

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Шатульского Александра Анатольевича

на диссертационную работу Тягунова Андрея Геннадьевича на тему «Влияние структурного состояния жаропрочных никелевых расплавов на технологические параметры производства, структурно-фазовую стабильность и функциональные свойства изделий» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

Актуальность диссертационной работы. Никелевые жаропрочные сплавы (ЖНС) в настоящее время получили очень широкое распространение в двигателестроении для изготовления наиболее ответственных деталей газотурбинных двигателей высокотемпературного тракта, благодаря уникальным механическим и эксплуатационным свойствам. Однако анализ показывает, что для обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств в состав этих сплавов вводится более 15 различных элементов, некоторые из которых (в частности *Re*, *Ru*, *Co*) или весьма дефицитны, или же очень дороги. Поэтому рассматриваемая работа, посвященная улучшению свойств жаропрочных никелевых сплавов за счет оптимизации их структуры и фазового состава, а, следовательно, и свойств путем выбора оптимальных режимов плавки и термической обработки без изменения химического состава, является весьма актуальной, имеющей важное практическое значение для развития отечественного двигателестроения.

Общая характеристика работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; изложена на 301 странице машинописного текста, включая приложения, и содержит 84 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 444 наименований.

Во введении автором обоснована актуальность темы исследования, проанализирована степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту.

В первой главе автором выполнен очень подробный аналитический обзор по вопросам проектирования жаропрочных никелевых сплавов, обобщена информация о предъявляемых к ним требованиях, их назначении, химическом составе, роли легирующих элементов на формирование структуры и фазового состава, об основных технологиях производства изделий, а также применяемых методах термической обработки. Это позволило автору сформулировать цель работы и основные задачи исследований. В порядке замечания можно отметить некоторую излишность хорошо известной информации о влиянии химического состава сплавов на их свойства.

Вторая глава по сути является продолжением литературного обзора в которой очень подробно описаны существующие теории и модели микроне-

Вх. № 05-19/1-171
от 21.05.2024 г

однородного состояния. В дальнейшем автором теоретически и экспериментально подтверждена модель происхождения, разнообразия и изменения метастабильных кластерных образований, формирующихся в никелевых сплавах вблизи температуры плавления, что позволило обосновать причинно-следственные связи структурных и фазовых превращений, протекающих в жаропрочных никелевых сплавах. При проведении экспериментов автором было обосновано применение метода измерения удельного электросопротивления для анализа протекающих в расплавах процессов, который достаточно прост, но несет в себе необходимую информацию и позволяет однозначно трактовать протекающие в расплаве процессы. В ходе проведения экспериментов автором было установлено что, нагрев метастабильных жаропрочных расплавов никелевых сплавов до определенных температур, а также изменение продолжительности изотермической выдержки необратимо приводят к фазовому переходу второго рода, который сопровождается снижением размеров атомных кластеров до нескольких межатомных расстояний ($\sim 0,5$ нм). Не менее интересным выводом, экспериментально полученным автором является доказательство того факта, что основной вклад в нестабильность никелевого расплава вносят выделения вторых фаз в исходном твердом состоянии, в частности выделения упрочняющей интерметаллидной фазы, карбидов и нитридов.

В третьей главе описаны результаты исследований по влиянию структурных состояний расплавов жаропрочных никелевых сплавов на термокинетические закономерности протекания процесса кристаллизации, в частности показана взаимосвязь между температурными режимами плавки и температурами фазовых превращений, протекающих при кристаллизации. Доказано, что повышение температуры нагрева расплавов жаропрочных никелевых сплавов, приводит к увеличению степени их переохлаждения при кристаллизации, при этом наблюдается снижение температуры ликвидус сплава, и сужение интервала кристаллизации. Отмечено, что максимальное переохлаждение и 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, и как следствие более равномерное перераспределение легирующих элементов, что влияет на протекание процесса затвердевания, а, следовательно, и структуру формирующегося сплава, в частности повышается дисперсность дендритной структуры, увеличивается доля полиэдрических карбидов и основной упрочняющей γ' -вторичной фазы, снижается количество эвтектических фаз, уменьшается разброс по размерам избыточных фаз. Все эти структурные и фазовые изменения, несомненно, влияют и на структурную стабильность сплава в процессе эксплуатации.

В четвертой главе обоснована технологическая целесообразность применения высокотемпературной обработки расплава жаропрочных нике-

левых сплавов. Автором были проведены комплексные исследования структурных изменений расплавов жаропрочных никелевых сплавов, а также изучены взаимосвязи жидкого и твердого состояния, что позволило определить параметры для высокотемпературной обработки расплавов на основе никеля, как производственной технологии выплавки. При этом автором были рассмотрены различные технологии получения заготовок: литье с объемной кристаллизацией, монокристаллитное, гранульные технологии.

В пятой главе автором приведено описание разработанного алгоритма и вычислительной методики, позволяющей установить зависимости между плавочными составами сплавов и их свойствами, с учетом влияния каждого легирующего элемента и технологии изготовления заготовки. Для моделирования изменения свойств сплавов на основе никеля автором вполне оправданно 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. Это позволяет практическим работникам определить оптимальные режимы обработки сплавов с целью получения оптимального или требуемого уровня свойств.

Научная новизна полученных результатов не вызывает сомнения и заключается в установлении закономерностей влияния химического состава и высокотемпературной обработки расплава жаропрочных никелевых сплавов на их структурно-фазовую стабильность и эксплуатационные свойства, в выявлении механизма протекания структурных изменений в расплавах никелевых жаропрочных сплавов, установлении влияния 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, а также, что образующиеся при плавлении кластеры наследуют структуру вторичных фаз исходного твердого состояния (карбидов, нитридов и интерметаллидов).

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием базовых теоретических положений теории металловедения, современных сертифицированных методик и оборудования при проведении экспериментальных исследований, включающих методы математического и физического моделирования, корректным использованием методов статистической обработки экспериментальных данных и подтверждается положительным результатом при экспериментальной проверке и практическом опробовании разработок в условиях производства. 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 многократно обсуждались на всероссийских и международных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов.

Личный вклад автора не вызывает сомнения и состоит в выполнении патентно-аналитических исследований, в научной постановке цели и задач исследования, анализе литературных данных и результатов исследований, проведении основной доли экспериментов, статистической обработке экспериментальных результатов, опробовании разработанных предложений в производственных условиях.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы. Оформление диссертационной работы отвечает установленным требованиям. Диссертация написана грамотным, доступным техническим языком, что подтверждает высокую эрудицию и квалификацию автора.

Практическая ценность работы. Преимуществом данной работы является тот факт, что разработанные автором теоретические положения доведены до практического использования, в частности им разработаны:

- методики обработки входных данных, конструирования и тренировки нейронной сети, базы полных данных о значениях пределов длительной прочности, соответствующих плавочным составам жаропрочных никелевых сплавов;

- метод моделирования значений жаропрочности никелевых сплавов по их химическому составу и заданным температурно-временным параметрам испытаний, основанный на нейросетевом прогнозировании;

- метод повышения точности нейросетевого прогнозирования свойств металлических материалов, основанный на оптимизации входных данных и тренировки искусственной нейронной сети.

Вместе с тем по работе можно сделать следующие замечания:

1. Автором установлено, что одной из причин неравномерности распределения легирующих элементов является наличие в сплаве упрочняющей фазы и карбидов, для подтверждения этого факта целесообразно было бы провести эксперименты на сплавах с разным количеством этих фаз, кроме того при этом, по всей вероятности, изменяется механизм протекания фазовых превращений, тогда в чем заключаются эти отличия?

2. Во многих деформируемых и литейных сплавах, кроме монокристаллитных, присутствуют также и боридные фазы, которые обеспечивают упрочнение границ зерен, проводились ли исследованию по изучению кинетики формирования этих фаз после высокотемпературной обработки расплавов;

3. Автором экспериментально установлен факт снижения температуры ликвидуса сплавов и сужения интервала кристаллизации при увеличении температуры перегрева расплавов жаропрочных никелевых сплавов, но из текста работы не совсем понятна причина этого явления, кроме того некото-

рые литейные свойства, определяющие вероятность возникновения дефектов отливок зависят от этих параметров и в большей степени от значения эффективного интервала кристаллизации поэтому было бы весьма интересно рассмотреть эти вопросы;

4. Не совсем понятен выбор марок сплавов, на которых автор непосредственно проводил свои экспериментальные исследования, кроме того в диссертации отсутствуют таблицы с химическим составом сплавов, что ограничивает возможности анализа и обобщения результатов экспериментов.

5. Автором установлено, что отставание процессов деградации структуры на сплавах прошедших высокотемпературную обработку расплава составляет от 100 до 200 часов, однако межремонтный срок эксплуатации деталей из этих сплавов в авиационных газотурбинных двигателях составляет 5 и более тысяч часов, а в наземных установках более 15000 часов, поэтому интересно было провести структурный и фазовый анализ сплавов после гораздо более длительного периода эксплуатации.

6. Говоря о повышении структурной стабильности сплавов после высокотемпературной обработки расплавов автор, прежде всего, рассматривает изменения, протекающие в интерметаллидной γ - фазе, но при длительной эксплуатации происходит выделение и других ГПУ фаз, которые оказывают существенно отрицательное влияние на механические свойства, известны и методы оценки структурной стабильности, как соотносятся известные и предлагаемые автором методы?

7. Многие детали авиационных ГТД, изготавливаемые из никелевых жаропрочных сплавов работают в условиях тепломен, то есть при чередующихся нагревах и охлаждениях, как эти условия эксплуатации будут оказывать влияние на деградацию структуры и свойств сплавов, кроме того возможно ли, и на сколько эффективно в этих условиях будет проведение восстановительной термической обработки деталей, которая часто проводится для продления их ресурса при плановом ремонте двигателя.

8. Из текста работы не совсем понятно, когда рекомендуется проведение высокотемпературной обработки расплава, непосредственно в плавильно-заливочной установке перед заливкой, или на металлургическом комбинате для всей плавки, при реализации первого варианта насколько это увеличит затраты времени на изготовление отливки, и на сколько при этом увеличится себестоимость литья.

9. При изготовлении отливок из подобных сплавов значительное количество дефектов возникает на стадии заполнения полости формы расплавом, когда большое значение на протекающие процессы оказывают теплофизические свойства, и прежде всего вязкость расплава, поэтому весьма интересным было бы провести экспериментальное исследование изменения этого свойства.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Несмотря на отмеченные замечания, диссертация А.Г. Тягунова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-техническом уровне с использованием, как теоретического анализа, так и экспериментальных исследований. Она вносит заметный научный и теоретический вклад в развитие теории металловедения и направлена на решение важнейшей практической задачи повышения надежности и эксплуатационных свойств ответственных деталей из никелевых жаропрочных сплавов.

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,
заведующий кафедрой
Материаловедения, литья и сварки,
профессор, докт. техн. наук
по специальности 2.6.3.
«Литейное производство», профессор




Шатульский
Александр
Анатольевич

30 апреля 2024 года

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева».
152934, РФ, Ярославская область,
г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53.
тел. 8(4855) 280470
факс. 8(4855) 213964
E-mail: shatulsky@rsatu.ru

Подпись Шатульского А.А. удостоверяю:
Ученый секретарь Ученого совета

канд. техн. наук, доцент



Волков
Сергей
Александрович