

Отзыв официального оппонента

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»

Представленная работа состоит из введения, 6-ти глав, заключения, перечня сокращений и обозначений, списка цитируемой литературы (204 источников), изложена на 200 страницах, содержит 68 рисунков и 43 таблицы.

Диссертационная работа посвящена разработке с использованием цифровых технологий нового поколения литейных жаропрочных никелевых рений-рутениеосодержащих сплавов (сплавов V и VI поколений) с повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температурой до 1200 °С, предназначенных для монокристаллических рабочих лопаток турбин перспективных АГТД.

Актуальность работы не вызывает сомнений, так как жаропрочные сплавы V и VI поколения с повышенными характеристиками жаропрочности и структурно-фазовой стабильности в настоящий момент востребованы в новых конструкциях перспективных АГТД. Применение сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 позволит увеличить рабочие температуры эксплуатации монокристаллических лопаток турбины, имеющих забросы на пере до 1200–1250 °С. При этом применение данных сплавов по сравнению со сплавами III и IV поколения, позволят увеличить ресурсные показатели в 2 раза для турбинных лопаток в части длительной прочности.

К научной новизне данной работы следует отнести разработку и апробацию регрессионных моделей, позволяющих прогнозировать температуры γ' -солюсус, солидус и ликвидус монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от концентраций алюминия, тантала, рения и рутения в концентрационной области, соответствующей перспективным монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам V и VI поколений, учесть при этом требуемое несоответствие параметров решетки γ - и γ' - фаз.

В первой главе – «Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы, легированные рением и рутением (обзор)» рассмотрена эволюция жаропрочных никелевых сплавов. Приведены данные о влиянии рения на коэффициенты распределения легирующих элементов между γ - и γ' - фазами в жаропрочных никелевых сплавах. Рассмотрено влияние рения и рутения на размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ - и γ' - фаз (мисфит), температуры ликвидус и солидус. Показано положительное влияние рения на блокировку межфазных границ γ/γ' при изотермической ползучести. Приведены интересные данные о влиянии рутения (3 % масс.) в сплаве системы Ni–Al–Re на

значения предела текучести. Отмечено, что предел текучести в низкотемпературной области в таких системах до 900 °С не повышается, что связано с возникающей конкуренцией рения и рутения (в силу близости атомных радиусов за γ -твердый раствор). Для зарубежных сплавов показаны соотношения легирования Re: Ru как 2:1 для систем Ni–Al–Cr–Ta–Co–Re–Ru и 1,5:1 для системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru. Отмечается положительная роль рутения в увеличении инкубационного периода выделения неблагоприятных ТПУ фаз в сложнолегированных системах с рением. На основании приведенных данных автор делает вывод о необходимости исследовании синергетического влияния рения и рутения на характеристики жаропрочных сплавов и их структурную и фазовую стабильность.

Вторая глава – «Методы изготовления, проведения испытаний и исследований». В главе приведены данные по методологии формирования градиентных отливок для исследования химического состава. Также приведены методики и оборудование по определению кристаллографической ориентации, физико-химических свойств (температуры фазовых превращений), микроструктуры, электронно-зондового микроанализа, растровой микроскопией, определение микропористости металлографическим методом, рентгеновской дифрактометрии, методы испытаний для определения механических свойств. Необходимо отметить, что для выполнения работы автором было привлечено максимальное количество методик и испытаний, что свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов.

Третья глава – «Влияние легирующих элементов на физико-химические и структурно-фазовые характеристики никелевых γ/γ' -сплавов». Исследована растворимость рения и рутения в γ' -фазе никелевых четырехкомпонентных сплавах системы Ni–Al–Re–Ru на градиентных отливках. Установлено, что при совместном легировании Re и Ru их растворимость в γ' -фазе существенно ниже, чем в трехкомпонентных сплавах Ni–Al–X (где X – Re или Ru). Для выбранных составов сплавов определены температуры кристаллизации по перитектической и эвтектической реакциях. При исследовании сегрегации элементов в сплавах системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru установлено, что сегрегация рения присутствует в осях дендритов первого порядка и межзеренных границах. На стр. 66 автор утверждает, что рутений относится к элементу незначительно сегрегирующему. Однако, по экспериментальным данным таблицы 9 рутений активно сегрегирует на межзеренной границе с образованием вторично фазы при снижении содержания алюминия и тантала? Как автор может прокомментировать данное явление (кроме объяснений на стр. 67)? Будет ли по мнению автора сегрегация рутения влиять на фазовую стабильность сплава в эксплуатации, так как автор выявил для сплавов по всей длине исследованной градиентной отливки. Автор вывел регрессионные уравнения для определения критических температур в сплавах для системы Ni–Al–Ta–Re–Ru с объяснением взаимосвязки легирования Al, Ta, Re.

На основе метода компьютерного конструирования ЖНС показаны пути достижения высокого объемного содержания γ' -фазы путем оптимального процентного содержания легирующих элементов для системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru.

На страницах 75–76 автор приводит данные о скорости выделения ТПУ фаз в рений- и рений-рутенийсодержащих сплавах. По характеристикам длительной прочности и фазовой стабильности очевидно преимущество последних. Автор предполагает, что на линии инверсии (рисунок 29) вероятно начало периода выделения ТПУ фаз. Однако, данные исследования необходимо продолжить дополнительными подтверждающими исследованиями мисфита и объемного содержания упрочняющей γ' -фазы, степенью инверсии структуры на различных стадиях. Причем данные исследования лучше выполнить на образцах подвергнутых только изотермическим выдержкам без приложения нагрузки. Автор приводит интересные сведения по изменению мисфита в системах Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co при различном содержании Cr. Как по мнению автора менялся бы мисфит при варьировании, например, Ta?

В четвертой главе «Компьютерное конструирование монокристаллических жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов нового поколения»

Заданы целевые показатели для конструирования сплавов с содержанием рения и рутения на основе комплексных требований методом компьютерного конструирования. В результате разработаны сплавы ВЖМ8 и ВЖМ10. Прогнозные и экспериментальные результаты имеют высокую сходимость.

Глава пять – «Экспериментальные исследования и разработка нового жаропрочного сплава V поколения»

Таблица 23 пояснить что такое F2?

По результатам испытаний сплава ВЖМ8 на длительную прочность стр. 122 выводы о наличии или отсутствии ТПУ фазы можно было бы уточнить результатами дополнительных исследований (хотя автор на рисунках 45–47 приводит сведения о наличии ТПУ фаз после испытаний).

Автор приводит везде осредненные значения испытаний (предел текучести, данные по длительной прочности, ползучести). Имеются ли у автора истинные кривые деформирования и кривые ползучести? Если имеются то, как на кривых ползучести выглядит стадия установившейся ползучести? Какой промежуток от общей кривой она занимает? На каких стадиях кривых ползучести может происходить инверсия структуры?

Глава шесть – «Экспериментальные исследования и разработка нового жаропрочного сплава VI поколения»

Рисунок 56 – почему идет выделение ТПУ фазы сразу после ПТО? Выделения ТПУ фазы какого стехиометрического состава имеются ввиду?

Стр. 160 п.6.3 вероятно опечатка – сплав ВЖМ10.

Для сплава ВЖМ10 целесообразно построить кинетическую диаграмму выделения ТПУ фазы. То есть исследования необходимо продолжить с определением временных периодов отслеживания процесса выделения ТПУ фазы и совокупной доли объемного содержания γ - и γ' -фаз, степени инверсии структуры для достижения синергетического эффекта в эволюции структуры.

В связи с высокой потребностью авиационной промышленности в сплавах с повышенными характеристиками длительной прочности и для определения перспективности использования разработанных сплавов в конструкциях АГТД, эксплуатируемых на форсированных режимах необходимо иметь дополнительные сведения:

- варианты систем покрытий для данных сплавов и возможные скорости образования вторичных реакционных зон;
- скорости развития трещины при малоцикловом изотермическом и неизотермическом нагружении;
- варианты применения восстановительной термической обработки после наработки и вероятность снижения доли ТПУ фаз;
- изменение уровня механических свойств сплавов в результате длительного старения 1500–2000 часов;
- сведения для определения расчетных значений характеристик конструкционной прочности.

Работа структурирована, в тексте практически отсутствуют опечатки. Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается апробацией на практике основных научных положений, содержащихся в диссертации, соответствием результатов экспериментов с имеющимися литературными данными, использованием аттестованных расчетных методик и применяемых программ.

Основные положения работы апробированы – доложены и обсуждены на научных конференциях, в том числе международных, опубликованы в изданиях ВАК, Scopus и Web of Science, получено 2 патента РФ, отражающих основное содержание работы.

Автореферат отражает краткое содержание диссертации. Поставленная цель и задачи в работе диссертантом успешно решены. Замечаний к выводам, выполненным по итогам работы нет.

Содержание диссертации соответствует п. 1, п. 2 и п. 9 паспорта специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов». По объему проведенных исследований, их актуальности, научной новизне и практической значимости диссертационная работа Елютина Е.С. полностью соответствует п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842.

Работа выполнена на высоком научном уровне, а автор работы Елютин Е.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Начальник испытательной лаборатории
по исследованию деталей и узлов

АО «ОДК-Климов», к.т.н.

Тихомирова Е.А.

Tikhomirova00@mail.ru +7911947-16-02

Подпись руки Тихомировой Е.А. заверяю

В.И.С.

Начальник отдела кадров АО «ОДК-Климов»

Санкт-Петербург,

194100, ул. Кантемировская д.11

klimov@klimov.ru



В.И.С.