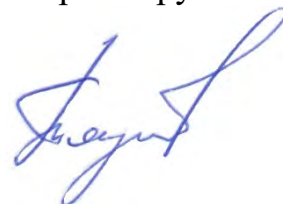


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Тягунов Андрей Геннадьевич

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ  
НИКЕЛЕВЫХ РАСПЛАВОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
ПРОИЗВОДСТВА, СТРУКТУРНО-ФАЗОВУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ  
И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в департаменте информационных технологий и автоматике Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Официальные оппоненты:

**Окишев Константин Юрьевич,**

доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры термообработки и физики металлов;

**Кулешова Евгения Анатольевна,**

доктор технических наук, доцент, ФГБУ «Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"», г. Москва, главный научный сотрудник отделения реакторных материалов и технологий Курчатовского комплекса нано- био- инфо-когнитивных и социогуманитарных наук - природоподобных технологий;

**Шаткульский Александр Анатольевич,**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», Ярославская область, г. Рыбинск, заведующий кафедрой материаловедения, литья и сварки.

Защита состоится «06» июня 2024г, в 14-00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.01.04 по адресу 620002, г. Екатеринбург, ул.Мира,19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5821>.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ольга Владимировна Селиванова

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Наиболее важными задачами промышленной политики Российской Федерации является импортозамещение и развитие производства новейшей техники гражданского и оборонного назначения. В рамках развития оборонно-промышленного комплекса правительством выделена отдельная программа по двигателестроению. В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в авиации, судостроении, транспортировке нефти и газа, энергетике в т.ч. ядерной. Главная цель преумножения эффективности газотурбинных двигателей – увеличение их коэффициента полезного действия за счет повышения температуры сгорания топлива, а также улучшения удельных характеристик авиационных ГТД за счет уменьшения их размеров, массы и упрощения конструкции. Для достижения главной цели требуется разработка новых материалов и технологий, отвечающих требованиям энергоэффективности, ресурсосбережению и имеющим возможности переработки и вторичного использования ресурсов. Отдельно отмечается важность применения современных информационных технологий и искусственного интеллекта.

Современное развитие жаропрочных никелевых сплавов – материала для наиболее ответственных деталей ГТД продолжается в двух направлениях. Первое касается повышения температуры сгорания топлива для увеличения скорости и маневренности авиационной техники, т.е. увеличение жаропрочности без изменения удельного веса изделий. Второе связано с развитием судовых двигателей, перекачивающих насосов и энергетических установок, где больший интерес разработчиков вызывает стоимость изготовления и долговечность изделий.

В состав жаропрочных сплавов на никелевой основе (ЖНС) входят кобальт, хром, алюминий, титан, ниобий, тантал, молибден, вольфрам, ванадий, гафний, железо, рений, рутений и др. Наиболее критичными являются добавки Re и Ru. С одной стороны, они существенно повышают жаропрочность и структурно-фазовую стабильность ЖНС за счет твердорастворного и дисперсионного упрочнений, а также за счет значительного подавления диффузионного перемещения атомов в

условиях эксплуатации. Однако суммарное содержание этих элементов до 14% приводят к удорожанию сплавов с 12 до 25 млн. рублей за тонну. Понижение диффузионных процессов в структуре ЖНС влечет технологическую проблему – время нагрева под закалку на некоторых сплавах увеличивается до 26 часов.

Здесь также следует отметить еще одну очень важную проблему легирования жаропрочных никелевых сплавов – риски нарушения поставок элементов, молибдена, кобальта и рения являются самыми значительными для производства сплавов.

По данным обзора российского рынка потребления жаропрочных никелевых сплавов следует, что максимальную долю в структуре потребления, свыше 1170 тонн составляют литейные сплавы семейства ЖС6, не содержащие дорогостоящих элементов (ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ, ЖС6К, ЖС6У, ЖС6К-ИД, ЖС6КП-ИД, ЖС6КП-ВД, ЖС6У-ИД), их доля 35%; ЧС70У-ЭШП-12%; ЖСЗДК-ВИ-3%; ЖС26-ВИ-2%; ВХ4Л-ВИ-9%. Из сплавов, легированных дорогостоящими или трудно доступными элементами, применяется ВЖЛ14-ВИ-15%; ВЖЛ12У-ВИ-4%. На импортные сплавы приходится 16% рынка. Таким образом, существуют проблемы, сдерживающие применение большинства марок сложнолегированных ЖНС. К ним относятся стоимость сплавов и риск недопоставок легирующих элементов, что в современных экономических условиях и необходимости импортозамещения приобретает значительную важность.

Учитывая названные проблемы, тема работы, посвященная улучшению качества ЖНС за счет совершенствования их свойств без изменения химического состава, является **актуальной**, представляет собой крупную научную проблему, имеющую важное практическое значение для развития отечественных газотурбинных двигателей.

**Степень разработанности темы исследования.** Доступным способом совершенствования структуры и свойств жаропрочных никелевых сплавов, независимо от их химического состава, является технология высокотемпературной обработки расплава (ВТОР). Основой для новых технологических режимов выплавки металлических материалов являются данные о полноте структурных изменений их

расплавах, выявляемой в процессе изучения их физических свойств, а также формирование представлений о механизме трансформации структуры расплавов. Объяснения происходящим структурным изменениям металлических жидкостей даются с позиций квазихимического варианта модели микронеоднородного строения металлических жидкостей, где расплав вблизи температуры плавления состоит из атомных ассоциаций (кластеров) с неравномерным распределением легирующих элементов.

На неравновесность микронеоднородных расплавов указывают исследования их физических свойств. В работах коллективов под руководством А.М. Самарина, А.А. Вертмана, П.В. Гельда, Н.А. Ватолина, Б.А. Баума, В.А. Григоряна, О.И. Островского, П.П. Арсентьева, Г.И. Еланского, В.И. Ладьянова исследованы вязкость, плотность, поверхностное натяжение, электросопротивление, магнитная восприимчивость, теплопроводность, теплоемкость и диффузионные характеристики различных по химическому составу расплавов, в широком диапазоне температур. Значения физических свойств расплавов вблизи температуры ликвидус не стабильны.

Впервые предположения о микронеоднородном состоянии расплавов были сформулированы Г.В. Стюартом и Я.И. Френкелем. Движения атомов в жидкостях и твердых телах предложено считать аналогичными, жидкость состоит из множества разориентированных микрокристаллических областей с размытыми границами, медленно перерождающиеся одна в другую. Дальнейшее развитие этой теории принадлежит В.И. Архарову, И.А. Новохатскому, В.И. Ладьянову и В.З. Кисунько. Им принадлежит "кластерная стохастическая модель", где металлическая жидкости состоит из структурных динамических фаз. В основе квазихимической модели, предложенной коллективом под руководством Б.А. Баума, заложено равноправие колебательного и трансляционного движения частиц жидкости. В работах Н.А. Ватолина, С.И. Попеля и Л.А. Жуковой развиваются представления о наличии в расплавах областей с ближним порядком. Научным коллективом под руководством П.С. Попеля предложено и развито представление о метастабильной микрогетерогенности расплавов.

Первая информация о гистерезисе политейм структурочувствительных физических свойств расплавов жаропрочных никелевых сплавов относится к 70-м годам двадцатого века. За это время на основе сопоставления результатов изучения удельного электросопротивления, кинематической вязкости, плотности, дифференциального термического анализа и других свойств описаны температурно-временные диапазоны структурных изменений никелевых композиций в жидком состоянии и влияние структурного состояния расплава на образование твердых структур. Однако объяснения происходящим в расплаве ЖНС изменениям приводились только эмпирические. Это обстоятельство нисколько не умоляло важность полученной информации, и температурно-временные данные структурных изменений легли в основу промышленных режимов высокотемпературной обработки расплавов (ВТОР) жаропрочных никелевых сплавов, производственное использование которой приносит множество ощутимых преимуществ. При этом вопрос о научных доказательствах сущности структурных изменений расплавов жаропрочных никелевых сплавов оставался открытым.

Не выясненным до конца фактом является влияние ВТОР на жаропрочность и структурно-фазовую стабильность сплавов на основе никеля в твердом состоянии. Проблему создает дефицит информации о этих свойствах, соответствующих конкретным плавочным составам.

В отсутствии изданных марочников и справочников, разрозненные и неполные сведения о жаропрочности никелевых сплавов возможно почерпнуть из открытых источников и дополнить недостающие применением современных методов информационных технологий.

Структурно-фазовая стабильность характеризует неизменность структуры и свойств изделий из жаропрочных никелевых сплавов при эксплуатации. При компьютерном конструировании новых сплавов, еще до выплавки и испытаний, разработчиками определяются параметры фазовой стабильности: показатель несбалансированности ( $\Delta E$ ), средний энергетически уровень d-орбиталей сплава и матрицы ( $Md$ ). В литературных источниках о фазовой стабильности выплавленных образцов принято судить, в первую очередь, по температуре полного растворения основной

упрочняющей фазы ( $t_{пр}$ ), определяемой дифференциальным термическим анализом. Однако, легирование ЖНС такими элементами, как рений и рутений, а также высокотемпературная обработка расплава приводят к непропорциональным изменениям  $t_{пр}$  и структурно-фазовой стабильности. Теория гетерогенности жаропрочных никелевых сплавов, основанная на исследовании структурных изменений, свидетельствует - структурно-фазовая стабильность должна оцениваться степенью деградации структуры и свойств сплава в температурно-временных условиях работы изделий. Кроме того, мировым опытом накоплен не малый объем статистической информации о изменении свойств ЖНС в условиях эксплуатации, соответствующих конкретным плавочным составам, что должно внести весомый вклад в точность оценки структурно-фазовой стабильности, но достаточной полной информации о таких методах определения нет, что обосновывает необходимость предложения нового способа оценки.

**Объект исследования:** управление структурой и свойствами металлических материалов на основе закономерностей наследственной взаимосвязи их жидкого и твердого состояний.

**Предмет исследования:** достижение максимально возможных значений жаропрочности и структурно-фазовой стабильности изделий из сплавов заданного состава на основе никеля за счет высокотемпературной обработки их расплава.

**Цель работы:** теоретическое обоснование, экспериментальное подтверждение целесообразности высокотемпературной обработки расплава на основе никеля для достижения максимально возможных значений жаропрочности и структурно-фазовой стабильности металлопродукции из сплавов данного состава.

Для достижения указанной цели необходимо решение следующих **основных задач:**

- построение математической модели структурных изменений в неравновесных расплавах на основе никеля при нагреве и изотермической выдержке;
- установление термокинетических закономерностей кристаллизации жаропрочных никелевых сплавов и влияния на них структурных состояний расплава;

- обоснование технологической целесообразности применения высокотемпературной обработки расплава жаропрочных никелевых сплавов;
- создание электронной базы данных химических составов, соответствующих им пределов длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов и разработка методов предварительной математической обработки данной базы для повышения точности прогнозирования влияния составов на жаропрочность;
- разработка и реализация численной модели влияния параметров испытания на изменение предела длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов;
- разработка нового метода определения структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов в температурно-временных условиях эксплуатации.

**Методология и методы исследования.** Для достижения целей и решения задач, поставленных в настоящей работе, использовались:

- методы исследования физических свойств металлических расплавов: удельного электросопротивления, кинематической вязкости, плотности, а также рентгеноструктурного исследования расплавов;
- методы исследования процессов, происходящих при кристаллизации и образовании литых структур: дифференциальный термический анализ, а также методики качественной и количественной металлографии;
- метод математического моделирования – прикладной пакет MATLAB

**Характеристика материала исследования.** Жаропрочные сплавы — металлические материалы, обладающие высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и растягивающих напряжений. Основой для жаропрочного сплава могут служить: алюминий, титан, железо, медь, кобальт, но чаще всего никель. Из жаропрочных никелевых сплавов изготавливают рабочие и сопловые лопатки, диски ротора турбины, детали камеры сгорания и т. п. В зависимости от технологии изготовления металлопродукции ни-



келевые жаропрочные сплавы могут быть литейными, деформируемыми и порошковыми. Наиболее жаропрочными являются литейные монокристаллические сложнолегированные сплавы на никелевой основе, способные работать до температур (1050...1100)°С в течение сотен и тысяч часов при высоких статических и динамических нагрузках.

**Эмпирическую базу** настоящего исследования составляют неопровержимые данные, являющиеся основой для обоснования гипотез, построения моделей и формулирования выводов: плавочные химические составы, результаты исследования изменения физических свойств расплавов, результаты изучения процессов кристаллизации и образования твердых структур; результаты промышленных испытаний на длительную прочность и другие.

**Информационную и источниковую базу** исследования составляют литературные источники, перечень которых приведен в приложении.

### **Положения, выносимые на защиту**

– модель происхождения, разнообразия и изменения метастабильных кластерных образований жаропрочных никелевых расплавов при нагреве и изотермической выдержке;

– влияние структурных состояний жаропрочного никелевого расплава на термокинетические закономерности кристаллизации;

– сформулированная на основе результатов собственных экспериментальных, теоретических исследований и литературных источников целесообразность применения высокотемпературной обработки расплава жаропрочных никелевых сплавов;

– совокупность результатов создания базы данных, метода их подготовки, математического моделирования влияния химических составов и параметров испытаний на изменение предела длительной прочности, метода определения структурно-фазовой стабильности, позволяющих заключить – ВТОР жаропрочных никелевых

сплавов способствует достижению максимально возможных значений жаропрочности и структурно-фазовой стабильности сплавов данного состава.

### **Научная новизна работы**

– выявлена сущность структурных изменений металлических жидкостей на основе никеля: нагрев метастабильных жаропрочных расплавов никелевых сплавов до определенных температур или изотермическая выдержка приводят к фазовому переходу второго рода, сопровождающемуся уменьшением размеров атомных кластеров до нескольких межатомных расстояний ( $\sim 0,5\text{нм}$ );

– установлено, что образующиеся при плавлении кластеры наследуют структуру вторичных фаз исходного твердого состояния (карбидов, нитридов и интерметаллидов);

– установлено влияние структурного состояния расплава на термокинетические закономерности кристаллизации: наименьший интервал кристаллизации и наибольшая степень переохлаждения жаропрочного никелевого сплава возникают при нагреве его расплава не выше температур завершения структурных изменений металлической жидкости;

– показана целесообразность применения высокотемпературной обработки расплавов на основе никеля, позволяющая получить металлопродукцию с улучшенными значениями служебных свойств;

– предложен новый научный подход к анализу влияния химического состава сплава и условий испытаний на свойства, основанный на применении современных информационных технологий. На его основе спрогнозированы недостающие значения пределов длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов с точностью не ниже промышленных испытаний;

– получены новые результаты о влиянии химического состава и высокотемпературной обработки расплава жаропрочных никелевых сплавов на их структурно-фазовую стабильность твердого состояния и, соответственно, на предел их длительной прочности при температурах эксплуатации.

## **Теоретическая значимость работы**

– предложена новая математическая модель, раскрывшая строение жаропрочного металлического расплава после структурных изменений в результате нагрева или изотермической выдержки, а также подтвердившая научную концепцию квазикристаллической модели микронеоднородного строения металлических жидкостей, и явившаяся научным обоснованием технологии высокотемпературной обработки расплавов жаропрочных никелевых сплавов;

– впервые получены научные доказательства принадлежности структурных изменений расплавов жаропрочных никелевых сплавов при нагреве и изотермической выдержке к фазовому переходу второго рода;

– установленное влияние структурного состояния расплава на термокинетические закономерности кристаллизации является основой для оптимизации технологических параметров производства;

– представлена целесообразность применения высокотемпературной обработки жаропрочных никелевых расплавов в литейном производстве, горячей пластической деформации и порошковой металлургии, которая заключается в расширении ее возможностей: увеличении выхода годного, снижении технологического брака и использовании вторичных ресурсов;

– предложена новая численная модель влияния химического состава и температурно-временных параметров испытаний на предел длительной прочности и структурно-фазовую стабильность жаропрочных никелевых сплавов.

## **Практическая значимость работы**

– предложенные методики обработки входных данных, конструирования и тренировки нейронной сети, получения базы полных данных о значениях пределов длительной прочности, соответствующих плавочным составам жаропрочных никелевых сплавов, а также результаты моделирования изменения жаропрочности в условиях эксплуатации отражены в учебном пособии "Применение искусственных нейронных сетей в материаловедении", рекомендованном для студентов вузов;

- разработано устройство для определения интенсивности структурной перестройки расплавов жаропрочных сплавов (Патент РФ № 157157);
- обоснован способ оценки равновесия металлических расплавов (Патент РФ № 2680984);
- разработано устройство оценки равновесности металлических расплавов (Патент на полезную модель RUS 182131);
- предложено научное обоснование технологии высокотемпературной обработки расплава жаропрочных никелевых сплавов и ее влияния на технологические параметры производства;
- предложен метод моделирования значений жаропрочности никелевых сплавов по их химическому составу и заданных температурно-временных параметрах испытаний, основанный на нейросетевом прогнозировании;
- предложен метод повышения точности нейросетевого прогнозирования свойств металлических материалов, основанный на оптимизации входных данных и тренировки искусственной нейронной сети;
- получена новая база данных о жаропрочности 350 марок сплавов на основе никеля в соответствии их плавочным составам;
- предложен метод оценки структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов;
- научные результаты данной диссертационной работы используются в научно-исследовательской деятельности стратегического проекта "Высшая инженерная школа аэрокосмических технологий" (ВИШАТ) в рамках программы Приоритет 2030, а также в учебном процессе при подготовке магистрантов образовательной программы "Сварочные и литейные технологии в авиадвигателестроении" направления 15.04.01 ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий.

### **Степень достоверности полученных результатов**

Степень достоверности работы базируется на тщательном анализе имеющихся литературных источников; обеспечивается использованием комплекса со-

временных методов исследования структуры и свойств металлов, включая сертифицированные на международном уровне компьютерные программы; подтверждается воспроизводимостью результатов других исследователей как в нашей стране, так и за рубежом; также подтверждается соответствием компьютерных прогнозов, базирующихся на разработанных моделях, наблюдаемым экспериментальным фактам и производственным испытаниям.

#### **Апробация работы** производилась на

5th International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering, ICMAA 2021"; International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM 2019; 3rd International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics and Optimization, ICCAIRO 2019; 2nd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science, EECS 2018; Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018; Materials Science and Engineering 2018; Конгресс с международным участием и Конференции молодых ученых, V Форума Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов. Екатеринбург, 2017; International Conference on Innovative Research, ICIR Euroinvent 2017; Materials Science and Engineering 2016; Менделеевский конгресс 26-30 сентября 2016 XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии; XIV Российская конференция «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов», Екатеринбург, ИМет, 2015; XIII Международный конгресс сталеплавильщиков Москва-Полевской 2014г; XIII Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН, 2011; 14 International Conference on Liquid and Amorphous Materials, Rome, Italy, 2010; 12 International IUPAC-Conference on High Temperature Materials Chemistry, Vienna, Austria, 2006; III Российская научно-технической конференция «Физические свойства металлов и сплавов» Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005; Седьмой Российской конференции по реактор-

ному материаловедению, Дмитровград, 2004; VI съезда литейщиков России, Екатеринбург, 2003; Фундаментальные проблемы металлургии, Екатеринбург, 2003; Физические свойства металлов и сплавов. Екатеринбург, 2002; Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти П.В. Гельда «Физические свойства металлов и сплавов», Екатеринбург, УГТУ, 2001; X Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов», Екатеринбург-Челябинск, ЮУрГУ, 2001; II Межвузовской научно-технической конференции "Фундаментальные проблемы металлургии". Екатеринбург: изд-во УГТУ-УПИ, 2000; IX Всероссийской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов», Челябинск, ЮУрГУ, 1998; Новые материалы и технологии: Тез. докл. Всероссийской науч.-техн. конф.-М., 1997; International Conference "Eutectica IV" Dnepropetrovsk, Ukraine, June 24-26, 1997; конференция литейщиков России "Совершенствование литейных процессов", Екатеринбург, 1997; international scientific conference "Challenges to civil and mechanical engineering in 2000 and beyond" Wroclaw, Poland, June 2-5, 1997; Third Russian-Chinese Symposium "Advanced Materials and Processes", Kaluga, Russia, 1995, P.258; Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов: VIII Все-российской конф.-Екатеринбург, 1994; Международная научно-техническая конференция "Проблемы автоматизации и технологии в машиностроении", Рубцовск, 1994.

Работа выполнена в департаменте информационных технологий и автоматизации Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования № 075-03-2023-006 от 16.01.2023 (номер темы FEUZ-2023-0015).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 47 научных работ, в том числе 37 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 16 статей опубликованы в научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of science (WOS); 2 монографии; получено 6 патентов РФ.

## **Личный вклад автора**

Диссертационная работа является результатом многолетней исследовательской работы автора (с 1993г.) на металлургическом факультете ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ», далее – в Институте радиоэлектроники и информационных технологий УрФУ (по настоящее время). Диссертанту принадлежит основная роль в постановке цели и задач исследования, в выборе путей и методов их решения. Все этапы экспериментальной работы проведены при непосредственном участии диссертанта. Диссертантом лично получены основные результаты по изучению удельного электросопротивления расплавов жаропрочных никелевых сплавов, а также лично получено большинство результатов металлографического исследования литых структур, подготовлена база данных, объединяющая плавочные составы и свойства жаропрочных никелевых сплавов, интерпретированы результаты и написаны научные статьи. Организовано новое прикладное направление: использование искусственных нейронных сетей для решения задач материаловедения. Обоснованы принципы создания математических моделей структурных изменений расплавов жаропрочных никелевых сплавов и изменения предела длительной прочности сплавов на основе никеля под воздействием температурно-временных параметров проведения испытаний.

## **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 310 страницах, состоит из введения, пяти разделов и заключения, в том числе 76 рисунков и 5 таблиц; список литературы включает 444 работ отечественных и зарубежных авторов

## **Основное содержание работы**

**Во введении** приведена общая характеристика работы: обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и основные задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна работы, а также ее теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** рассмотрено современное представление о жаропрочных никелевых сплавах. Приведена информация о назначении сплавов, их химическом составе и роли каждого легирующего элемента, о технологиях производства изделий, о целях применяемых режимов термической обработки, о структуре и роли структурных составляющих в упрочнении изделий, о разупрочнении в период эксплуатации и соответствующей деградации структуры.

**Во второй главе** теоретически и экспериментально подтверждена модель происхождения, разнообразия и изменения метастабильных кластерных образований, что выявляет сущность структурных изменений расплавов жаропрочных никелевых сплавов.

Технология высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) жаропрочных никелевых сплавов несмотря на достижения промышленного применения, нуждалась в теоретическом обосновании. В основу ВТОР никелевых композиций заложена квазикристаллическая модель микронеоднородного строения: вблизи температуры плавления расплавы ЖНС состоят из динамических кластерных микробразований различной величины и набора атомов легирующих элементов, что формирует неравновесное состояние. В условиях последующего нагрева до определенных температур или изотермической выдержки жаропрочные никелевые расплавы переходят в равновесное состояние, доказательством чего служат результаты исследований физических свойств. Сущность структурных изменений была не ясна. Для подтверждения модели микронеоднородного состояния и получения информации о изменении структуры жидких жаропрочных никелевых сплавов под воздействием температуры и времени установлена причастность структурных изменений к фазовому переходу второго рода, а также предложено физико-математическое описание изменения среднего размера кластера, что позволило сделать заключение о структуре жаропрочного никелевого расплава, соответствующего равновесному состоянию.

Наиболее структурочувствительным методом для изучения расплавов ЖНС является удельное электросопротивление ( $\rho$ ). Политермы  $\rho$  нагрева и охлаждения



наиболее известных марок жаропрочных никелевых сплавов представлены на рис.1. Они имеют вид характерный для большинства жаропрочных никелевых сплавов.

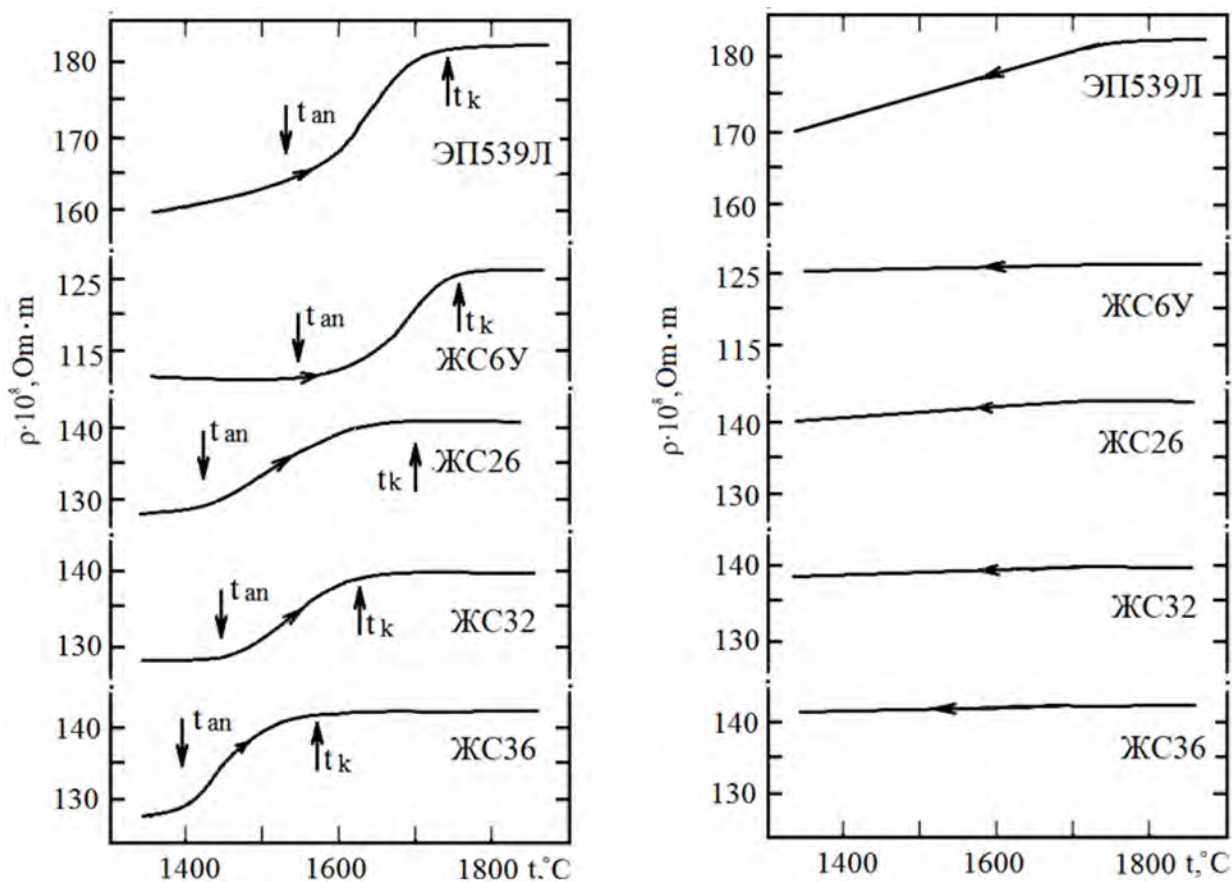


Рис.1. Политермы удельного электросопротивления расплавов жаропрочных никелевых сплавов, полученные в режиме нагрева и охлаждения.

Политермы нагрева отличаются не монотонным изменением абсолютных значений удельного электросопротивления с ростом температуры. Они состоят из нескольких температурных интервалов, границы которых обозначены, как  $t_{ан}$  и  $t_k$ . После температуры  $t_{ан}$  начинается участок с аномальным ростом значений удельного электросопротивления. После достижения температуры  $t_k$  удельное электросопротивление расплавов ЖНС вновь слабо зависят от температуры. Ход политерм охлаждения не совпадает с политермами нагрева (явление гистерезиса) и не сопровождается резким изменением абсолютных значений  $\rho$ . Максимальное и постоянное различие политерм возникает при нагреве расплава до  $t_k$ .

Согласно феноменологической теории Ландау фазовые переходы второго рода характеризуются непрерывностью изменения состояния и отсутствием выделения или поглощения скрытой энергии.

Для выявления изменения скрытой энергии процесса анализировались результаты дифференциального термического анализа (ДТА) на примере образцов сплава ЖС6У (рис.2).

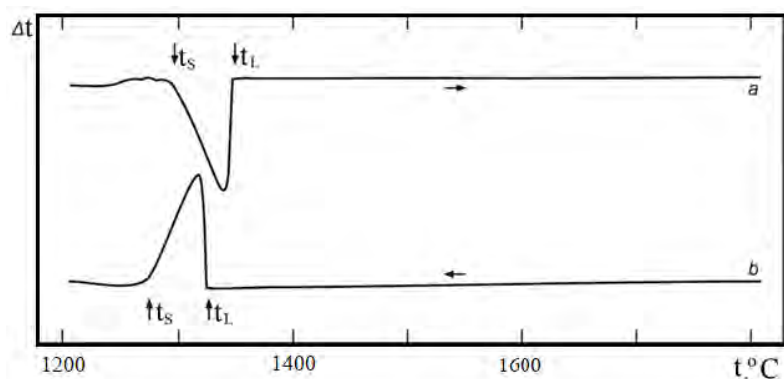


Рис.2. ДТА кривые сплава ЖС6У, а – при нагреве, и охлаждении б.

Стрелками обозначены температуры солидуса  $t_s$  и ликвидуса  $t_L$ . В температурном интервале (1250...1350)°С выявлены тепловые эффекты, связанные с плавлением (а) и кристаллизацией (б) исследуемого сплава. Выше (правее) температуры ликвидуса ДТА-кривые представляют собой горизонтальную линию с полным отсутствием поглощения или выделения тепла в широком температурном интервале. Результаты экспериментов свидетельствуют об отсутствии выделения или поглощения скрытой теплоты в процессе структурных изменений жидкого жаропрочного сплава, т.е. выполняется одно из условий для принадлежности структурных изменений, происходящих в жидких расплавах на основе никеля при нагреве и охлаждении, к фазовому переходу второго рода.

Структурные изменения жаропрочных никелевых расплавов возможны не только при его перегреве выше  $t_k$ , но и в результате изотермических выдержек ниже этой температуры. Для выявления характера структурных изменений, происходящих в расплавах жаропрочных никелевых сплавов на примере ЖС26 в диапазоне температур ниже  $t_k$ , выполнены измерения удельного электросопротивления в условиях изотермических выдержек, при различных температурах. Наблюдаемые значения электросопротивления фиксировались каждые 300 с (5 мин).

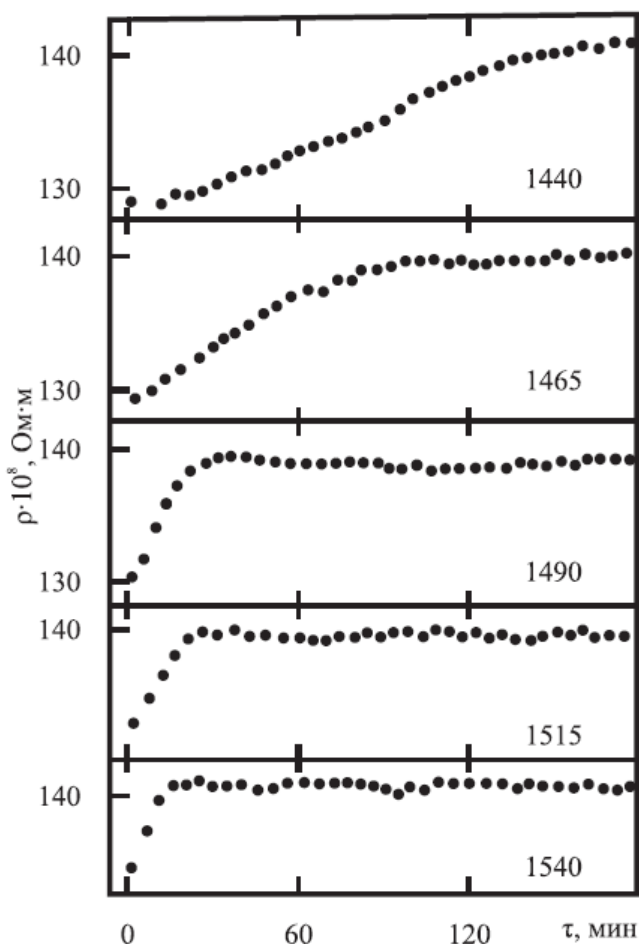


Рис.3. Изотермы удельного электро-сопротивления расплава ЖС26. Цифры у графиков – температуры изотермических выдержек (°С).

В течении изотермических выдержек значения удельного электро-сопротивления постоянно возрастали, достигли максимума (рис.3), а затем слабо зависели от времени. Чем ближе температура выдержки к  $t_k$  (рис.1) тем короче продолжительность выдержки для завершения структурных перестроек. Сущность явления заключается в постепенном уменьшении амплитуды колебаний атомов, более равномерному распределению энергетического потенциала по объему кластера и ослаблению межатомного взаимодействия в период изотермических выдержек расплава, что приводит к самопроизвольному процессу установления термодинамического равновесия.

Приведенные результаты указывают на непрерывность происходящего процесса, что, как было отмечено, является другим признаком фазового перехода второго рода. Таким образом, отсутствие эндо/экзо термических реакций на ДТА-кривых и непрерывность процесса структурных изменений на политермах и изотермах удельного электро-сопротивления, свидетельствуют о происходящих в расплавах

жаропрочных никелевых сплавов фазового перехода второго рода, что для металлических расплавов является трансформацией жидкость-жидкость, когда жидкость одной плотности меняется на жидкость другой плотности.

Для получения информации о сущности структурных изменений на атомном уровне предложена математическая модель, позволившая получить данные о изменении среднего размера ( $R_c$ ) кластерных микрообразований жаропрочных никелевых сплавов в условиях нагрева. Моделирование проводилось на основании данных сплава ЖС6У. В результате получена зависимость, представленная на рис.4.

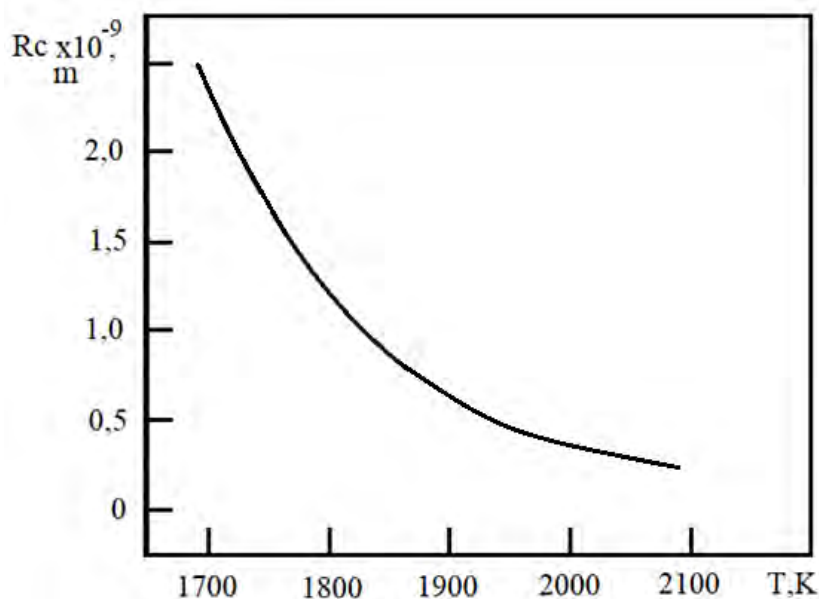


Рис.4. Результаты моделирования изменения размеров кластера в результате нагрева расплава ЖС6У.

Из результатов моделирования следует - при нагреве расплава ЖС6У в температурном диапазоне (1700...2100)К средний размер его кластера уменьшается до величины порядка  $5 \times 10^{-10}$  м, что доказывает – структура расплава ЖНС после необратимого перехода в гомогенное микрооднородное состояние также состоит из атомных ассоциаций, но имеющих размер в несколько межатомных расстояний, что обеспечивает более равномерное распределение легирующего элемента по всему объему и, соответственно, наибольшую равновесность.

Известно, неравновесность расплавов в близи плавления наследственно связана с твердым состоянием. Основными структурными составляющими жаропрочных никелевых сплавов в кристаллическом состоянии являются твердый раствор (матрица) и основная упрочняющая  $\gamma'$  фаза, а также эвтектика ( $\gamma + \gamma'$ ). Совокупно они составляют свыше 90% всего фазового состава. Кроме этого, в фазовый состав,

при определенном содержании углерода, входят карбиды типа МС и эвтектики МС+ $\gamma$ . Таким образом, основной тип атомных микрогруппировок расплавов на основе никеля составляют кластеры типа Ni<sub>3</sub>(Al,Ti...). Для подтверждения этого факта на примере жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У и ЖС26 проведен эксперимент, результаты которого представлены на рис.5.

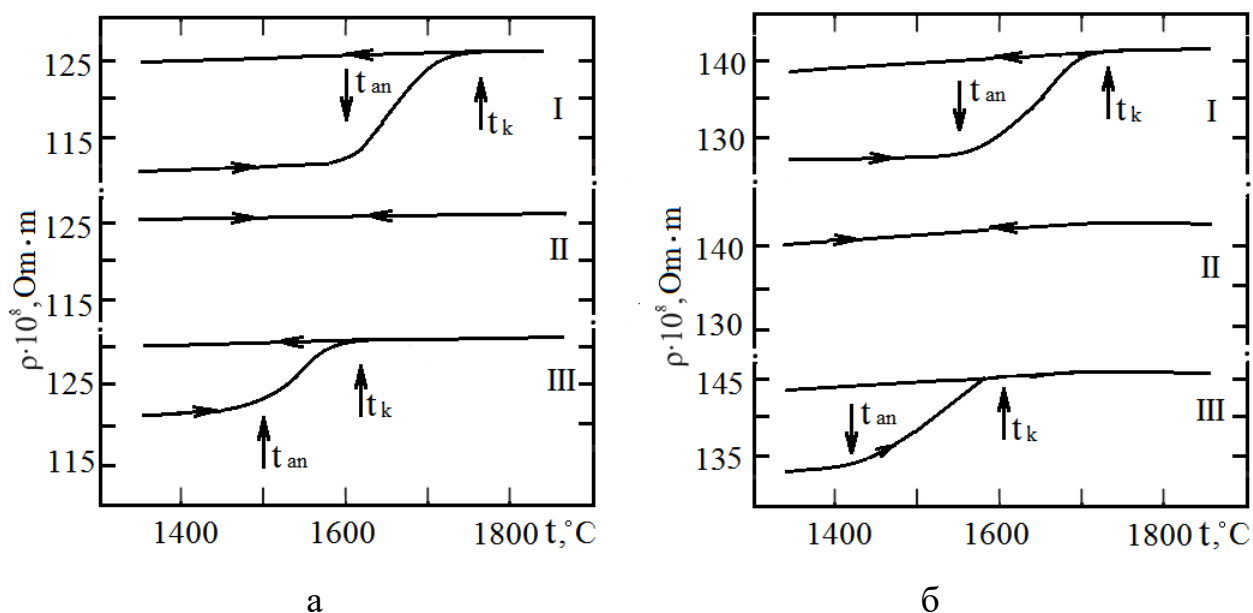


Рис.5. Политермы удельного электросопротивления нагрева и охлаждения жаропрочных никелевых сплавов а - ЖС6У и б - ЖС26 в жидком состоянии. Римскими цифрами указан номер экспериментального режима.

Удельное электросопротивление исследовали при нагреве и охлаждении по трем режимам. Измерения значений  $\rho$  при нагреве по первому режиму проводилось до температуры немного выше  $t_k$ , а затем продолжились при охлаждении до температуры выше начала кристаллизации. По второму режиму нагрев этих же образцов осуществлен до максимальной температуры первого режима, а охлаждали до температуры, когда твердый раствор сформировался, а основная упрочняющая фаза еще не выделились. Условия третьего режима заключались в том, что образец, предварительно прошедший структурные изменения расплава и кристаллизацию (первый режим) нагревался чуть выше  $t_k$ .

Различия абсолютных значений удельного электросопротивления расплава до завершения структурных изменений между верхней и нижней ветвями косвенно свидетельствует о степени неравновесности расплава.

В эксперименте по второму режиму расплав после структурных изменений охлажден ниже температуры ликвидус. При этом сформировались:  $\gamma$ -твердый раствор, карбиды и эвтектики. Интерметаллидная  $\gamma'$  фаза в этот момент еще не выделена. Новый нагрев до температуры, превышающей  $t_k$ , не привел к явлению гистерезиса. Политермы нагрева и охлаждения совпали. Абсолютные значения удельного электросопротивления соответствовали равновесному состоянию – верхней ветви. Это означает, что сформировавшаяся при охлаждении матрица твердого раствора при новом плавлении не влияет на степень равновесности и микронеоднородность расплава, достижения структурного перехода сохраняются.

Третий режим, когда расплав после структурных изменений охлажден до комнатной температуры, при следующем нагреве вновь привел к ветвлению политерм. В ходе нового нагрева после завершения образования кристаллической структуры исследуемых сплавов на никелевой основе до температуры выше  $t_k$  на политерме нагрева снова выявился участок аномального роста абсолютных значений  $\rho$  и явление гистерезиса. Следует заметить – в условиях данного эксперимента понизились температуры критических точек и повысились значения их удельного электросопротивления. Результаты этого эксперимента свидетельствуют – основной причиной формирования неравновесных микронеоднородных кластеров является избыточная интерметаллидная  $\gamma'$ -фаза на основе  $Ni_3(Al, Ti)$ , ее выделение в твердой структуре при последующем нагреве вновь приводит к явлению гистерезиса политерм удельного электросопротивления, т.е. к формированию неравновесных кластеров и для перевода расплава в гомогенное микрооднородное состояние требуется новый нагрев до  $t_k$ .

Таким образом экспериментально установлен один из типов кластеров, составляющих расплав жаропрочных никелевых сплавов.

Экспериментально установлено - изменение содержания углерода, даже в пределах марочного состава, существенно влияет на общий вид политерм нагрева и на положение точек  $t_{ан}$  и  $t_k$ . Концентрация углерода в жаропрочных никелевых сплавах изменяется от нуля до 0,2 мас. %. В зависимости от этого морфологически можно выделить три вида политерм удельного электросопротивления, полученных

при нагреве (рис.6). Первый (рис. 6 а) характерен для сплавов со средним содержанием углерода, примерно (0,005...0,05) мас. %. Его отличительными особенностями являются величина участка  $t_{ан}-t_k$ , составляющая (50...200) °С, и относительно плавный характер изменения  $\rho$  на этом участке.

Политермы нагрева жаропрочных сплавов с повышенным содержанием углерода – более 0,05 мас. % (рис. 6 б) отличаются наличием высокотемпературного участка, верхняя граница которого обозначена как  $t_{к2}$ . Этот участок связан с распадом атомных комплексов, унаследованных из твердого состояния от карбидных фаз.

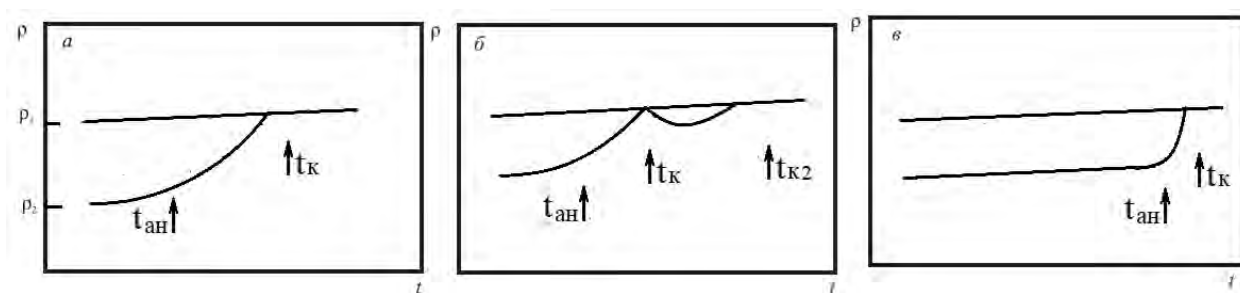


Рис. 6. Политермы удельного электросопротивления, характерные для жаропрочных никелевых сплавов

Пониженное содержание углерода до 0,005% в сплавах, либо его полное отсутствие дают третий вид политермы нагрева (рис.6 в). К характерным его особенностям политерм относятся: слабая зависимость  $\rho(t)$  в широком, порядка 400 °С, интервале температур от плавления до  $t_{ан}$ ; участок интенсивных превращений в расплаве располагается в области свыше 1700 °С и имеет узкий диапазон (менее 50 °С); угол наклона политермы нагрева на участке  $t_{ан}-t_k$  к температурной оси максимальный для всех исследованных сплавов.

Приведенные экспериментальные данные о влиянии углерода свидетельствуют – несмотря на незначительное его содержание в химических составах жаропрочных никелевых сплавов (до 0,2 мас. %), углерод, в отличие от любых других легирующих элементов, оказывает значительное влияние на морфологию политерм удельного электросопротивления и, соответственно, структуру и фазовые изменения расплавов ЖНС. Повышение содержания углерода существенно снижает тем-

пературный диапазон структурных изменений расплавов, увеличивает температурную разницу между началом и завершением структурных изменений расплавов ЖНС и приводит к возникновению еще одного высокотемпературного участка аномального изменения значений удельного электросопротивления, по-видимому, прямо связанного с разрушением карбидоподобных атомных ассоциаций МС.

Следует дополнить стехиометрический набор кластеров еще одной модификацией. Не полностью удаленный из расплава азот при кристаллизации участвует в образовании нитридных фаз. Чаще и больше всего эти фазы образуются в литниковых отходах, переплав которых серийной технологии не приводит к полному растворению частиц нитридов в расплаве. При кристаллизации твердый раствор не образует с частицами этих фаз прочных связей, что в итоге приводит к браку металлопродукции и главное – не дает возможности рационального использования собственных литейных отходов. Температура диссоциации частиц нитридных фаз находится выше температуры серийной выплавки жаропрочных никелевых сплавов. После перехода в жидкое состояние тугоплавкие частицы нитридов образуют собственный кластер со стехиометрией MN. В период структурных изменений появляется возможность освобождения атомов азота из неравновесных микрогруппировок, что значительно понижает его концентрацию в расплаве.

**В третьей главе** установлено влияние структурных состояний жаропрочного никелевого расплава на термокинетические закономерности кристаллизации, образования твердых структур и структурно-фазовую стабильность ЖНС.

Обнаружена взаимосвязь между температурными параметрами процесса приготовления никелевых расплавов и температурами фазовых превращений при кристаллизации (рис.7 и 8). Эксперименты проводились в установке типа ВДТА каждый раз, новый образец нагревался до определенного максимума, а затем в режиме охлаждения фиксировались температуры выделения структурных составляющих.

Повышение температуры нагрева расплавов жаропрочных никелевых сплавов приводит к увеличению их переохлаждения при кристаллизации. При этом уменьшается температура ликвидус, и сужается интервал кристаллизации.



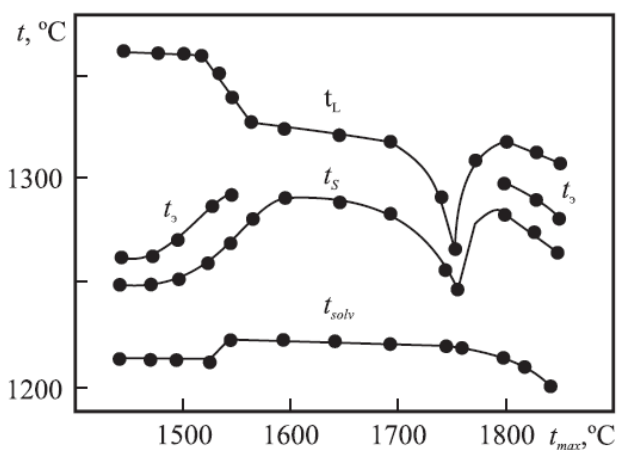


Рис.7. Влияние температуры максимального нагрева расплава на температуры фазовых превращений при кристаллизации сплава ЖС36.

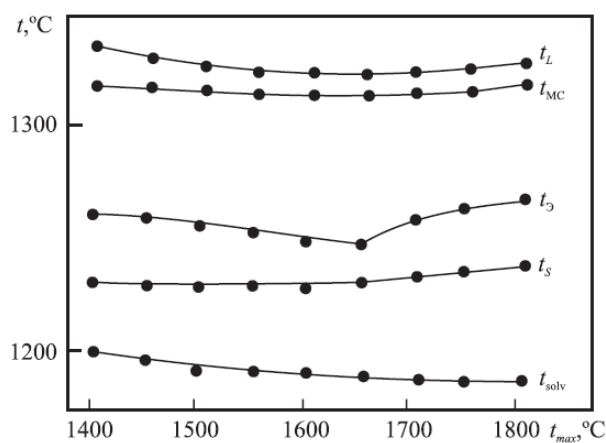


Рис.8. Влияние температуры максимального нагрева расплава на температуры фазовых превращений при кристаллизации сплава ЖС6У.

$t_{solv}$  — температура начала выделения  $\gamma'$ -фазы;  $t_S$  — температура солидус;  $t_{\gamma}$  — температура начала выделения эвтектики  $\gamma+\gamma'$ ;  $t_{MC}$  — температур начала выделения карбидов MC;  $t_L$  — температура ликвидус

Показано, что максимальное переохлаждение, наиболее низкая температура ликвидус и самый узкий интервал кристаллизации возникают при кристаллизации в том случае, если расплав нагревали до температур конца превращений в жидком состоянии. В этом случае происходит изменение размера атомных микрогруппировок до минимального, более равномерное перераспределение легирующих элементов т.е. достижение более равновесного состояния. Таким образом, перед началом кристаллизации структура расплава равновесна и микрооднородна, что влияет на ход процесса затвердевания и структуру формирующегося твердого сплава.

Повышается дисперсность дендритной структуры, увеличивается доля полиэдрических карбидов и основной упрочняющей  $\gamma'$ -вторичной фазы, снижается количество эвтектических фаз, уменьшается разброс по размерам избыточных фаз.

Как следствие, изменяются механические свойства. При этом повышение кратковременной прочности происходит на 10%, а пластичности и длительной жаропрочности в 2 раза.

Нагрев расплава значительно выше температур конца превращений приводит вновь к повышению температуры ликвидус, расширению интервала кристал-

лизации, понижению температуры начала выделения  $\gamma'$ -вторичной фазы, росту расстояния между вторичными осями дендритов, возрастанию доли эвтектической  $\gamma'$ -фазы и карбидов эвтектического происхождения, морфология карбидов вновь становится типа «китайских иероглифов».

Полученные данные свидетельствуют о том, что режим ВТОР не связан с беспредельным повышением температуры нагрева расплава, а имеет научно обоснованный температурный режим обработки, способствующий формированию благоприятной структуры и свойств литых изделий.

Поскольку изделия из жаропрочных никелевых сплавов эксплуатируются длительное время при повышенных температурах и растягивающих напряжениях, то необходимо сохранить первоначальный комплекс свойств и, соответственно, оптимальную структуру на как можно больший период времени, который определяет срок эксплуатации изделий. В период эксплуатации при рабочих температурах структура жаропрочных никелевых сплавов стремится к разупрочнению, а свойства к ухудшению. Идеальная морфология структуры в литом состоянии не гарантирует стабильность структурных и фазовых составляющих в процессе эксплуатации.

Структурно-фазовая стабильность жаропрочных никелевых сплавов — это их способность сохранять состояние равновесия (химического и фазового) под воздействиями внешних нагрузок (тепловых, механических, химических). Выход из равновесия — это начало развития диффузионных перемещений легирующих элементов между структурными (тело зерна, границы зерен, дендриты и междендритное пространство) и фазовыми (матрица и вторичные фазы) составляющими. В результате матрица и упрочняющие фазы обедняются легирующими элементами, ушедшими на образование охрупчивающих фаз, и разупрочненная структура становится причиной ухудшения служебных свойств. Происходит деградация структуры (рис.9–14).

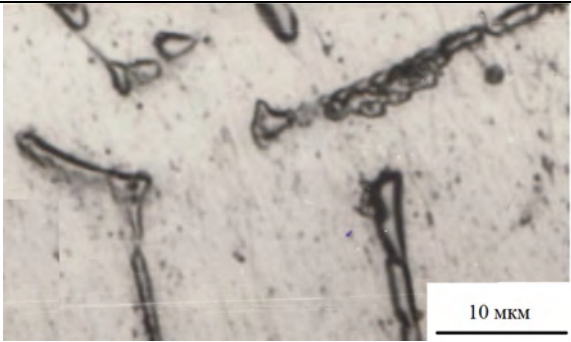
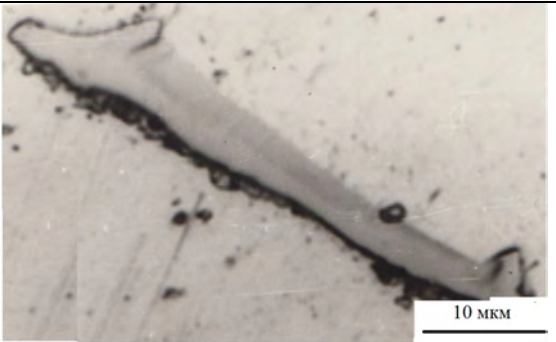
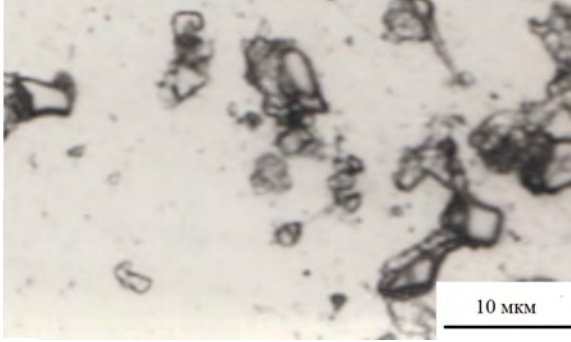
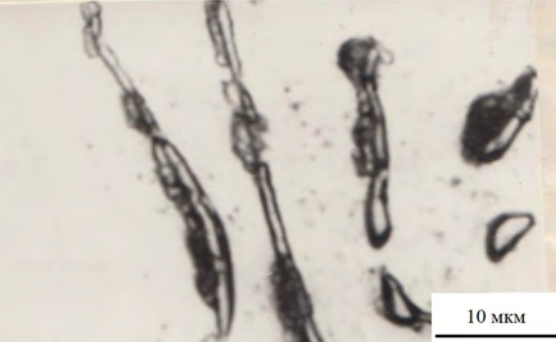
| Время,<br>ч | Выплавка с нагревом до 1600°C   | Выплавка с нагревом до 1750°C  |
|-------------|---|--|
| 25          |  |  |
| 100         |  |  |

Рис.9. Следы карбидных реакций в микроструктуре жаропрочного никелевого сплава ЭП539Л в период длительной (до 100 часов) изотермической выдержки при 820 °С.

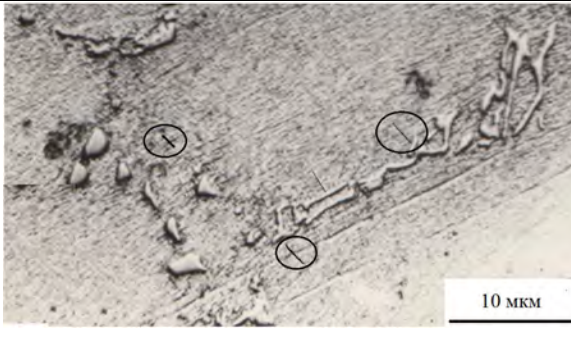
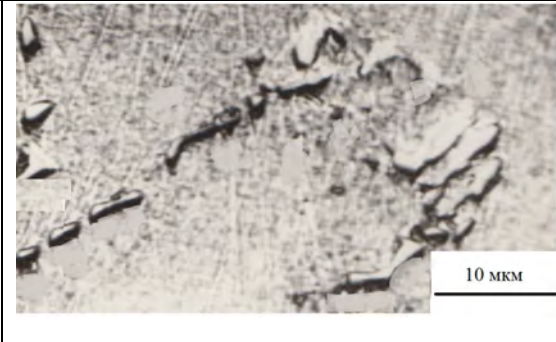


| Время,<br>ч | Выплавка с нагревом до 1600°C   | Выплавка с нагревом до 1750°C  |
|-------------|---|--|
| 50          |  |  |
| 100         |  |  |

Рис.10. Выделения ТПУ фаз (обведено черными овалами) в структуре сплава ЭП539Л в период длительных изотермических выдержек при 820°С.

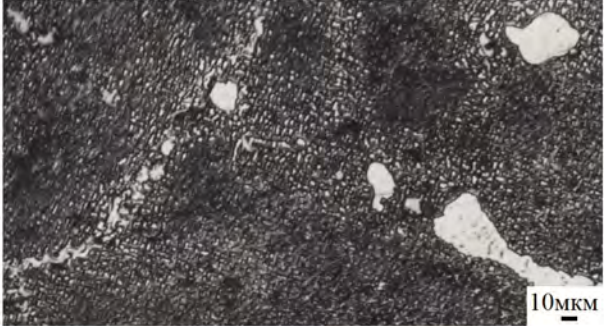







| Время, ч | Выплавка с нагревом до 1600°C   | Выплавка с нагревом до 1700°C  |
|----------|---|--|
| 2        |    |    |
| 300      |   |   |
| 400      |  |  |
| 500      |  |  |

Рис.11. Изменение структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, выплавленного по серийной технологии и с применением ВТОР, в период длительных изотермических выдержек при температуре 950°C.  
(Выделение ТПУ фаз обведены белым овалом)

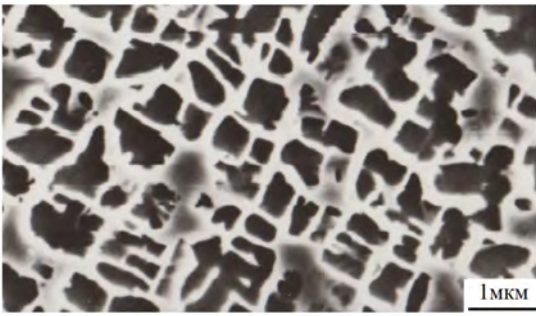
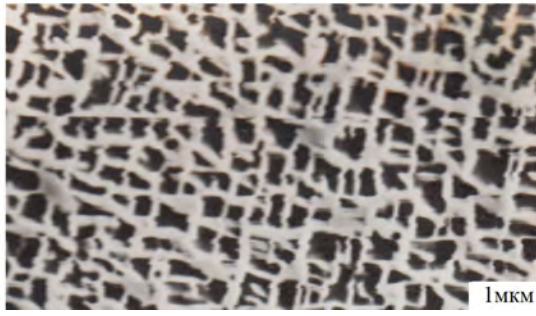
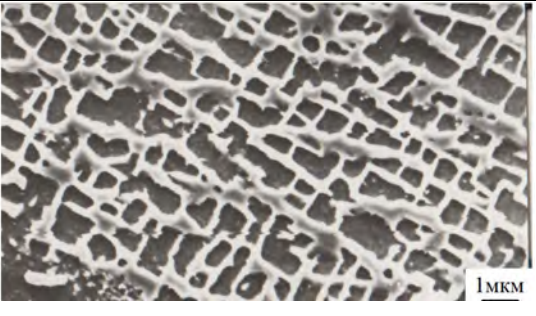

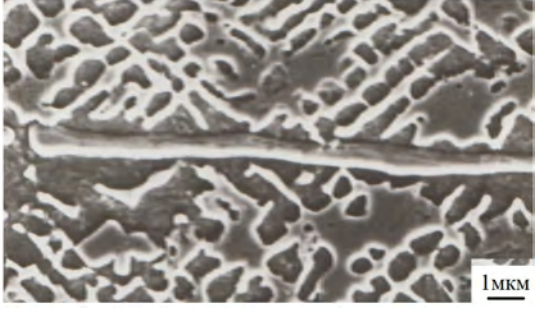





| Время,<br>ч | Выплавка с нагревом до 1600°C   | Выплавка с нагревом до 1700°C  |
|-------------|---|--|
| 0           |    |    |
| 200         |    |    |
| 300         |   |   |
| 400         |  |  |
| 500         |  |  |

Рис.12. Изменение морфологии выделений вторичной  $\gamma'$ -фазы в структуре жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, выплавленного по серийной технологии и с применением ВТОР в период длительных изотермических выдержек при температуре 950°C.



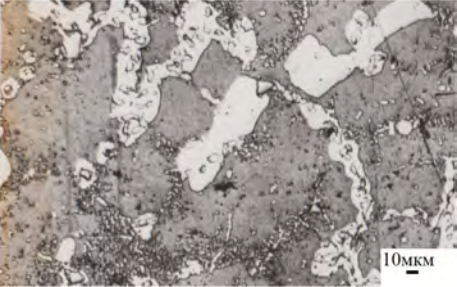

| Время, ч | Выплавка с нагревом до 1600°C   | Выплавка с нагревом до 1700°C  |
|----------|---|--|
| 2        |  |  |
| 100      |  |  |

Рис.13. Изменение структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, выплавленного по серийной технологии и с применением ВТОР, в период длительных изотермических выдержек при температуре 1150°C.

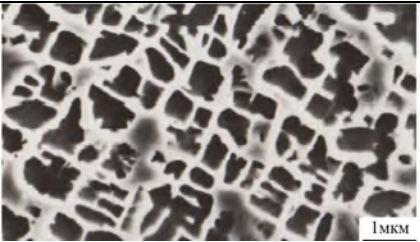

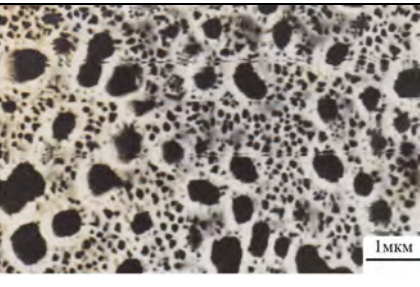


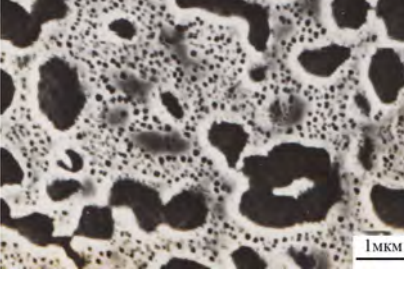
| Время, ч | Выплавка с нагревом до 1600°C   | Выплавка с нагревом до 1700°C  |
|----------|---|--|
| 0        |  |  |
| 50       |  |  |
| 100      |  |  |

Рис.14. Изменение морфологии выделений вторичной  $\gamma'$ -фазы в структуре жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, выплавленного по серийной технологии и с применением ВТОР в период длительных изотермических выдержек при температуре 1150°C.

Результаты исследований образцов жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У и ЭП539Л, претерпевших длительные изотермические выдержки (старение) при температурах эксплуатации позволяют сформулировать общие закономерности изменения структуры и свойств, исследуемых жаропрочных никелевых сплавов в период длительных изотермических выдержек при температурах эксплуатации. В течении длительных изотермических выдержек кубовидные частицы  $\gamma'$ - фазы коагулируют, отдельные частицы объединяются, блоки укрупняются; значительно понижается упрочнение за счет интерметаллидной вторичной  $\gamma'$ - фазы. При выдержках свыше 1100°C количество  $\gamma'$  фазы заметно снижается; выделения карбидных, карбоборидных и карбонитридных эвтектик уменьшаются в размерах и заменяются множеством округлых частиц; изолированные МС карбиды стабильнее шрифтовых, но с увеличением времени эксплуатации они вступают в реакцию с никелевой матрицей, в результате чего выделяются карбиды  $M_6C$  и  $M_{23}C_6$ . а также тетрагонально плотноупакованные фазы, типа  $\sigma$ -фазы. Эти новые выделения имеют пластинчатую морфологию и не вносят вклад в дисперсионное упрочнение, при этом снижают пластичность сплавов.

Нагрев жидких жаропрочных никелевых сплавов до температур завершения структурных изменений расплава, способствует более равномерному распределению легирующих элементов по всему объему, наибольшей степени переохлаждения, сокращению температурного диапазона кристаллизации, формированию оптимальной кристаллической структуры, обладающей повышенной структурно-фазовой стабильностью.

В отличие от образцов, выплавленных по традиционной технологии в опытном металле, выплавленном с применением ВТОР в период длительных изотермических выдержек происходят все те же самые процессы, но с отставанием от серийного металла на (100...200) часов. Таким образом, качественная оценка свидетельствует о возросшей структурно-фазовой стабильности.

**В четвертой главе** обоснована технологическая целесообразность применения высокотемпературной обработки расплава жаропрочных никелевых сплавов.

Комплексные исследования структурных изменений расплавов жаропрочных никелевых сплавов, а также изучение взаимосвязи жидкого и твердого состояния позволяют определить параметры для высокотемпературной обработки расплавов на основе никеля, как производственной технологии выплавки. Изначально целью разработки и внедрения новых режимов выплавки являлось повышение жаропрочности никелевых сплавов, но анализ результатов применения высокотемпературной обработки жидких жаропрочных никелевых сплавов позволил обобщить производственный опыт.

Основные причины назначения ВТОР при производстве металлопродукции:

– получение максимальных значений служебных свойств за счет создания наиболее благоприятных структурных характеристик: измельчение дендритной структуры; улучшение морфологии карбидных, боридных и нитридных выделений; снижение количества выделений неблагоприятных эвтектик; повышение дисперсности и объемной плотности основной упрочняющей вторичной  $\gamma'$ -фазы, повышение ее когерентной связи с матрицей и равномерное ее распределение по объему изделия; снижение количества неблагоприятных ТПУ фаз; повышение структурно-фазовой стабильности сплавов. Оптимизация структуры обеспечивает улучшение служебных характеристик металлопродукции: кратковременные прочностные характеристики на (10...25)%, пластичность в (2...3) раза, ударную вязкость в (1,5...3) раза, предел длительной прочности на (10...20)%; увеличение ресурса эксплуатации изделий на (30...50)%;

– многократное и успешное вторичное использование ликвидного (отходы собственного производства) и не ликвидного (отработанные детали машин и механизмов) возврата благодаря снижению количества неметаллических включений и газов с целью экономии дефицитных и дорогостоящих легирующих элементов;



– снижение металлургического брака: количества и размеров литейных пор, ликвации легирующих элементов, образования трещин в отливках; повышение совершенства монокристалльной структуры. В результате увеличение выхода годного на (15...20)%;

– повышение технологических свойств жидкого металла: увеличение переохлаждения и уменьшение интервала кристаллизации;

– повышение технологических свойств твердого металла -высокотемпературная обработка расплава приводит к возрастанию плотности, удельного электро-сопротивления, температуро- и теплопроводности твердого металла, что способствует повышению долговечности металлопродукции при температурах эксплуатации; изменение характера ликвации легирующих элементов и очистки межфазных границ от примесей в отливках сокращает продолжительность высокотемпературной гомогенизации при термообработке;

Основные достижения, полученные за счет применения высокотемпературной обработки расплавов жаропрочных никелевых сплавов, заключаются в следующем:

– для деформируемых сплавов – повышение пластичности за счет сокращения литейных дефектов;

– для монокристаллического литья – снижение разориентации дендритных блоков, т.е. совершенствование монокристаллических параметров структуры;

– для поликристаллических отливок – существенное измельчение зерна и, соответственно увеличение количества зерен и длины межзеренных границ;

– для гранулируемых сплавов – увеличение выхода порошка используемой фракции; изменение морфологии частиц порошка со столбчатой на мелкокристаллическую; повышение однородности частиц порошка; предотвращение образования частиц из не расплавившихся фрагментов дендритов и налипание частиц друг на друга; неизменность микротвердости частиц порошка в зависимости от их размера; улучшение служебных характеристик порошка и снижение брака металлопродукции.

**В пятой главе** показано, что высокотемпературная обработка расплава жаропрочных никелевых сплавов способствует достижению максимальных значений жаропрочности и структурно-фазовой стабильности металлопродукции из сплавов данного состава.

С целью получения этой информации создана база данных по влиянию 350 химических составов сплавов на основе никеля, выплавленных по серийной технологии, на их жаропрочность. Известные значения жаропрочности заносятся в базу из открытых источников. Неизвестные определялись моделированием.

Жаропрочность никелевых сплавов оценивается пределом прочности на разрыв, в условиях длительной изотермической выдержки в интервале (100...10000) часов, при определенной температуре в диапазоне (400...1150)°С. Всего может быть назначено порядка 50 различных режимов, но на практике для испытаний используется от 1 до 15 и отсутствующие данные промышленных испытаний не дают полной возможности сравнения свойств всех сплавов. Современные информационные технологии предоставляют возможность использовать имеющиеся данные для расчета недостающих. Для этого на основе методов статистического анализа и искусственных нейронных сетей разработана и применена специальная вычислительная методика, определяющая закономерности между плавленными составами и известными свойствами, а также учитывающая роль каждого легирующего элемента и влияние технологии изготовления на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии.

Для моделирования изменения свойств сплавов на основе никеля применена глубокая неполносвязная искусственная нейронная сеть прямого распространения с байесовской регуляризацией. Сеть реализована в среде MatLab. Обучение сети проводилось по алгоритму обратного распространения ошибки, который был дополнен бутстрэп-алгоритмом, предотвращающим переобучение.

Для повышения точности предсказаний предложена методика подготовки данных. Содержание легирующих элементов переведено в формат отношения количества их атомов на сто атомов никеля – т.н. нормализация к концентрации ни-

келя. Температурно-временные режимы испытаний аппроксимированы комплексным параметром Ларсона-Миллера ( $P_{LM}$ ). Примененные преобразования понизили погрешность вычислений до 15%, что соизмеримо с точностью экспериментального определения предела длительной прочности, что свидетельствует об адекватности модели.

С целью подтверждения точности моделирования подготовлена группа плавочных составов жаропрочных никелевых сплавов с максимальным числом результатов механических испытаний на предел длительной прочности. Параметры этих сплавов не использовались в тренировке нейронной сети. После подготовки и обучения искусственных нейронных сетей ИНС произведен расчет жаропрочности этой группы сплавов по плавочным химическим составам и произведено сравнение полученных результатов с заранее известными экспериментальными. В результате получено определенное совпадение экспериментальных и расчетных данных, что подтверждает точность примененной модели.

Разработана и реализована математическая компьютерная модель влияния параметров испытания на изменение предела длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов. Методом ИНС с использованием имеющихся результатов физических испытаний смоделированы недостающие значения пределов длительной прочности, что позволило для каждого плавочного состава получить зависимости  $\sigma=f(P_{LM})$  (рис.15). Результаты моделирования являются справочными и могут представлять интерес для разработчиков жаропрочных никелевых сплавов и конструкторов специальной техники.

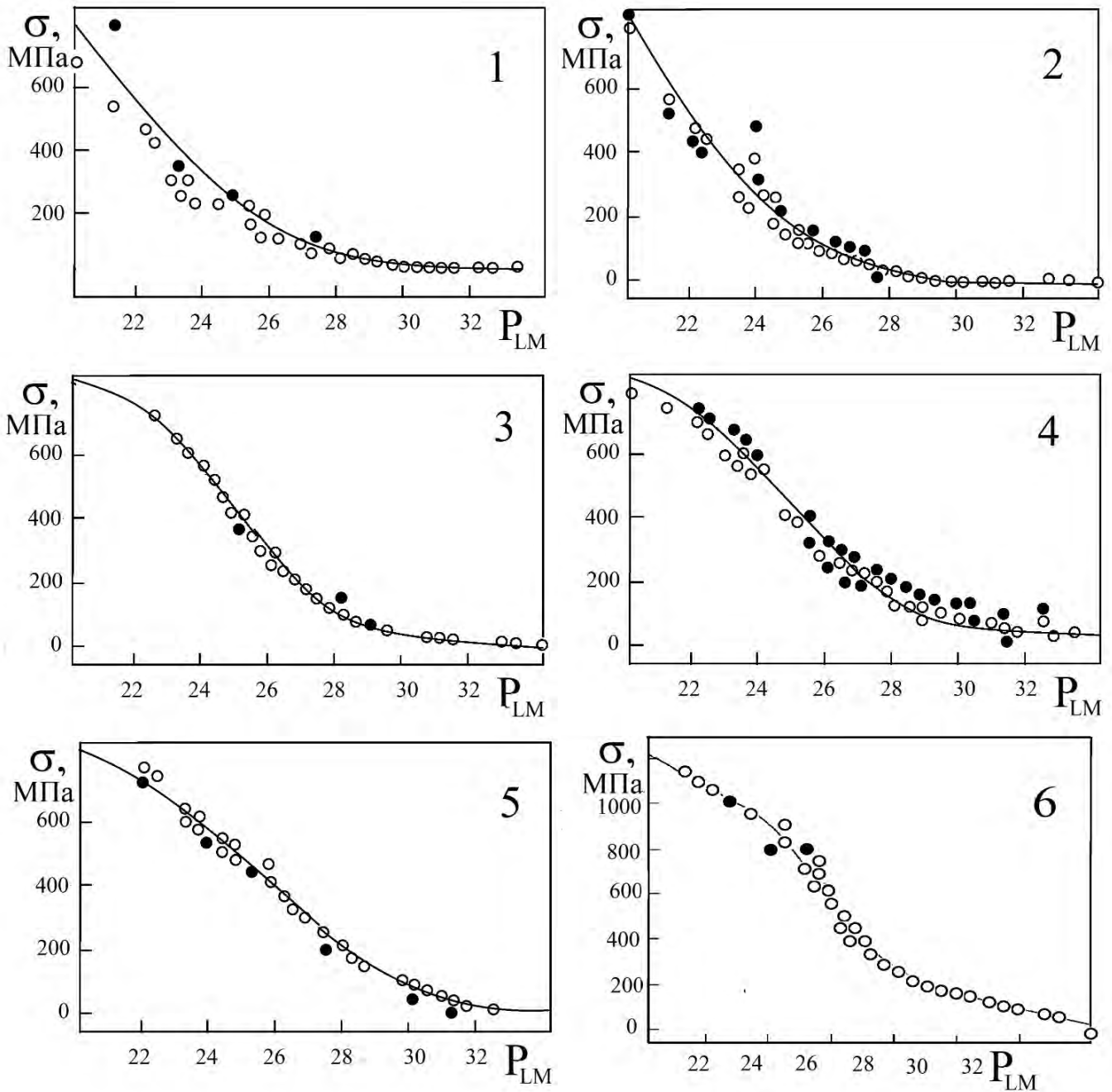


Рис.15. Зависимости предела прочности на разрыв от параметра Ларсона-Миллера некоторых жаропрочных никелевых сплавов. Светлые маркеры – значения, предсказанные ИНС, темные маркеры – экспериментальные значения. Сплошная линия – модельная зависимость.

Цифры у графиков – марка сплава

1 – ВЖЛ8; 2 – Inconel 700; 3 – ВЖЛ 20; 4 – ЖС6Ф; 5 – ТМС 75; 6 – ВЖМ 6

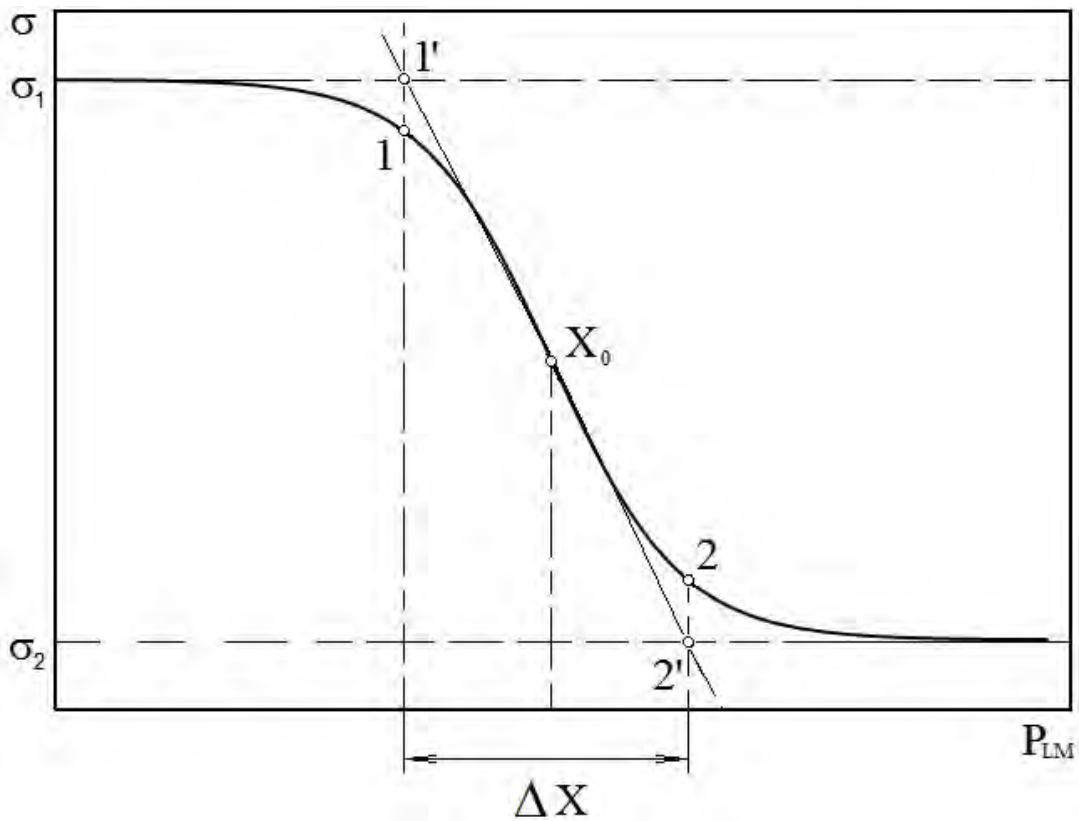


Рис.16. Обобщенный вид зависимости предела длительной прочности от параметра Ларсона-Миллера, характерный для всех изученных сплавов на основе никеля

Морфология зависимостей  $\sigma=f(P_{LM})$  имеет сигма-образный вид, характерный для большинства жаропрочных никелевых сплавов (рис.16). Такое изменение предела прочности на разрыв объясняется процессами разупрочнения структуры. Изменение динамики структурной деградации сплавов на кривой зависимости  $\sigma=f(P_{LM})$ , отмечено как 1 и 2. Координаты этих границ структурных изменений индивидуальны для каждого состава сплава. Наиболее интересен средний участок, поскольку именно его наклон к оси абсцисс, а также координаты точки 2, отражают структурно-фазовую стабильность сплава.

Зависимость жаропрочности от температурно-временных параметров испытаний  $\sigma=f(P_{LM})$  описывается следующим аналитическим выражением:

$$\sigma(x) = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + \exp\left(\frac{x - x_0}{p}\right)},$$

а для вычисления коэффициента изменения структурной деградации предложено следующее выражение

$$p = \frac{\Delta x}{4}$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $x_0$  и  $\Delta x$  параметры, устанавливаемые в ходе аппроксимации зависимости  $\sigma=f(P_{LM})$  для конкретного состава сплава. Данные аналитические функции могут применяться для расчетов жаропрочности и фазовой стабильности без применения метода ИНС.

Предложенный метод может успешно использоваться для предсказания значений длительного предела прочности жаропрочного никелевого сплава и его структурной стабильности по заданному химическому составу с различным содержанием следующих химических элементов: C, Cr, Co, Mo, W, Al, Ti, Nb, V, Fe, Y, Zr, Ta, Re, Ru, Ni, V, Ce, La, Si, Mn, Mg, Hf, Cu, Bi, Pb, Ir. Использование других элементов предусматривает получение новой модели аналогичным способом.

Разработан новый метод определения структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов PS (Phase Stability), сочетающий в себе зависимость динамики деградации структуры и точку привязки этой динамики к наиболее характерному значению в терминах параметра Ларсона-Миллера, описываемый выражением:

$$PS=p \cdot \sigma(30),$$

где  $\sigma(30)$  – значение предела длительной прочности при  $P_{LM}=30$ .

Показано, что температура полного растворения  $\gamma'$ -фазы, которая традиционно использовалась для численной оценки структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов первого поколения, не может корректно применяться для сплавов, легированных рением и рутением. Сравнение классического и вновь предложенного методов оценки структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов свидетельствует о их частичной корреляции. Совпадение оценки обоих методов фиксируется у сплавов первого поколения. Усложнение химического состава жаропрочных никелевых сплавов элементами, подавляющими диффузионные процессы, не приводит к значительному повышению температуры полного растворения  $\gamma'$ -фазы, но существенно улучшает структурную стабиль-

ность, что отлично отражает параметр PS. Таким образом, предложенная новая методика более адекватна при оценке структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов.

Сопоставление предела длительной прочности и параметра структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов по диаграммам в координатах  $\sigma_{1000}^{1000}$  – PS позволило ранжировать сплавы по распределению их основных свойств (рис.17).

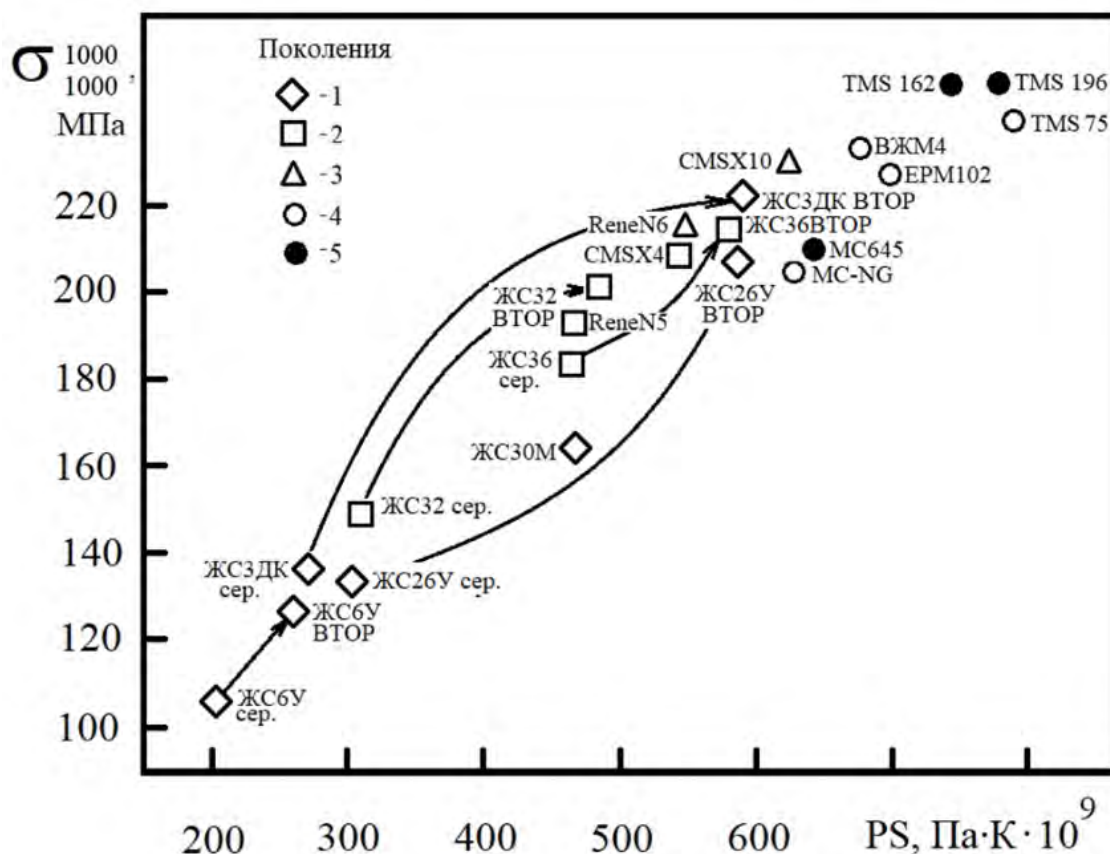


Рис.17. Влияние высокотемпературной обработки расплавов, исследованных жаропрочных никелевых сплавов на их жаропрочность и структурно-фазовую стабильность.

Анализ диаграммы сравнения жаропрочных никелевых сплавов позволяет заключить - применение высокотемпературной обработки расплава к жаропрочным никелевым сплавам позволяет получить изделия с максимальными значениями жаропрочности и структурно-фазовой стабильности.

## Основные выводы

1. Построена математическая модель структурных изменений в неравновесных расплавах на основе никеля при нагреве и изотермической выдержке.
2. Установлено, нагрев метастабильных жаропрочных расплавов никелевых сплавов до определенных температур или изотермическая выдержка необратимо приводят к фазовому переходу второго рода, сопровождающемуся уменьшением размеров атомных кластеров до нескольких межатомных расстояний ( $\sim 0,5$  нм).
3. Зафиксировано, что основной вклад в нестабильность металлической жидкости на основе никеля вносят выделения вторых фаз в исходном твердом состоянии. Образующиеся при расплавлении кластеры, имеют структуру, наследуемую от интерметаллидов, карбидов и нитридов.
4. Установлены термокинетические закономерности кристаллизации жаропрочных никелевых сплавов и влияния на них структурных состояний расплава.
5. Показано, что наименьший температурный интервал кристаллизации, и, соответственно, наибольшая степень переохлаждения жаропрочного никелевого расплава перед кристаллизацией фиксируются при его нагреве до температуры завершения структурных изменений. Дальнейший перегрев ухудшает эти параметры.
6. На основании анализа причин и результатов использования обоснована целесообразность применения высокотемпературной обработки расплава жаропрочных никелевых сплавов в условиях промышленного производства.
7. Создана электронная база данных химических составов и соответствующих им пределов длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов и разработаны методы предварительной математической обработки данных базы для повышения точности прогнозирования влияния химических составов на жаропрочность.
8. Разработана и реализована математическая компьютерная модель влияния температурно-временных параметров испытаний на предел длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов.



9. Разработан новый метод определения структурно-фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов, основанный на построении параметрических кривых изменения жаропрочности от показателя Ларсена-Миллера в зависимости от химического состава сплава.

10. Показано, что высокотемпературная обработка расплава позволяет получить металлопродукцию с максимальной структурно-фазовой стабильностью и, соответственно, с максимальной жаропрочностью, достижимой для сплавов на основе никеля данного состава.

### Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Tyagunov A.G.** Thermal stability of the structure of a high-temperature nickel alloy fabricated by two different technologies / **Tyagunov A.G.**, Baryshev E.E., Kostina T.K., Semenova I.P., Lesnikov V.P. // Metal Science and Heat Treatment. 1999. Vol. 41. № 11-12. Pp. 538-541. (0,4 п.л. / 0,02 п.л.)

2. Тягунов Г.В. Измерение удельного электрического сопротивления методом вращающегося магнитного поля / Тягунов Г.В., Баум Б.А., Цепелев В.С., **Тягунов А.Г.**, Влох А.Н. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. №2. С.36. (0,12 п.л. / 0,02 п.л.).

3. **Тягунов А.Г.** Исследование взаимосвязи структуры и свойств сплава In 718 в жидком и твердом состояниях / **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Тягунов Г.В. // Электрометаллургия. 2010. №5. С.18-21. (0,12 п.л. / 0,04 п.л.).

4. Тягунов Г.В. Эффективная технология производства жаропрочных сплавов ЭП220 и ЭП929 с использованием высокотемпературной обработки расплава / Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Михайлов В.Б., **Тягунов А.Г.** // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. №9. С.26-29. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

Tyagunov G.V. Production of heat resistant EP220 and EP929 alloys by high-temperature treatment of melt / Tyagunov G.V., Baryshev E.E., Mikhailov V.B., **Тягунов А.Г.** // Steel in Transactions. 2013.Vol.43. №9. Pp.557-560. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus).

5. **Тягунов А.Г.** Влияние состояния расплава на структуру жаропрочных сплавов типа ЦНК / **Тягунов А.Г.** // Вестник Южноуральского гос университета. Серия Metallurgy. 2013. Т.13. №1. С.79-85. (0,5 п.л. / 0,5 п.л.).

6. Костина Т.К. Разработка режимов высокотемпературной обработки жидких жаропрочных никелевых сплавов на основе экспериментальных и расчетных показателей / Костина Т.К., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., **Тягунов А.Г.** // Вестник Южноуральского гос. университета. Серия "Metallurgy". 2013. Т.13. №1. С.74-79. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Вьюхин В.В. Оптимизация технологических режимов получения порошка жаропрочного сплава ЭП962П / Вьюхин В.В., Барышев Е.Е., Акшинцев Ю.Н., Тягунов Г.В., **Тягунов А.Г.**, Костина Т.К. // Вестник Южноуральского гос университета. Серия "Metallurgy". 2014. Т.14. №2. С.15-20. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.)

8. Вьюхин В.В. Повышение качества сплава ЭП902 на основе изучения свойств в жидком и твердом состояниях / Вьюхин В.В., Барышев Е.Е., Костина Т.К., Колотухин Э.В., **Тягунов А.Г.** // Электротехнология. 2014. №5. С.31-34. (0,2 п.л. / 0,04 п.л.).

9. **Тягунов А.Г.** Влияние алюминия на электросопротивление никель-алюминиевых сплавов / **Тягунов А.Г.**, Вьюхин В.В., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Савин О.В. // Вестник ЮрГУ. Серия "Metallurgy". 2015. Т.15. №4. С.51-56. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.).

10. **Тягунов А.Г.** Влияние микролегирования и температуры выплавки на свойства сплавов ЧС70 и ЧС88 в жидком и твердом состояниях / **Тягунов А.Г.**, Вьюхин В.В., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Костина Т.К. // Электротехнология. 2015. № 6. С. 15-19. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

11. **Тягунов А.Г.** Влияние внепечной обработки расплава на свойства жаропрочного никелевого сплава ЭП602 / **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Шмакова К.Ю. // *Электротехнология*. 2016. № 11. С. 9-12. (0,19 п.л. / 0,04 п.л.).

12. **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Шмакова К.Ю. Оптимизация температурного режима получения волокон из жаропрочного сплава ЭП741НП / **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Шмакова К.Ю. // *Электротехнология*. 2016. № 7. С. 3-8. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

13. Тягунов Г.В. О структуре и свойствах некоторых жаропрочных никелевых сплавов / Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., **Тягунов А.Г.**, Вандышева И.В., Зайцева Н.А., Мушников В.С. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: *Металлургия*. 2016. №2. С.57-70. (0,9 п.л. / 0,1 п.л.).

14. **Тягунов А.Г.** Структурные изменения расплавов жаропрочных никелевых сплавов / **Тягунов А.Г.** // *Вестник ЮрГУ*. Серия «*Металлургия*». 2016. Т.16. №4. С.16-22. (0,5 п.л./ 0,5 п.л.).

15. **Тягунов А.Г.** Влияние концентрации хрома на процесс структурообразования жидких хромоникелевых сплавов / **Тягунов А.Г.**, Вьюхин В.В., Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Акшенцев Ю.Н. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 8. С. 565-570. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

16. **Tyagunov A.** Investigation of electrical resistivity of Ni-Cr-Al alloys in liquid and solid state / **Tyagunov A.**, Baryshev E., Tyagunov G., Vuykhin V., Mushnikov V., Shmakova K. // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering. International Conference on Innovative Research — ICIR EUROINVENT 2017*. 2017. Vol. 209(1):012009. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus, WOS).

17. **Tyagunov A.G.** Effect of Secondary Melt Refining on the Properties of an EP602 Nickel Superalloy / **Tyagunov A.G.**, Baryshev E.E., Tyagunov G.V. // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. №12. Pp.999-1001. (0,19 п.л. / 0,06 п.л.) (Scopus, WOS).

18. **Tyagunov A.** The influence on niobium and titanium on electrical resistivity in liquid state and solidification of IN718 alloy / **Tyagunov A.**, Baryshev E., Tyagunov G., Shmakova K., Tsepelev V. // *Acta Metallurgica Slovaca* 2017. Vol.23. №1. Pp.79-86. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus).

19. **A.G. Tyagunov**. Polytherms of the Physical Properties of Metallic Melts / **A.G. Tyagunov**, E.E. Baryshev, G.V. Tyagunov, V.S. Mushnikov, and V.S. Tsepelev. // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. № 4. Pp.250–256. (0,7 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus).

**Тягунов А.Г.** Политермы физических свойств металлических расплавов / **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Мушников В.С., Цепелев В.С. // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. №4 С.310-317. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

20. Барышев Е.Е. Систематизация политерм физических свойств металлических расплавов / Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Мушников В.С., Цепелев В.С., **Тягунов А.Г.** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 4. С. 310-317.

21. **Тягунов А.Г.** Влияние переплавов на свойства жаропрочного сплава в жидком состоянии / **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Мушников В.С. // Цветные металлы. 2018. № 4. С.73-78. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

22. Тягунов Г.В. О некоторых особенностях структурирования металлических жидкостей / Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., **Тягунов А.Г.**, Мушников В.С., Костина Т.К. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2018. Т.18. № 3. С.16-25. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.)

23. **Tyagunov A.** Influence of Alloying on the Thermal Stability of Model Heat Resistant Compositions / **Tyagunov A.**, Baryshev E., Tyagunov G., Shmakova K. //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. Vol.374. №1. 012006. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus, WOS).

24. **Tyagunov A.G.** High-Temperature Melt Treatment in the Production of Heat-Resistant Alloys with a High Content of Foundry Wastes / **Tyagunov A.G.**, Baryshev E.E., Tyagunov G.V., Kostina T.K., Shmakova, K.Y. // Steel in Translation. 2019. Vol.49. №3. Pp.163-167. (0,3 п.л. / 0,06 п.л.), (Scopus).

25. **Тягунов А.Г.** Структура и свойства Ni-Al сплавов в жидком состоянии / **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Шмакова К.Ю., Мушников В.С. // Расплавы. 2019. № 1. С.24-28. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

26. **Andrey Tyagunov**. Deep Learning in Simulation of Nickel-based Superalloys Ultimate Tensile Strength: Accounting the Role of Alloying Elements / **Andrey Tyagunov**, Oleg Milder, Dmitry Tarasov // Wseas transactions on environment and development. Vol.15. 2019. P.340-345. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus).

27. Tarasov D. The melt heat treatment and the structural changes in zhs6u and inconel 718 / Tarasov D., **Tyagunov A.**, Milder O. // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 5. Сер. "5th International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering, ICMAA 2021." 2021. Vol.1888. №1. 012005. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus, WOS).

28. **Tyagunov A.** Detection of the liquid-liquid transitions in superalloys melts upon overheating and relaxation by the electromagnetic method / **Tyagunov A.**, Milder O., Tarasov D., Tyagunov G. // Journal of Applied Physics. 2021. Т.129. № 1. 015107. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.). (Scopus).

29. **Tyagunov A.** LLT structural changes in metal liquids as a basis for a thermal treatment technology of melts: a review / **Tyagunov A.**, Milder O., Tarasov D., Tyagunov G. // Phase Transitions. 2021. Vol.94. № 1. Pp.1-22. (0,9 п.л. / 0,2 п.л.), (Scopus, WOS).

30. Тарасов Д.А. Точная эмпирическая формула определения плотности жаропрочных никелевых сплавов / Тарасов Д.А., Мильдер О.Б., **Тягунов А.Г.** // Письма о материалах. 2021. Т.11. № 2 (42). С.192-197. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

31. **Тягунов А.Г.** Метод оценки структурной стабильности жаропрочных никелевых сплавов на основе определения параметра фазовой стабильности  $p_s$  / **Тягунов А.Г.**, Тарасов Д.А., Мильдер О.Б., Савин Г.О. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 2 (800). С. 49-52. (0,19 п.л. / 0,05 п.л.)

32. Dmitry A. Tarasov. Modeling the influence of the composition of refractory elements on the heat resistance of nickel alloys by a deep learning artificial neural network / Dmitry A. Tarasov, Oleg B. Milder, **Andrei G. Tiagunov** // Mathematical method in the applied science. October 2022. Vol.45. №15. Pp.8809-8818. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.), (Scopus, WOS).

33. Tarasov D. Simulation of the nickel superalloys solvus temperature by the deep learning artificial neural network with differential layer / Tarasov D., **Tyagunov A.**,

Milder O. // November 2022 AIP Conference Proceedings 2611(1):130008. (0,3 п.л. / 0,06 п.л.), (Scopus).

34. Tarasov D. Deep Learning in Superalloys Rupture Strength Simulation: Combining Different Test Results / Tarasov D., **Tyagunov A.**, Milder O. // AIP Conference Proceedings. April. 2022. AIP Conference Proceedings 2425(1):130016 (0,4 п.л. / 0,02 п.л.), (Scopus).

35. Tarasov D. Data engineering, framework selection, and individual element contribution consideration in the alloy properties modeling by an artificial neural network / Tarasov D., **Tyagunov A.**, Milder O. // April 2022 AIP Conference Proceedings 2425(1):130018. (0,3 п.л. / 0,06 п.л.), (Scopus).

36. Dmitry Tarasov. BRANN forecast of super-alloy tensile strength versus Larson–Miller parameter relation and its approximation by a sigmoidal function / Dmitry Tarasov, **Andrey Tyagunov**, Oleg Milder // Mathematical Methods in the Applied Sciences. 2023. Vol.46(16). Pp.16401-16414 (0,9 п.л. / 0,2 п.л.), (Scopus, WOS).

37. Мильдер О.Б. Структурные изменения расплава жаропрочного никелевого сплава как фазовый переход второго рода / Мильдер О.Б., Тарасов Д.А., Тягунов А.Г., Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Левонян А.Л. // Известия вузов. Черная металлургия. 2023. Т.66. №5. Pp.564–570. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

### **Патенты**

38. Поводатор А.М. Способ для бесконтактного измерения электрического сопротивления металлического твердого образца или его расплава методом вращающегося магнитного поля и устройство для его осуществления / Поводатор А.М., Вьюхин В.В., Цепелев В.С., **Тягунов А.Г.** // Патент на изобретение RU 2299425 С1, 20.05.2007. Заявка № 2005138259/28 от 08.12.2005.

39. Тягунов Г.В. Способ оценки равновесия металлических расплавов / Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М., Барышев Е.Е., Вьюхин В.В., **Тягунов А.Г.**, Мушников В.С. // Патент РФ № 157157 от 20.11.2015. Бюл. № 32.

40. Тягунов Г.В. Устройство для определения интенсивности структурной перестройки расплавов жаропрочных сплавов / Тягунов Г.В., Цепелев В.С., **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Поводатор А.М., Вьюхин В.В. // Патент на полезную модель RU 157157 U1, 20.11.2015. Заявка № 2015119045/28 от 20.05.2015. Бюл. № 32.

41. Тягунов Г.В. Способ определения интенсивности структурной перестройки расплавов жаропрочных сплавов / Тягунов Г.В., Цепелев В.С., **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Поводатор А.М., Вьюхин В.В. // Патент на изобретение RU 2583343 C1, 10.05.2016. Заявка № 2015111868/28 от 01.04.2015.

42. Тягунов Г.В. Устройство оценки равновесности металлических расплавов / Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М., Барышев Е.Е., Вьюхин В.В., **Тягунов А.Г.**, Мушников В.С. // Патент на полезную модель RU 182131 U1, 03.08.2018. Заявка № 2017146061 от 26.12.2017.

43. Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М., Барышев Е.Е., Вьюхин В.В., **Тягунов А.Г.**, Мушников В.С. Способ оценки равновесности металлических расплавов / Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М., Барышев Е.Е., Вьюхин В.В., Тягунов А.Г., Мушников В.С. // Патент на изобретение RU 2680984 C1, 01.03.2019. Заявка № 2017146126 от 26.12.2017.

### **Монографии**

44. **Тягунов А.Г.** Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии / **Тягунов А.Г.**, Барышев Е.Е., Степанова Н.Н. // НИСО УрОРАН 2010. №2(10)-21. 198с. (15 п.л. / 5 п.л.)

45. Тягунов Г.В. Металлические жидкости. Стали и сплавы: монография. / Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Цепелев В.С., Костина Т.К., Третьякова Е.Е., Колотухин Э.В., **Тягунов А.Г.**, Акшенцев Ю.Н., Павлинич С.П., Попель П.С., Конашков В.В., Вьюхин В.В., Савин О.В., Вандышева И.В., Шмакова К.Ю., Тягунов Г.В. Зайцева Н.А. // Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина". 2016. 268с. (16 п.л. / 1 п.л.).

### **Другие публикации:**

46. Барышев Е.Е. Влияние обработки расплава на процесс кристаллизации и структуру литейного жаропрочного сплава с различным содержанием углерода / Барышев Е.Е., Баум Б.А., Тягунов Г.В., **Тягунов А.Г.**, Савин О.В., Савина Л.Г., Колотухин Э.В. // Процессы литья. 1999. №1. С. 8-12. (0,4 п.л. / 0,06 п.л.).

47. Тягунов Г.В. О структуре жаропрочных никелевых сплавов / Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., **Тягунов А.Г.**, Вандышева И.В., Зайцева Н.А., Мушников В.С. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т.20. №2. С.57–70. (0,8 п.л. / 0,1 п.л.).