

ОТЗЫВ

официального оппонента

г.н.с. ИМЕТ РАН, д.т.н., проф. Поваровой Киры Борисовны

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 диссертационной работы Е.С. Елютина определяется необходимостью обеспечить эксплуатационные характеристики ГТД, которые определяются температурой газа на входе в турбину. Повышение этой температуры позволяет увеличить тягу двигателя и снизить удельный расход топлива. Создание перспективных авиационных двигателей V и VI поколений требует применения рабочих лопаток газовых турбин, способных противостоять одновременному воздействию температуры свыше 1950 К, а также высоких статических и циклических механических напряжений, активной коррозионно-окислительной среды. Необходима разработка более жаропрочных материалов для турбинных рабочих лопаток ГТД, чем существующие отечественные и зарубежные никелевые сплавы (ЖНС).

Это определило **цель исследования**: Разработка с использованием цифровых технологий нового поколения литейных жаропрочных никелевых рений-рутений содержащих сплавов (сплавов V и VI поколений) с повышенными характеристиками длительной прочности и $t_{\text{раб}}$ до 1200 °С для монокристаллических рабочих лопаток турбин перспективных газотурбинных двигателей вертолетов, самолетов и других изделий авиационной техники.

Научная новизна работы.

Впервые получены значимые научно обоснованные технические решения в области разработки нового поколения ЖНС с Re и Ru для монокристаллических рабочих лопаток перспективных авиационных ГТД.

С помощью метода компьютерного конструирования и на основе экспериментальных исследований строения и свойств разработаны монокристаллические ЖНС с Re и Ru, обладающие повышенными характеристиками жаропрочности: сплав V поколения ВЖМ8 и сплав VI поколения ВЖМ10 ($t_{\text{раб}}$ до 1200 °С).

Определены типы реакций, отвечающих за формирование при кристаллизации γ' -фазы, и растворимость Ru и Re в γ' -фазе.

Разработаны и апробированы регрессионные модели, позволяющие прогнозировать температуры γ' -сольвус, солидус и ликвидус монокристаллических ЖНС в зависимости от концентраций Al, Ta, Re, Ru в концентрационной области, соответствующей ЖНС V и VI поколений.

Практическая значимость результатов исследований

Сплавы паспортизованы. Разработаны режимы многоступенчатой термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (ГИП). Выпущена соответствующая нормативная научно-техническая документация.

На сплавах V поколения ВЖМ8 и VI поколения ВЖМ10 достигнуты рекордные характеристики длительной прочности при 1100 °С, превосходящие характеристики наиболее жаропрочных отечественных и зарубежных сплавов, таких как ВЖМ4, ВЖМ6, CMSX-10 и TMS-196.

Внедрение разработанного и паспортизованного ЖНС с Ru и Re сплава V поколения для производства рабочих лопаток ТВД обеспечит повышения в 2–3 раза ресурса работы турбинных лопаток и увеличение $t_{\text{раб}}$ материала лопаток длительно до 1170 °С и кратковременно до 1200 °С, а сплава VI поколения ВЖМ10 для производства монокристаллических рабочих лопаток

ТВД двигателя большой тяги ПД-35 обеспечит увеличение $t_{\text{раб}}$ материала лопаток длительно до 1200°C и кратковременно до 1250°C.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, перечня сокращений и обозначений, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 200 страниц, включая 68 рисунков, 43 таблицы, 19 формул и список цитируемой литературы из 204 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава представляет собой прекрасный аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций по теме диссертации. Приведены общие сведения о структуре и механических свойствах монокристаллических ЖНС. Рассмотрены механизмы положительного влияния Ru и Re на высокотемпературные механические свойства. Показана возможность достижения высоких значений физико-химических и структурно-фазовых характеристик при легировании Ru и Re. Отмечена склонность содержащих Re сплавов к образованию ТПУ фаз. На основании результатов анализа сформулированы цели и задачи настоящей работы.

Во второй главе описаны используемые методы изготовления, проведения испытаний и исследований. Использовано современное оборудование как для изготовления образцов с направленной структурой, так и для исследования структурно-фазовых превращений и определения критических температур. Механические свойства определены в соответствии с действующими ГОСТами. Выполненные исследования позволили провести всестороннюю оценку строения и свойств ЖНС.

В *третьей главе* представлены результаты исследований влияния легирующих элементов (ЛЭ) на физико-химические и структурно-фазовые характеристики никелевых γ/γ' -сплавов. Установлено, что в условиях

формирования стабильного плоского фронта при направленной кристаллизации (НК) происходит сегрегация ЛЭ по длине отливок (макросегрегация). Re и W сосредотачиваются в твердой фазе, Al и Ta обогащают расплав, концентрация Ru по длине отливок постоянна.

Показано, что при НК четырехкомпонентного ЖНС последовательно формируются сплавы с фазовым составом $\gamma+\gamma'$, γ' и $\gamma'+\beta$, где γ – твердый раствор Re и Ru в Ni, γ' -фазы. Во всех исследованных сплавах γ' -фаза образуется по перитектической реакции между расплавом и γ Ni. Определена растворимость Re и Ru во всех фазах.

Показано, что введение Re приводит к значительному повышению t_{solidus} и t_{liquids} и снижению t_{solvus} γ' -фазы, а Ru – к их небольшому повышению.

Разработаны регрессионные модели, позволяющие прогнозировать t_{solidus} , t_{liquids} и t_{solvus} монокристаллических ЖНС в зависимости от концентраций Al, Ta, Re, Ru.

Показано, что наибольшую длительную прочность имеют монокристаллы ЖНС с отрицательным ($a_{\gamma} > a_{\gamma'}$) γ/γ' -мисфитом, с кубоидными выделениями γ' -фазы и *N*-рафтингом.

Обнаружено, что при средних и высоких температурах на малых временных базах по длительной прочности сплав ВЖМ1 с Re превосходит сплав ВЖМ4 с Re и Ru. При высоких температурах и на малых временных базах сплав ВЖМ4 по длительной прочности значительно превосходит сплав ВЖМ1. Скорость выделения ТПУ фаз при температуре 1100 °С в сплаве ВЖМ1 (без Ru) превышает таковую в сплаве ВЖМ4 в 15 раз.

В *четвертой главе* представлены результаты компьютерного конструирования будущих перспективных ЖНС с заданным повышенным уровнем характеристик длительной прочности.

Разработка новых сплавов выполнена на базе никелевой системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru. Были сформулированы следующие исходные условия конструирования сплавов V и VI поколений: γ/γ' -мисфит не менее 0,5 %, исходная объемная доля высокодисперсных (0,3–0,5 мкм) частиц γ' -фазы не менее 65 %, $t_{\text{solvus}} \geq 1290$ °С, $t_{\text{solidus}} \geq 1340$ °С, объемная доля

неравновесной эвтектики $(\gamma+\gamma') \leq 5 \%$, «окно» термической обработки не менее $20 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность не более $9,2 \text{ г/см}^3$, приемлемая фазовая стабильность.

С учётом достигнутых расчётом заданных значений характеристик для экспериментального исследования были выбраны химические составы ЖНС V поколения (далее ВЖМ8) и VI поколения (далее ВЖМ10).

В *пятой главе* представлены результаты исследования сконструированного ЖНС V поколения ВЖМ8 для производства монокристаллических рабочих лопаток ТВД, работающих длительно до температуры $1170 \text{ }^\circ\text{C}$ и кратковременно до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Разработан специальный режим ТО, совмещённой с горячим изостатическим прессованием, монокристаллических отливок. Проведена паспортизация сплава ВЖМ8.

Применение сплава ВЖМ8 взамен существующего серийного жаропрочного сплава ЖС32 для производства рабочих лопаток ТВД обеспечит повышение в 2–3 раза ресурса работы турбинных лопаток и увеличение рабочей температуры материала лопаток.

В *шестой главе* представлены результаты исследований сконструированного ЖНС VI поколения ВЖМ10 для производства монокристаллических рабочих лопаток ТВД, работающих длительно до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ и кратковременно до $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Проведена паспортизация, нового ЖНС ВЖМ10 с Re и Ru с монокристаллической структурой.

Разработанные технологии выплавки, литья методом направленной кристаллизации и термической обработки, совмещённой с горячим изостатическим прессованием, монокристаллических отливок рабочих лопаток из сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 внедрены в опытно-промышленное производство НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Полученные результаты достоверны, выводы обоснованы. Выводы базируются на изучении большого объема экспериментального материала, полученного с использованием широкого спектра современных материаловедческих методов изучения конструкционных материалов, реализованных с применением современного сертифицированного исследовательского и технологического оборудования. Это позволило провести всестороннюю оценку строения и свойств ЖНС.

Публикации в журналах полностью отражают материалы диссертации.

Однако работа не свободна от некоторых недостатков.

1. Прделана огромная работа. Диссертация содержит материал, которого бы хватило на несколько кандидатских диссертаций. В каждую главу включены дополнительные исследования и/или мини литературный обзор, дополнительно к основному в первой главе. Автор работы хотел попутно разом закрыть все белые пятна, касающиеся строения ДС системы Ni–Al, предельных растворимостей Re и Ru в γ' -фазе и роли знака γ/γ' -мисфита. Это удалось, но появились недостатки, которые являются прямым следствием ее достоинств.

2. В разделе «Методики» приводится обоснование необходимости получения градиентной отливки, что сопровождается миниатюрным литобзором: [37, 125, 127–138]. Приводятся расчет условий кристаллизации с плоским фронтом многокомпонентных сплавов, сообщается о расчетах температурного градиента на фронте кристаллизации (стр. 41–44). Не указано, кто провел эти расчеты.

3. При анализе строения ДС системы Ni–Al в окрестностях γ' Ni₃Al перепутаны ссылки [148–155].

4. В табл. 6 (стр. 52) температуры γ' -сольвус обозначены как $T_{\text{ПР}}$.

5. При НК имеют место нижняя и верхняя части отливки. Далее обсуждается распределение легирующих элементов по длине отливки направленно закристаллизованного никелевого γ/γ' -сплава в зависимости от доли твердой фазы q (стр. 65 и на рис. 25 на стр. 66). Вносит разнобой.

6. Отсутствует методика определения доли твердой фазы (стр. 66, 67).

7. Введение дорогостоящего и дефицитного Ru в ВЖМ4 и ВЖМ6 обосновано более высокой фазовой стабильностью сплавов с Ru, т.к. снижается доля ТПУ частиц по сравнению со сплавом без Ru. Судя по микроструктурам сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 V и VI поколений с 6 % Ru и 6 % Re доля ТПУ фаз в них огромна. Нельзя назвать это приемлемой фазовой стабильностью.

Однако, сделанные замечания ни в коей мере не снижают научной значимости и практической ценности работы. Диссертация Е.С. Елютина является самостоятельной законченной квалификационной работой в области материаловедения тугоплавких естественных композиционных материалов, что позволило рекомендовать новый конструкционный материал для работы при температурах до 1200-1300°C.

По актуальности темы, научной новизне, практической значимости и достоверности результатов представленная работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертационным работам. Автор диссертации, Е.С. Елютин, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Г.н.с. ИМЕТ РАН, д.т.н., профессор  К.Б. Поварова

Подпись К. Б. Поваровой заверяю:

Ученый секретарь ИМЕТ РАН, к.т.н.  Фомина Ольга Николаевна

Поварова Кира Борисовна, ИМЕТ РАН им А.А. Байкова, Москва 119911, Ленинский проспект 49. Раб. тел. 8 (499) 135-44-14.

k.povarova@imet.ac.ru

Я, Поварова Кира Борисовна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Елютина Евгения Сергеевича, и их дальнейшую обработку.