

УТВЕРЖДАЮ  
И.о. проректора по научной работе  
ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)», д.т.н., профессор



Равикович Ю.А.

25 *Май* 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на диссертацию Булахтиной Марины Анатольевны «Особенности структурных изменений в литейных сплавах на основе  $NI_3AL$  при термической обработке, постоянных и циклических нагружениях при высоких температурах» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время газотурбинные двигатели являются наиболее ответственными компонентами воздушных и морских судов различного назначения. При этом особую роль в них играют жаропрочные никелевые сплавы для сопловых и рабочих лопаток, а также многих других ответственных деталей горячего тракта, испытывающих наиболее высокие воздействия статических и динамических нагрузок, поэтому разработка новых сплавов на основе алюминидов переходных металлов, имеющих более низкую плотность и более высокие рабочие температуры, является одним из важнейших условий создания газотурбинных двигателей пятого и последующего поколений. Вместе с тем, тяжело нагруженные детали современных авиационных ГТД работают в условиях высоких температур, термоциклирования, постоянных и знакопеременных нагрузок. Это интенсифицирует развитие в материале диффузионных и усталостных процессов, приводит к деградации структуры и, следовательно, к снижению жаропрочности, пластичности и вязкости разрушения, что ограничивает как рабочие температуры, так и срок службы

наиболее нагруженных деталей. Поэтому задача выбора оптимальных режимов процессов получения и термической обработки многокомпонентных жаропрочных легких ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов типа ВКНА для обеспечения их повышенной долговечности в условиях постоянных и циклических нагрузок при температурах 1000-1200°C несомненно является актуальной задачей.

### **Общая характеристика и анализ работы.**

Автором проведен глубокий информационно-аналитический анализ основных направлений развития по сплавам на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Описаны принципы легирования сплавов на основе  $\gamma'\text{Ni}_3\text{Al}$  и представлены двойные и тройные диаграммы состояния, являющиеся базовыми для разработки сплавов.

Автором изучены структурно-фазовые превращения и степень дендритной микроликвации в монокристаллах ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов на основе  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , легированных Ti, Cr, Mo, W, Co и Re, в состояниях после направленной кристаллизации, низко- и высокотемпературной термической обработки, кратковременных и длительных испытаний при статическом и циклических нагружениях.

Исследовано влияние способа получения, условий кристаллизации и температурно-временных параметров термической обработки ( $\gamma'\text{Ni}_3\text{Al}+\gamma\text{Ni}$ ) сплавов системы Ni-Al-Ti-Cr-Mo-W (ВКНА-1В) и сплавов с Re и Co (ВКНА-25), не содержащих бор, на характер распределения компонентов, структуру и свойства монокристаллов с кристаллографическими ориентациями  $\langle 001 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ . Разработан способ постадийного введения элементов в зависимости от их реакционной способности при вакуумной индукционной плавке заготовок для направленной кристаллизации.

Изучены особенности изменения структуры и характера разрушения монокристаллов сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 на основе алюминида никеля  $\gamma'\text{Ni}_3\text{Al}$ , в условиях кратковременных и длительных статических нагружений при температурах до 1200°C, в условиях малоциклового усталости при осевом пульсирующем нагружении при температурах 20, 750 и 900°C и в условиях термоциклирования. Установлено, что при совместном воздействии высоких температур и напряжений исчезают первичные включения в междендритном пространстве, в дендритах в утолщенных  $\gamma$ -прослойках происходит выделение субмикронных или наноразмерных частиц  $\gamma'_{\text{вт}}$ . Такой распад не происходит при ТО по любому из исследованных режимов, а реализуется только при совместном воздействии высоких температур и напряжений.

### **Научная новизна, достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

В результате проведенных исследований автором установлено, что увеличение продолжительности и повышение температуры термической обработки приводит к так называемой «гомогенизации» ( $\gamma'+\gamma$ ) интерметаллидных сплавов, сохраняющих гетерофазную структуру вплоть до  $T_{\text{solidus}}$ , что приводит к снижению долговечности по сравнению с литым материалом, который сохраняет максимальную микроликвационную неоднородность после кратковременной термической обработки для снятия литейных напряжений. Обнаружено наличие температурной аномалии предела выносливости при испытаниях на малоцикловую усталость (МЦУ) сплавов на основе  $\gamma\text{Ni}_3\text{Al}$  (сверхструктура  $L1_2$ ) типа ВКНА, обусловленную термически активируемым поперечным скольжением винтовых дислокаций.

Достоверность полученных автором результатов обеспечена корректным использованием базовых теоретических положений металловедения, подтверждается применением современных методов исследования, хорошим совпадением результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных и практическом использовании разработок в условиях производства.

**Значимость полученных результатов для развития науки** не вызывает сомнений и заключается в выполнении комплекса теоретических и экспериментальных исследований, по результатам которых уточнены известные представления о механизмах влияния различных легирующих элементов на процессы структурообразования и протекания фазовых превращений в монокристаллах ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов на основе  $\text{Ni}_3\text{Al}$  в процессе их получения и обработки.

**Рекомендации по практическому использованию результатов.** Несомненным достоинством работы является тот факт, что основные научные результаты доведены до практического применения, в частности разработаны рекомендации по способу поэтапного введения основных и легирующих элементов в зависимости от их реакционной способности при вакуумной индукционной плавке заготовок для направленной кристаллизации и температурно-временным параметрам кратковременной термической обработки монокристаллов ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов типа ВКНА, обеспечивающие сохранение максимальной микроликвационной неоднородности, что позволило повысить долговечность литых изделий.



**Подтверждение опубликования основных результатов исследования.** Основные результаты диссертационного исследования достаточно полно представлены в публикациях в научных рецензируемых журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций. По результатам работы получен патент на изобретение.

Личный вклад соискателя не вызывает сомнения и состоит в непосредственном участии при постановке задач исследований, проведении экспериментальных исследований, а также в интерпретации экспериментальных данных.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации. Оформление работы соответствует действующим стандартам. Диссертация написана грамотным техническим языком, что подтверждает высокую эрудицию автора.

#### **Замечания по диссертации.**

- в тексте диссертации содержится очень много сокращений, что существенно затрудняет ее прочтение и анализ;

- не понятен способ постадийного введения компонентов в расплав, если учесть, что это происходит в вакууме при индукционной плавке;

- на стр. 31 диссертации описаны используемые шихтовые материалы. Не понятно зачем использовался иодидный цирконий, если его нет в составе сплава (таб. 3.1), в тоже время в описание шихтовых материалов отсутствует вольфрам и ничего не сказано про РЗМ;

- не понятно, что автор подразумевает под основными и легирующие элементы (стр. 32);

- в диссертации говорится о высокой жаростойкости исследуемых сплавов (например, на стр. 83), но не приведено подтверждающих экспериментальных результатов;

- автором получен патент на изобретение на литейный сплав, однако в диссертации практически отсутствует информации о нем, только упоминание на стр. 108.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

#### **Заключение.**

В целом представленная диссертация Булахтиной Марины Анатольевны является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой на основе изучения структурно-фазовых состояний в процессе кристаллизации

и термической обработки легких, жаропрочных конструкционных сплавов на основе  $\text{Ni}_3\text{Al}$  разработаны рекомендации по методу изготовления из них лопаток, соплового аппарата и проставок перспективных ГТД. По научному уровню полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Булахтина Марина Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертационная работа Булахтиной Марины Анатольевны на тему «Особенности структурных изменений в литейных сплавах на основе  $\text{Ni}_3\text{Al}$  при термической обработке, постоянных и циклических нагрузениях при высоких температурах» и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры «Материаловедение и технологии обработки материалов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», протокол №10/2022 от 04.05.2022г.

Отзыв составлен профессором кафедры «МиТОМ», доктором технических наук Скворцовой С.В.

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет),

Кафедра «Материаловедение и  
технологии обработки материалов»,  
заведующий кафедрой,

к.т.н., доцент  
E-mail: kafedra.mitom@gmail.com

В.С. Спектор

Почтовый адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3,  
<https://mai.ru/>  
тел.:+7(499)158-5862, e-mail: mai@mai.ru