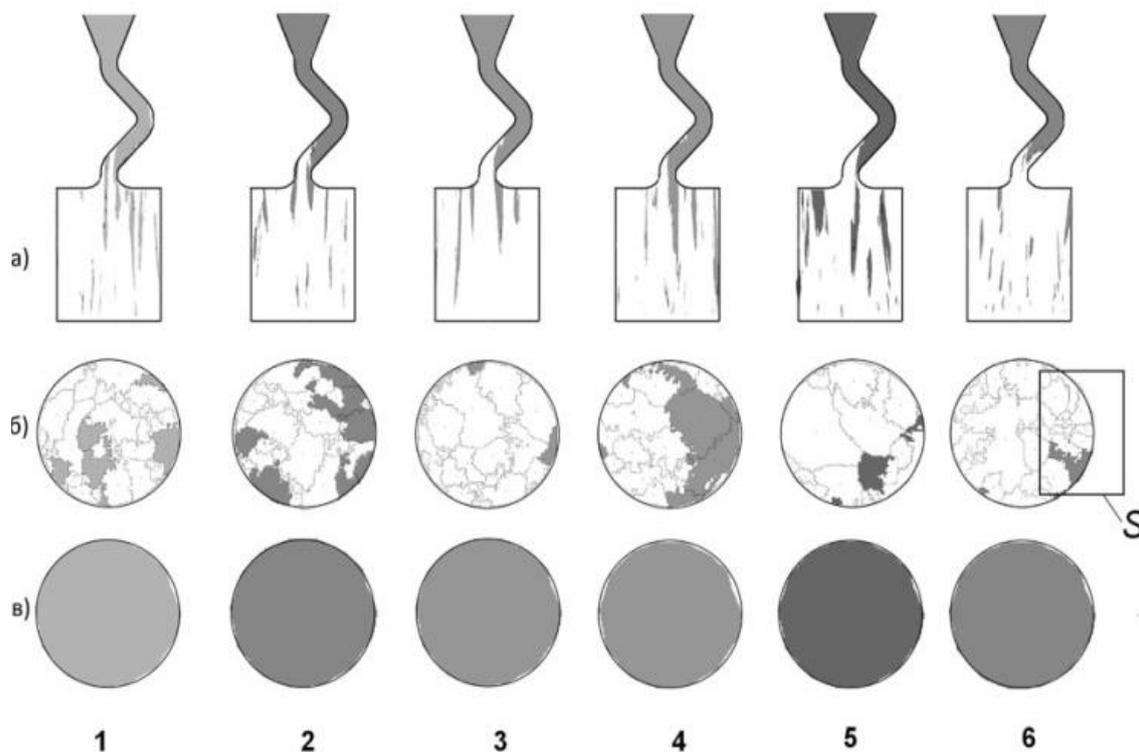


Рисунок 9 – Плоский кристаллоотборник. Местоположение во входном сечении кристалловода и кристаллографическая ориентация зерен, образовавших монокристалл.

1 - $\alpha = 5^\circ$; 2 - $\alpha = 7^\circ$; 3 - $\alpha = 2^\circ$; 4 - $\alpha = 6^\circ$; 5 - $\alpha = 8^\circ$; 6 - $\alpha = 11^\circ$.

а) – продольное сечение кристалловода; б) – сечение на входе в канал кристалловода; в) – сечение на выходе из канала кристалловода. S – зона благоприятная для конкурентного роста.

В четвертой главе на основе результатов компьютерного моделирования литейной технологии в СКМ ЛП «ПолигонСофт» изучена связь пористости с условиями кристаллизации модельного сплава (МЛ10) в отливке типа «Плита» (рис.10) при различных условиях кристаллизации. В результате разработана методика определения порога значения критерия Ниямы и получена шкала для количественной оценки пористости.

В результате расчетов получены зависимости пористости от величины критерия Ниямы в отливке «Плита» для модельных сплавов (14X17H2Л и МЛ10) при различных условиях охлаждения – в кокиле и в ХТС. Определен порог значения критерия Ниямы для модельных сплавов (14X17H2Л и МЛ10), необходимый для прогнозирования зон пористости в отливках, опираясь только на температурные поля в отливке в процессе затвердевания.

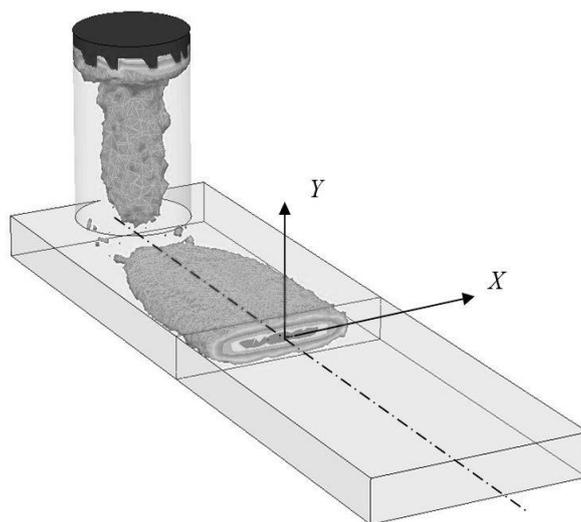


Рисунок 10 – 3D модель отливки типа «Плита».

Как видно из рисунка 11, полученные результаты подтверждают количественную взаимосвязь между критерием Ниямы и вероятностью образования пористости в отливке. С уменьшением критерия Ниямы вероятность образования пористости увеличивается. Величина пористости в данном микрообъеме отливки зависит от тепловых условий кристаллизации (градиент температуры и скорость охлаждения), а также от технологических факторов (температура кокиля и материал кокиля). Порог значения критерия Ниямы для любого сплава зависит от условий охлаждения сплава и поэтому должен определяться для каждого технологического процесса отдельно.

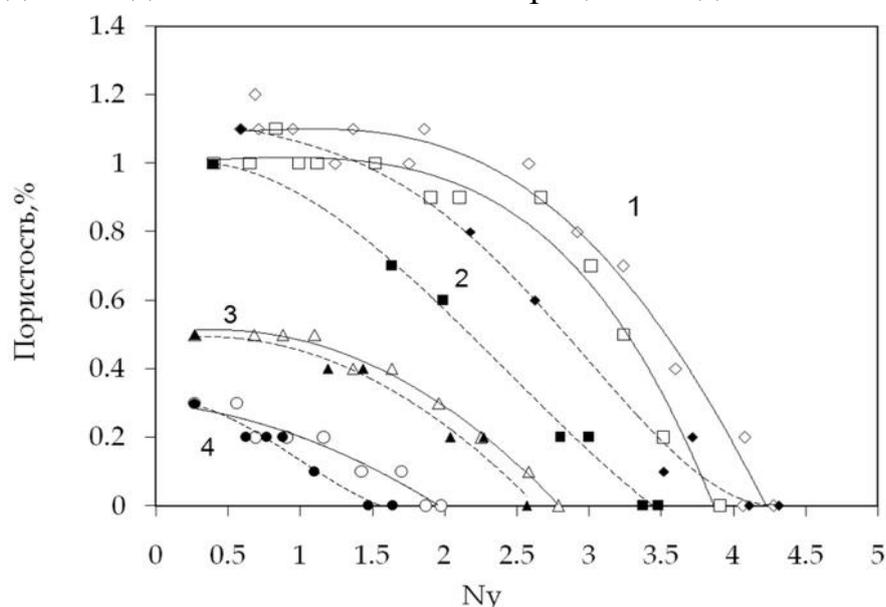


Рисунок 11 – Объемная доля пор в зависимости от величины критерия Ниямы для отливки типа плита из модельного сплава (МЛ10) при литье в кокиль.

1- кокиль, 200°C; 2- кокиль, 300°C; 3- кокиль, 400°C; 4- кокиль, 500°C. Сплошные линии - для узлов вдоль линии X_0 , штриховые линии - для узлов вдоль линии Y_0 .

Для того, чтобы найти количественную зависимость между G и W , из полученного в расчетах массива данных были отобраны узлы в центре сечения

отливки со значениями пористости, заданными в достаточно узком интервале (0,1-1,1%). Полученные наборы содержали узлы с приблизительно одинаковой пористостью, но с разной температурой кокиля.

В результате получена зависимость вида $P = f(G, W)$, связывающая пористость с условиями кристаллизации, которая справедлива для любой температуры кокиля (200°C, 300°C, 400°C, 500°C) в исследованном диапазоне (рис.12).

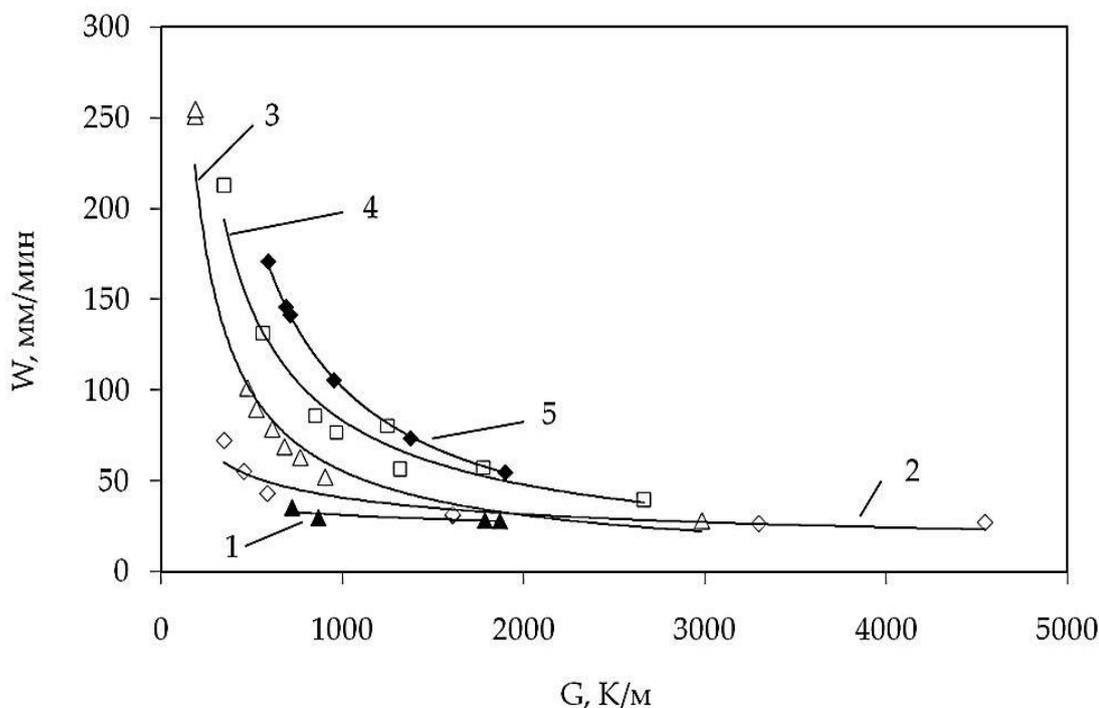


Рисунок 12 – Линии постоянной пористости в зависимости от градиента температуры и скорости кристаллизации для модельного сплава (МЛ10)

1 - $P=0.1\%$; 2 - $P=0.2\%$; 3 - $P=0.5\%$; 4 - $P=1.01\%$; 5 - $P=1.1\%$.

На основе зависимости вида $P = f(G, W)$ может быть построена шкала пористости для количественной оценки пористости по значениям G и W . Эта шкала будет пригодна для расчета пористости там, где есть преимущественно однонаправленный теплоотвод – в протяженных тонких стенках фасонных отливок либо при направленной кристаллизации.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В результате анализа выявлены затруднения существующих теоретических положений, сформулировано существо научно-технической проблемы по модернизации установки УВНК-8П, оптимальному подбору кристаллоотборника для получения монокристаллической структуры и применению критерия Ниямы для прогнозирования усадочной пористости, определена цель работы, заключающаяся в развитии методов компьютерного прогнозирования качества отливок из никелевых жаропрочных сплавов с направленной и равноосной структурой.

2. На основании результатов вычислительных экспериментов во второй главе сделан вывод о возможности существенного упрощения технологии направленной кристаллизации в установке УВНК-8П за счет отказа от использования жидкометаллического холодильника. Установлено, что в установке с УВНК-8П с радиационным охлаждением формы можно получать крупногабаритные лопатки ГТД из сплава ЖС32, по характеристикам дисперсности дендритной структуры, не уступающие отливкам, получаемым при охлаждении формы в расплаве алюминия. Разработаны 3D – модель прототипа усовершенствованной установки УВНК-8П без жидкометаллического холодильника, упрощенная 3D-модель крупногабаритной лопатки ГТД, а также методика вычислительного эксперимента, который формировался в два этапа:

- Первый этап – моделирование процесса выхода печи на режим.
- На втором этапе полученные данные использовались в качестве начальных условий для моделирования процесса направленной кристаллизации.

3. При помощи компьютерного моделирования процесса направленной кристаллизации в третьей главе данной работы исследован механизм отбора одного зерна в криволинейном канале кристаллоотборника и проведено сравнение эффективности плоского зигзагообразного кристаллоотборника со спиральным кристаллоотборником-геликоидом. Разработана методика вычислительного эксперимента, который проводился в два этапа: на первом этапе моделировался процесс нагрева печи (от исходной температуры до заданной рабочей температуры) с пустой формой, установленной на кристаллизаторе. На втором этапе моделировался процесс кристаллизации отливки. На основании полученных результатов вычислительного эксперимента сделан вывод о том, что кристаллоотборники простой геометрической формы, рассматриваемые в данной работе, менее эффективны, поскольку смена зоны благоприятного роста в них происходит всего один раз и, как показали расчеты, образование монокристалла происходит только в 20% случаев.

4. На основе результатов компьютерного моделирования литейной технологии в СКМ ЛП «ПолигонСофт» в четвертой главе изучена связь пористости с условиями кристаллизации для модельных сплавов 14X17H2Л и МЛ10 в отливке в виде плиты при различных условиях кристаллизации. В результате разработана методика определения порога значения критерия Ниямы. Получены зависимости пористости от величины критерия Ниямы в отливке «Плита» для модельных сплавов 14X17H2Л и МЛ10 при различных условиях охлаждения – в кокиле и в ХТС. Определен порог значений критерия Ниямы для модельных сплавов 14X17H2Л и МЛ10, необходимый для прогнозирования зон пористости в отливках, опираясь только на температурные поля в отливке в процессе затвердевания.

5. В результате вычислительного эксперимента в четвертой главе получена зависимость $P=f(G,W)$, связывающая пористость с условиями кристаллизации отливки типа плита из модельного сплава МЛ10 при литье кокиль с температурой (200°C, 300°C, 400°C, 500°C), которая справедлива для любой температуры кокиля в исследованном диапазоне. На основе зависимости $P=f(G,W)$ может быть построена шкала пористости для количественной оценки пористости по значениям

G и W. Эта шкала будет пригодна для расчета пористости там, где есть преимущественно однонаправленный теплоотвод – в протяженных тонких стенках фасонных отливок либо при направленной кристаллизации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Иванина Е.С., Батышев К.А. Модернизация установки УВНК-8П для направленной кристаллизации отливок из жаропрочных Ni-сплавов // Литейное производство. 2017. №1. С. 34-36.
2. Ivanina E.S., Monastyrskiy V.P., Ershov M.Yu. Mechanism of Grain Selection in the Channel of a Grystal Selector to Obtain Single Crystal Castings of Nickel-Base Heat-Resistant Alloys // The Physics of Metals and Metallography. 2019. Vol. 120. No. 11. p. 1063–1070. (Е. С. Иванина, В. П. Монастырский, М. Ю. Ершов Механизм отбора одного зерна в канале кристаллоотборника для получения монокристаллических отливок из никелевых жаропрочных сплавов // Физика металлов и металловедение. 2019. том 120. No11. С. 1159-1166) (Издание индексируется в Scopus).
3. Ivanina E.S., Monastyrskiy V.P., Ershov M.Yu. Quantitative Estimation of Formation of Shrinkage Porosity by the Niyama Criterion // Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 1. pp. 100–105. (Е. С. Иванина, В. П. Монастырский, М. Ю. Ершов Количественная оценка образования усадочной пористости по критерию Ниямы // Материаловедение No5. 2021. С. 19-24 (Издание индексируется в Scopus).
4. Иванина Е.С., Монастырский В.П. Применение критерия Ниямы для прогнозирования усадочной пористости // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. No12. С. 531-536.

Статьи в сборниках материалов научных конференций:

5. Монастырский В.П., Иванина Е.С., Ершов М.Ю. Анализ направленной кристаллизации крупногабаритных лопаток ГТД из никелевых жаропрочных сплавов в промышленной установке УВНК-8П // Научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» . Санкт Петербург. 2017г.
6. Батышев К.А., Иванина Е.С. Направленная кристаллизация отливок из никелевых жаропрочных сплавов // Материалы 3-ей Всероссийской научно-практической конференции «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение». (Чебоксары. 20-21 апреля 2017г.) Издательство: ЧГУ. 2017. С. 60-62.
7. Монастырский В.П., Иванина Е.С., Ершов М.Ю. Особенности конкурентного роста зерен в криволинейном канале кристаллоотборника при направленной кристаллизации никелевого жаропрочного сплава // Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 9 ноября 2017г.) ФГУП «ВИАМ». 2017. С. 227-241.

8. Иванина Е.С., Монастырский В.П. Анализ формирования макро- и микроструктуры при направленной кристаллизации отливок из никелевых жаропрочных сплавов в условиях конвективного и радиационного охлаждения формы. // Прогрессивные литейные технологии 2017: материалы Международной научно-практической конференции (г. Москва, 13-17 ноября 2017 г.). МИСиС. 2017.

9. Иванина Е.С., Монастырский В.П. Анализ условий получения монокристаллических отливок с применением плоского кристаллоотборника // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна: машиностроительные технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018.

10. Голенок В.М., Иванина Е.С. Прогнозирование объемной доли усадочной пористости с использованием критерия Ниямы. // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна: машиностроительные технологии» МГТУ им.Н.Э. Баумана. 2019.

11. Иванина Е.С., Монастырский В.П. Оценка возможности прогнозирования пористости в отливках из сплава МЛ10 с помощью критерия Ниямы // Гагаринские чтения. Сборник тезисов докладов XLVI Международной молодежной научной конференции. 2020.

12. Иванина Е.С., Монастырский В.П. прогнозирование пористости в отливках из сплава мл10 по тепловым условиям кристаллизации // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна: машиностроительные технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2020.

13. Иванина Е.С., Монастырский В.П. прогнозирование усадочной пористости в отливках из сплава мл10 с помощью критерия Ниямы // Материалы X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». НИТУ «МИСиС. 2020.

14. Иванина Е.С., Ершов М.Ю. Методика вычислительного эксперимента для прогнозирования микропористости в отливках с равноосной структурой (на основе критерия Ниямы) // Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «АПНиТ 2024» ДГТУ. 2024.