

## О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, профессора Кулешовой Евгении Анатольевны на диссертационную работу Тягунова Андрея Геннадьевича "Влияние структурного состояния жаропрочных никелевых расплавов на технологические параметры производства, структурно-фазовую стабильность и функциональные свойства изделий", представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

### **Актуальность темы диссертации**

В современной металлургии, по мере углубления сведений о структуре, свойствах и качестве в твёрдом состоянии, всё большее внимание уделяется предшествующей ему в технологической цепи производства жидкой фазе. Вновь создаваемые промышленные процессы и технологические режимы предусматривают усиление комплекса тепловых, механических, химических и других воздействий на металлический расплав. Поэтому для достижения в процессе выплавки наибольшего эффекта рафинирования, легирования, модифицирования и других операций, сознательного управления сложными процессами возникла необходимость в накоплении сведений о строении и физических свойствах металлических расплавов. Использование комплекса этих свойств, в широком диапазоне температур, вплоть до  $1900^{\circ}\text{C}$ , способствует углублённому пониманию и более полному раскрытию природы жидкого металлического состояния, дальнейшему развитию моделей структуры многокомпонентных расплавов. Так, кинематическая вязкость, плотность и поверхностное натяжение отражают особенности процессов в атомной подсистеме, удельное электросопротивление и магнитная восприимчивость - роль электронной подсистемы, рентгеноструктурный анализ - размеры первой координационной сферы и количество ближайших соседей - атомов и т. д. Такие сведения позволяют разработать приемы для формирования наиболее благоприятного микроскопического состояния расплава, которое при неизменном химическом составе обеспечит наилучшие свойства твёрдого металла. В работе раскрываются важные проблемы металлургической наследственности. Эти данные также необходимы как справочный материал для выполнения технологических и конструкторских расчетов, для научных обобщений и раскрытия новых закономерностей причинной взаимосвязи в координатах «состав-строение-свойства». Заявленная тема диссертационной работы, поставленные цели и задачи, а также использованные подходы к решению являются весьма актуальными.



### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения, изложена на 310 страницах, 76 рисунков, 5 таблиц; список литературы насчитывает 444 источника. Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулирована цель, поставлены основные задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна работы, а также ее теоретическая и практическая значимость. Общая информация о жаропрочных никелевых сплавах приведена в первой главе. Во второй главе теоретически и экспериментально подтверждена модель жаропрочных никелевых расплавов и выявлена сущность структурных изменений, происходящих в их расплавах. Влияние структурных состояний жаропрочного никелевого расплава на термокинетические закономерности кристаллизации, образования твердых структур и структурно-фазовую стабильность ЖНС представлена в третьей главе. Технологическая целесообразность применения высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) жаропрочных никелевых сплавов доказана в четвертой главе. В пятой главе показано, что высокотемпературная обработка расплава жаропрочных никелевых сплавов способствует достижению повышенных значений жаропрочности и структурно-фазовой стабильности металлопродукции из сплавов данного состава. Основные выводы по работе изложены в заключении. Справка о использовании результатов работы приведена в приложении.

### **Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации**

Достоверность положений и выводов работы базируется на тщательном анализе имеющихся литературных источников, обосновывается использованием комплекса современных методов исследования структуры и свойств ЖНС, включая сертифицированные на международном уровне компьютерные программы. Автором также изучены и обобщены известные достижения и теоретические положения других исследователей, касающиеся строения металлической жидкости и ее влияния на структуру и свойства твердого металла. Достоверность теоретических результатов работы подтверждается экспериментальными данными. Основные результаты диссертации опубликованы в 47 научных работах, 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, а также две монографии и шесть патентов. Все полученные результаты неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.



### **Научная новизна результатов диссертационной работы**

В качестве новых научных результатов диссертантом выдвинуто положение о модели происхождения, разнообразия и изменения метастабильных кластерных образований жаропрочных никелевых расплавов при нагреве и изотермической выдержке. В предшествующих работах, где исследовались системы Fe-C, сплавы на основе меди и алюминия основные результаты были получены при исследовании кинематической вязкости. При исследовании жаропрочных сплавов на основе никеля основные структурные аномалии в жидком металле были выявлены при изучении удельного электросопротивления. Для этого создана автоматизированная установка, позволяющая получать воспроизводимые результаты при проведении высокотемпературных экспериментов.

На основе собственных экспериментальных и теоретических исследований выявлены новые закономерности влияния структурного состояния расплавов на процессы затвердевания жаропрочных никелевых сплавов и формирования их кристаллической структуры и функциональных свойств, что позволило подчеркнуть целесообразность применения высокотемпературной обработки расплавов жаропрочных никелевых сплавов.

Разработка нового метода использования машинного обучения для решения задач материаловедения, основанного на комплексном использовании базы данных и математического моделирования влияния химического состава жаропрочных никелевых сплавов и параметров испытаний на изменение предела длительной прочности позволили определить параметр структурно-фазовой стабильности для каждого состава сплава, а также утверждать ВТОР никелевых сплавов позволяет получать повышенные значения жаропрочности и структурно-фазовой стабильности без изменения химического состава.

Научная новизна диссертационной работы в полной мере отражена в выводах и не вызывает сомнений.

### **Оценка теоретической и практической значимости**

Теоретическая значимость заключается в следующем.

Впервые предложена математическая модель, подтвердившая научную концепцию микронеоднородного строения металлических расплавов и раскрывшая строение жаропрочного никелевого расплава после структурных изменений. Доказано в период нагрева или изотермической выдержки расплавы ЖНС испытывают фазовый переход второго рода.

Получены новые данные о влиянии структурного состояния расплава на термокинетические закономерности кристаллизации явились базой для оптимизации производственных технологических режимов.



Обоснована целесообразность применения высокотемпературной обработки жаропрочных никелевых расплавов с целью повышения качества металлопродукции и решения технологических проблем производства

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

Использованные методы получения и обработки результатов не вызывают нареканий. В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями в области жаропрочных никелевых сплавов.

Практическая значимость заключается в разработке и апробации новых научных инструментов, позволяющих исследовать структурные изменения расплавов жаропрочных никелевых сплавов при нагреве и изотермической выдержки, а также моделировать влияние химического состава ЖНС на предел их длительной прочности в температурно-временных условиях, соответствующих эксплуатационным.

Работа логична, хорошо структурирована, выводы подтверждены большой экспериментальной базой. Принципиальных замечаний, ставящих под сомнение достоверность основных результатов и выводов диссертации, нет. Вместе с тем, имеются вопросы и замечания, касающиеся отдельных представлений экспериментальных данных.

1. Во второй главе диссертации и на рис. 1 автореферата приведены сведения о гистерезисе свойств расплавов. Не отрицая возможность этого явления, хотелось бы обратить внимание на то, что автор слабо отразил следующие важные моменты:

а) не изменялся ли химический состав сплава в ходе его нагрева и последующего охлаждения со скоростью охлаждения, не соответствующей скорости охлаждения отливки в производственных условиях.

б) как влияет на раскрытие гистерезиса скорость нагрева и охлаждения образца, а также время выдержки его при высоких температурах?

2. Во второй главе диссертации при моделировании температурной эволюции кластера среди прочих характеристик используется кинематическая вязкость, однако, в работе исследовалось удельное электросопротивление жидких ЖНС и моделируются температурные зависимости именно этого свойства. Почему не использованы результаты исследования температурных зависимостей кинематической вязкости расплавов жаропрочных никелевых сплавов?



3. Длительные изотермические выдержки сплавов с пониженным содержанием углерода не приводят к явлению релаксации (стр.123). Это означает, что структурные изменения протекают по иному механизму. Поясните в чем разница?

4. Для оценки фазовой не стабильности в настоящее время используются два метода: New Phasomr и уравнение баланса легирования  $\Delta E$ . Как предложенный в данной работе метод оценки структурно-фазовой стабильности соотносится с этими двумя методами?

5. В работе декларируется высокая ликвационная однородность сплавов после воздействия ВТОР, однако коэффициент ликвации не определяли или не приведен в диссертации?

6. В некоторых подрисуночных подписях (например, рис. 3.10, 3.21 и аналогичных), в которых сравниваются структурные составляющие сплавов, выплавленных по традиционной технологии и с применением ВТОР, не указана локализация фаз – в осях или в межосных пространствах, что не убеждает читателя в доказательности представленных рисунков.

Высказанные замечания не снижают значения работы в целом. Знакомство с диссертацией, авторефератом и публикациями автора не оставляют сомнений в том, что диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а её автор, Тягунов Андрей Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

**Официальный оппонент:**

главный научный сотрудник отделения реакторных материалов и технологий Курчатовского комплекса нано- био- инфо-когнитивных и социогуманитарных наук - природоподобных технологий (НБИКС-ПТ)

доктор технических наук, профессор

Кулешова Евгения Анатольевна

ФГБУ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Россия,  
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
Телефон: +7 (499) 196-95-39  
Электронная почта: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

Подпись Кулешовой Е.А. заверяю  
Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институ

Борисов Кирилл Евгеньевич

05.05. 2024 г.

