

ОТЗЫВ

официального оппонента Гнесина Ивана Борисовича
на диссертационную работу Булахтиной Марины Анатольевны
на тему «Особенности структурных изменений в литейных сплавах на основе Ni_3Al при термической обработке, постоянных и циклических нагружениях при высоких температурах», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 (05.16.01) - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Повышение характеристик жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения является актуальной материаловедческой задачей практически все время существования газотурбинных двигателей (ГТД). Именно возможности двигателя, его удельная мощность, эффективность, абсолютные и удельные силовые показатели, определяют значительную часть комплекса летно-технических и/или тактико-технических характеристик летательных аппаратов. Практически все эти параметры ГТД определяются уровнем температуры на входе в турбину высокого давления двигателя. Возможность повышения температуры газа перед турбиной является практической целью разработки новых жаропрочных материалов. Чем выше допустимая рабочая температура материалов, из которых изготовлены детали горячего тракта двигателя, тем выше его характеристики. В современных ГТД в качестве материала лопатки турбины используются жаропрочные никелевые суперсплавы (ЖНС). Однако их возможности для дальнейшего повышения температуры газа в ГТД практически исчерпаны. Одним из перспективных направлений развития в этой области на сегодня является использование в качестве материала лопатки сплавов на основе алюминида никеля, отличающегося от ЖНС повышенным содержанием алюминия, более высокой жаропрочностью при меньшей плотности. Ряд деталей ГТД, изготовленных из материалов этого класса, уже успешно прошел эксплуатационное опробование на двигателях ПС-90А, 117А, ТВД-20, АЛ-31Ф и МД-120. Для наиболее

эффективного их использования необходимо установить закономерности формирования структурно-фазового состояния этих сплавов в зависимости от технологических маршрутов их получения, а также связь этих параметров с механическими свойствами материала. Исходя из этого, можно заключить, что направление исследований, которым посвящена диссертационная работа, несомненно **является актуальным**.

Цель диссертационной работы сформулирована автором как развитие физико-химических принципов легирования и создания специальных структурно-фазовых состояний в процессе кристаллизации и термической обработки легких, жаропрочных конструкционных сплавов на основе Ni_3Al , обеспечивающих повышение их долговечности в условиях постоянных и циклических нагрузок при температурах 1000-1200 °С.

Среди **основных задач**, которые предполагалось решить для достижения цели работы, указано выявление изменений в структурно-фазовом состоянии материалов, возникающих в результате термических обработок, кратковременных и длительных статических и циклических нагружений, а также поиск взаимосвязи обнаруженных изменений структуры с жаропрочностью материалов.

С точки зрения **новизны научных результатов**, обращает на себя внимание обнаруженный эффект снижения долговечности материалов в результате значительной предварительной гомогенизации структуры материала. Относительно непродолжительные отжиги, напротив, оказывают положительное влияние на жаропрочность данных сплавов. Автором установлено, что микроструктура материала, формирующаяся в результате направленной кристаллизации, близка к оптимальной, с точки зрения жаропрочности, и не нуждается в проведении длительных гомогенизационных отжигов для достижения оптимума с точки зрения механических свойств при рабочих температурах.

Практическая значимость работы состоит в выработке конкретных рекомендаций по проведению как процесса выплавки материала,

характеризующегося постадийным введением легирующих элементов, так и проведению кратковременных термических обработок получаемых материалов, позволяющих снизить негативное влияние термических напряжений, возникающих в процессе кристаллизации, но не допустить отрицательно влияющих на жаропрочность изменений микроструктуры. Получение в рамках работы патента РФ на литейный сплав и изделие, выполненное из него, также свидетельствует о практической значимости проведенных научных изысканий.

Достоверность полученных в рамках работы результатов подтверждается как использованием современных методов исследования и испытаний, так и согласованностью полученных данных. Все основные результаты опубликованы в 9 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, а также доложены на целом ряде научных конференций.

Работа выполнена на достаточно высоком техническом уровне, использованы оригинальные технологические подходы при изготовлении материалов, набор используемого оборудования и широкий арсенал современных и аттестованных методов исследования полностью соответствует требуемому для решения поставленных задач.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 113 наименований. Общий объем диссертации составляет 127 страниц, в том числе 58 рисунков, 15 таблиц.

Во введении к диссертационной работе отмечены общие критерии, предъявляемые к жаропрочным сплавам для авиационного двигателестроения, а также отмечены тенденции развития жаропрочных конструкционных материалов, отмечена необходимость повышения рабочих температур, при которых материал способен выполнять целевые функции. Выбрано направление проведения исследований, сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по тематике диссертации, позволяющий составить как общее впечатление о накопленных на сегодняшний день данных об интересующей области материаловедения, так и обосновать основные направления исследований.

Во второй главе приведено описание использованных технологических маршрутов получения исследуемых материалов. Описаны шихтовые материалы, оборудование и характерные технологические приемы выплавки изучаемых сплавов, приведена информация о проводимых термических обработках и механических испытаниях. Представлены данные о методах приготовления образцов, а также методах исследования их структурно-фазового состояния.

Третья глава посвящена описанию результатов исследования влияния способа выплавки, режимов кристаллизации и термической обработки на микроструктуру и механические свойства исследуемых сплавов.

В четвертой главе приводятся результаты определения влияния характера нагружений образцов на их микроструктуру и особенности механизма разрушения. Рассмотрено влияние кратковременных и длительных статических нагрузок, термоциклирования, испытаний на малоцикловую выносливость.

В пятой главе кратко приведены данные об использовании результатов, полученных в рамках работы, для повышения механических характеристик жаропрочных сплавов типа ВКНА. В том числе, описано положительное влияние поэтапного введения легирующих элементов, а также научно обоснованного выбора режима термической обработки сплава на его долговечность при высоких температурах.

Автореферат и публикации соответствуют теме диссертации и отражают её содержание.

При несомненных достоинствах работы, по её содержанию можно сделать ряд замечаний:

1. При количественной характеристике степени ликвации в работе используется понятие «коэффициент распределения». Само по себе оно не вызывает вопросов и замечаний. Однако не хватает четкого указания, химический состав чего измеряется при определении коэффициентов

распределения. Это состав отдельной фазы, или это средний состав с области определенной площади?

2. При работе на СЭМ в рамках диссертации был использован контраст во вторичных электронах. Не мог бы контраст в отраженных электронах дать некоторые преимущества при анализе структурно-фазового состояния сплавов?

3. На мой взгляд, работа выиграла бы, если бы анализ изменений микроструктуры сплава был, помимо прочего, сопровождается анализом изменения объемных долей фаз хотя бы в основных двухфазных структурных составляющих. Очевидно, что эволюция микроструктуры двухфазных смесей может проходить как со сменой химического состава фаз, так и сменой соотношения их объемных долей, т. е. изменениями в количественном фазовом составе. Более того, в работе представлены данные, свидетельствующие именно об этом: например рис. 3.6 (б, г), рис. 4.1 (а) и рис. 4.17 (б, е) и (г, з). При этом в работе основное внимание уделено анализу изменения химического состава, изменения в соотношений объемных долей фаз комментируются лишь в некоторых редких случаях и не сопровождаются количественными оценками.

4. На стр. 50 работы приведены данные о размере структурных составляющих монокристаллов ВКНА-1В и ВКНА-25. Однако описание методики определения этих размерных параметров в работе не приведено. Само понятие «размер» для частиц неправильной формы (например таких, как первичные выделения) не является тривиальным. При всем этом размерные характеристики приведены, зачастую, с точностью до 100 нм. Параметры структуры медленно охлажденного сплава ВКНА-1В отличаются от остальных значительно, различия же между остальными тремя сплавами уже не столь очевидны. Для оценки статистической значимости как абсолютных значений приведенных параметров, так и различий между этими параметрами для некоторых из образцов, следовало бы указать, какими методами был получен этот набор данных и как проводился их статистический анализ.

5. Описание микроструктуры и фазового состояния сплавов в работе могло бы быть улучшено. Так, в работе практически нигде конкретно не обсуждается структурное и фазовое состояние областей, называемых «междендритное пространство» (на рис. 3.9 под «межосное пространство», вероятно, также подразумевалось оно). На иллюстрациях часто приведены обозначения не для всех фаз. Например, на рис. 3.19 фазы не обозначены вовсе, даже на иллюстрациях с большим увеличением. Практически никак не комментируется природа контраста на изображениях с различным увеличением. Это не меняет основные выводы работы, но значительно затрудняет восприятие описания столь фундаментальной характеристики (особенно для данной работы), как микроструктура.

Все высказанные замечания носят исключительно частный характер и не влияют на общую положительную оценку выполненной диссертационной работы, не снижают её научную и практическую значимость.

Тематика и содержание диссертационной работы полностью соответствуют паспорту и формуле специальности 2.6.1 (05.16.01) - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов». Работа характеризуется внутренним единством, целостностью и последовательностью в изложении и интерпретации полученных научных результатов, свидетельствует о личном вкладе соискателя в науку.

Таким образом, представленная диссертационная работа «Особенности структурных изменений в литейных сплавах на основе Ni_3Al при термической обработке, постоянных и циклических нагружениях при высоких температурах» является законченным научным исследованием, по актуальности, объёму полученных новых данных, достоверности, обоснованности выводов, научной и практической значимости соответствует требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении научных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции) в части критериев, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а

её автор Булахтина Марина Анатольевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 (05.16.01) - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Согласен на включение и дальнейшую обработку моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.078.01 (Д 002.060.01).

Гнесин Иван Борисович, ИФТТ РАН, 142432, Московская область,
г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, дом 2.
Рабочий телефон 8 (496) 522-82-84.
ibgnesin@issp.ac.ru

Старший научный сотрудник
ИФТТ РАН, к.т.н.

Гнесин
23.05.2022

Гнесин И.Б.

Подпись Гнесина И.Б. заверяю : *зам. зав. от* *Гнесин И.Б.*

