

**ОДК****КЛИМОВ**

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ОДК-КЛИМОВ»

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Елютина Евгения Сергеевича «Разработка жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений с повышенной длительной прочностью для монокристаллических лопаток перспективных авиационных ГТД», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Тема и цель диссертации посвящена разработке с использованием цифровых технологий нового поколения литейных жаропрочных никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов (сплавов V и VI поколений) с повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температурой до 1200 °С для монокристаллических рабочих лопаток турбин перспективных газотурбинных двигателей.

Принимая во внимание, что 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, разработка более жаропрочных материалов для турбинных рабочих лопаток ГТД имеет наибольшую актуальность.

Для достижения поставленной цели был решен ряд важных научных и практических задач и получены приемлемые в научно-техническом плане результаты. В научном плане автору удалось:

- 1 С помощью метода компьютерного конструирования и на основе результатов экспериментальных исследований структурно-фазовых характеристик, физико-химических свойств и механических испытаний разработать монокристаллические жаропрочные рений-рутенийсодержащие

никелевые сплавы нового поколения, обладающие повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температуры, марок ВЖМ8 и ВЖМ10.

2 Показать, что в никелевых сплавах четырехкомпонентной системы Ni–Al–Re–Ru при кристаллизации γ' -фаза образуется по перитектической $L + \gamma \rightarrow \gamma'$ при температуре 1374 °С и эвтектической $L \rightarrow \gamma' + \beta$ при температуре 1372 °С реакциях, так как это установлено в новой версии фрагмента диаграммы состояния двойной системы Ni–Al в области составов, соответствующих γ' -фазе.

3 Определить растворимость Re и Ru в γ' -фазе и констатировать, что одновременное взаимодействие рения и рутения уменьшает их растворимость в γ' -фазе четырехкомпонентных никелевых сплавов Ni–Al–Re–Ru.

4 Установить, что в системе Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co–Re–Ru, отвечающей монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам IV и V поколений (типа ВЖМ4), легирование рением приводит к значительному повышению температур солидус и ликвидус, снижению температуры γ' -сольвус, а рутением – к небольшому повышению температур этих фазовых превращений.

5 Разработать и апробировать регрессионные модели, позволяющие прогнозировать температуры γ' -сольвус, 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.

6 Установить закономерности влияния знака γ/γ' -мисфита на микроструктуру и длительную прочность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов системы Ni–Al–Cr–Mo–W–Ta–Co: наибольшей длительной прочностью при температурах 800 и 1000 °С обладают монокристаллы сплава с отрицательным γ/γ' -мисфитом (период решетки γ' -фазы меньше, чем γ -твердого раствора) и образовавшимся *N*-рафтингом, наименьшую – монокристаллы сплава с нулевым мисфитом (рафт-структура не образуется), промежуточные значения длительной прочности обнаруживают монокристаллы сплава с

положительным γ/γ' -мисфитом (период решетки γ' -фазы больше, чем γ -твердого раствора) и *P*-рафтингом.

В практическом плане автором проведено опробование с положительным результатом разработанных сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 при литье монокристаллических рабочих лопаток газовых турбин и разработан пакет НД (ТР, ТИ и ТУ) по сплавам ВЖМ8 и ВЖМ10 для опытно- промышленного применения, включая атлас эталонных структур сплава ВЖМ8.

Личный вклад автора в проведенные работы весьма весомый и включает как выбор режима и проведение нормальной направленной кристаллизации и дифференциального термического анализа экспериментальных никелевых сплавов систем Ni-Al-Re-Ru и Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Re-Ru, так и расчет параметров структуры, фазового состава, механических и теплофизических свойств при компьютерном конструировании сплавов V и VI поколений ВЖМ8 и ВЖМ10, а также экспериментальных сплавов системы Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co и выполнение анализа данных по результатам исследования химического состава, структуры и фазового состава, механических и теплофизических свойств. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, обсуждении полученных результатов, а также написании статей и тезисов докладов.

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 представительных научных конференциях, в том числе международных.

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы 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, получено 2 патента РФ, отражающих основное содержание работы.

Диссертационная работа 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.

Вместе с тем по автореферату имеются следующие замечания:

1. В части компьютерного конструирования (глава 4), из автореферата не ясно, как соотносятся параметры фазовой стабильности Md , Nv (NEW PHASOMP, например, в работе Morinaga M., Yukawa N., и др., 1982 г.) и ΔE (в работах Морозовой Г.И. и др.)?
2. В части экспериментальных исследований (глава 5, рис. 10, б и 15, б) из автореферата не ясно, пластинчатые ТПУ выделения фазы какого стехиометрического состава имеются ввиду? Можно ли утверждать, что в качестве фазообразующей системы при 1100°C в данном случае выступает, например, система Cr-Ta-Re , описанная в работе [Ю.В.Балыкова и др. Изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий системы Cr-Ta-Re – Вести Московского университета, сер.2.Химия, 2013, т.54, №4, стр. 227-233], где рассматриваются равновесные состояния с наличием σ , λ и χ – ТПУ фаз? Какая из этих фаз будет доминирующей в сплавах ВЖМ8 и ВЖМ10 при определенных внешних условиях эксплуатации?
3. В практическом плане, если рассматривать в качестве зарубежного аналога для сплава ВЖМ8 сплав TMS-238 (например, в работе Kyoko Kawagishi and others, Japan, 2012), то видно, что при высоком сочетании уровня жаростойкости с высоким сопротивлением ползучести при 137МПа и температуре 1100°C , и при максимальной жаропрочности при этой температуре, сплав также обладает хорошим сопротивлением горячей коррозии при 900°C в течение 20 часов, по сравнению со авиационными жаропрочными сплавами III и IV поколения. Тем не менее, вопрос о применении покрытий при этом стоит очень актуальным. Из автореферата не ясна возможность сочетания материала сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10 с различными вариантами защиты покрытиями, и

какая защита покрытиями будет оптимальной для их применения в эксплуатации.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают общую положительную и высокую в научном и практическом отношении оценку выполненной работы и проведенных исследований в целом. Результаты работы могут быть востребованы при разработке новых перспективных двигателей ТРДДФ 5 поколения в классе тяги 10...11 тс с уровнем температуры газа на входе в турбину 2000°K.

Диссертация является законченной научной работой, которая соответствует требованиям Положения ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор Елютин Е.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Генеральный конструктор

Елисеев Всеволод Александрович

Главный металлург

Кузьмин Олег Вадимович

Заместитель главного конструктора
по перспективным разработкам, к.т.н

Липин Алексей Владимирович

Начальник отдела научных
программ- секретарь НТС

Орлова Елена Юрьевна

Отзыв составил:

Ведущий специалист

– руководитель группы УГМет
АО «ОДК- Климов»

Живушкин Алексей Алексеевич

Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Елютина Е.С.

Подписи В.А. Елисеева, О.В. Кузьмина, А.В. Липина, Е.Ю.Орловой и А.А.Живушкина заверяю.

Контактный телефон: (812) 640-69-73, доб.7322, +7 (911) 121-32- 84

Адрес: 194100, С.-Петербург, Кантемировская ул., д.11, стр.1 (ул. акад. Харитона, д.8), Акционерное Общество «ОДК-Климов» (АО «ОДК-Климов»).

Факс: +7(812) 647-00-29; электронный адрес: klimov@ klimov.ru