



**Уральский
Федеральный
университет**
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, тел.: +7 (343) 375-45-07
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

17.11.2023 № 01.09-07/8574
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
Д.Ф.-М.Н.

А.В. Германенко

2023г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина» на диссертационную работу Елютина Евгения
Сергеевича «Разработка жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений с
повышенной длительной прочностью для монокристаллических лопаток
перспективных авиационных ГТД», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и
термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность темы диссертации

Улучшение эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей в
значительной степени достигается повышением температуры газа на входе в
турбину. При этом основным сдерживающим фактором являются материалы, из
которых изготавливают детали турбины высокого давления, и, в первую очередь,
рабочие лопатки. Для достижения максимального уровня жаропрочности
материала рабочих лопаток в настоящее время применяют монокристаллические
жаропрочные никелевые сплавы IV поколения, содержащие в своем составе
рений и рутений.

В перспективных газотурбинных двигателях требуются материалы с еще более выдающимися характеристиками жаропрочности. Разработка таких материалов связана с необходимостью применением современных методов конструирования и устранения некоторых пробелов в металловедении жаропрочных никелевых сплавов на никелевой основе. К ним можно отнести влияние рутения на температуры фазовых превращений и его растворимость в γ' -фазе, а также какой знак (положительный или отрицательный) γ/γ' -мисфита оптимален для данных материалов.

Именно решению данных проблем посвящена диссертационная работа Елютина Евгения Сергеевича.

Поэтому исследование влияния легирующих элементов на физико-химические и структурно-фазовые характеристики жаропрочных никелевых сплавов и разработка литейных жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов с повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температурой до 1200 °С является актуальной задачей.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа представляет собой хорошо структурированный, последовательно изложенный экспериментальный материал. Автором успешно решаются все поставленные задачи.

Автором научно обоснован подход к решению задачи по созданию материалов для рабочих лопаток турбины высокого давления перспективных газотурбинных двигателей, который состоит в разработке жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов с повышенными характеристиками длительной прочности.

Для достижения поставленной цели автором выполнен ряд исследований в области металловедения жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Автором исследована растворимость рутения в γ' -фазе никелевых сплавов четверной системы Ni–Al–Re–Ru, а также его влияние на температуры фазовых превращений. Установлено, что одновременное легирование рением и рутением понижает растворимость в γ' -фазе каждого из этих элементов. Показано, что легирование рутением приводит к небольшому повышению температур полного растворения γ' -фазы в γ -твердом растворе, солидус и ликвидус.

Соискателем исследованы закономерности влияния знака γ/γ' -мисфита на структуру и длительную прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. Установлено, что наибольшей длительной прочностью обладают монокристаллы сплава с отрицательным γ/γ' -мисфитом.

Автор подробно излагает основные этапы разработки перспективных материалов ВЖМ8 и ВЖМ10, к которым относятся компьютерное конструирование, вакуумно-индукционная выплавка сплавов выбранных составов, литье с монокристаллической структурой, разработка режимов термической обработки и последующие всесторонние исследования структуры и механических свойств.

В работе хорошо освещены микроструктурные изменения в процессе многостадийной термической обработки и длительных высокотемпературных испытаний разработанных сплавов, такие как дендритная сегрегация, размер и форма γ' -фазы, периоды кристаллических решеток γ - и γ' -фаз.

Сильной стороной работы является большая технологическая и экспериментальная база с применением современного оборудования и методов исследований.

Наиболее важные научные результаты

1 Показано, что последовательность фазовых превращений $L+\gamma \rightarrow \gamma'$ и $L \rightarrow \gamma'+\beta$, а также их температуры соответствуют диаграмме состояния двойной системы Ni–Al в области составов, соответствующих γ' -фазе.

2 Установлено, что одновременное легирование рением и рутением приводит к уменьшению их растворимости в γ' -фазе.

3 Установлено, что легирование жаропрочных никелевых сплавов рутением приводит к небольшому повышению температур γ' -сольвус, солидус и ликвидус.

4 Установлено, что наибольшей длительной прочностью обладают монокристаллы сплава с отрицательным γ/γ' -мисфитом, при испытаниях которых образуется N-рафтинг.

5 Показано, что ТПУ фазы, выделившиеся в процессе длительных высокотемпературных испытаний, не оказывают значимого влияния на пластические свойства разработанных сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10.

Практическая значимость работы

К наиболее значимым практическим результатам диссертационной работы можно отнести следующие:

1 Применение разработанных сплавов V и VI поколений с повышенными характеристиками длительной прочности и температурной работоспособности позволит повысить эксплуатационные характеристики перспективных ГТД.

2 Показана хорошая технологичность разработанных сплавов при литье монокристаллических рабочих лопаток перспективных ГТД. При этом разработана научно-техническая документация на основные технологические операции, включающие выплавку, литье и термическую обработку рабочих лопаток.

Представленные результаты говорят о хороших перспективах промышленного освоения сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнения и обеспечивается применением современных информативных методов

исследования, технически грамотным анализом данных, основанных на устоявшихся знаниях о металловедении, а также тем, что анализ полученных экспериментальных данных позволил разработать составы сплавов с повышенными характеристиками длительной прочности.

Публикация основных результатов работы

Основные результаты работы подробно изложены в 9 научных работах в рецензируемых журналах, из которых 5 включены в перечень ВАК и 4 включены в международные базы данных Scopus и Web of Science, а также 2 патентах РФ.

Личный вклад автора очевиден, состоит в непосредственном участии во всех экспериментах, сборе и анализе данных, постановке задач и обсуждении полученных результатов, разработке научно-технической документации, выборе составов сплавов V и VI поколений с использованием метода компьютерного конструирования. Примечательно, что автор самостоятельно проводил нормальную направленную кристаллизацию с плоским фронтом роста фаз и овладел методом дифференциального термического анализа.

Замечания

1 В Главе 1 на стр. 24 автор приводит две разные формулы для расчета γ/γ' -мисфита. Одна из них учитывает знак γ/γ' -мисфита и использована в Главе 3 для исследования влияния знака γ/γ' -мисфита на длительную прочность. При этом сделан вывод о преимуществе отрицательного знака. Однако в дальнейшем, при разработке сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 с повышенными характеристиками длительной прочности, автор использует другую формулу, не учитывающую знак γ/γ' -мисфита.

2 В Главе 3 на стр. 56 автор определяет принадлежность обнаруженной интерметаллидной фазы состава Ni-34,2Al-7,1Ru (атомн. %) к $\beta(\text{NiAl})$ -фазе

только по ее химическому составу. Однако следовало бы провести дополнительные рентгеновские и электронномикроскопические исследования с определением типа кристаллической решетки этой фазы.

3 Результаты экспериментальных исследований и разработки сплава ВЖМ8 достаточно полно изложены в статье в журнале «Металлы». Несмотря на общий подход к созданию монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений, в будущем автору следует также опубликовать результаты исследований и разработки сплава ВЖМ10.

Сделанные замечания не снижают положительной оценки работы. Выводы, сделанные в работе, не вызывают сомнений и могут быть использованы при дальнейших исследованиях и технологическом освоении сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10.

Заключение

Диссертационная работа Елютина Евгения Сергеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, в которой на основе анализа многочисленных литературных источников и собственных исследований влияния легирования на физико-химические и структурно-фазовые характеристики сплавов разработаны жаропрочные никелевые сплавы V и VI поколений для рабочих лопаток турбины высокого давления, которые по характеристикам кратковременной и длительной прочности превосходят используемые в промышленности сплавы.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание представленной работы.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная работа удовлетворяет всем требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства

Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Елютин Евгений Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертационная работа Елютина Е.С. на тему «Разработка жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений с повышенной длительной прочностью для монокристаллических лопаток перспективных авиационных ГТД» и отзыв заслушаны и одобрены на заседании кафедры термообработки и физики металлов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол № 11 от 16.11.2023г. и рекомендованы к утверждению.

Заведующий кафедрой
термообработки и физики металлов,
д.т.н., профессор



Артемий Александрович Попов

«16» 11 2023 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Почтовый адрес: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел.: +7 (343) 375-44-44. Эл. почта: a.a.popov@urfu.ru