

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Булахтиной Марины Анатольевны по теме:  
«Особенности структурных изменений в литейных сплавах на основе  $\text{Ni}_3\text{Al}$  при термической обработке, постоянных и циклических нагружениях при высоких температурах»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
2.6.1 (05.16.01) – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Повышение температуры газа перед турбиной ГТД обеспечивает увеличение работы цикла, повышение удельной мощности, уменьшение габаритов и снижение веса двигателя, снижение расхода топлива, улучшение экологических характеристик двигателя. Сопловые и рабочие лопатки, а также многие другие ответственные детали горячего тракта современных ГТД изготавливают из сложнолегированных, многокомпонентных жаропрочных никелевых суперсплавов (ЖНС). Недостатком ЖНС является то, что они разупрочняются при подсолидных температурах из-за растворения  $\gamma'$  в  $\gamma$  твердом растворе на основе никеля ( $\gamma\text{Ni}$ ) при температурах выше  $T_{\text{solvus}}$ . Для нового поколения авиационных и ракетных двигателей необходимы конструкционные материалы, имеющие более низкую плотность, которые можно эксплуатировать при температурах выше рабочих температур ЖНС. К таким материалам относятся легкие жаропрочные и жаростойкие сплавы на основе интерметаллидов (ИМ) - алюминидов переходных металлов. Наиболее продвинутыми из них являются сплавы на основе  $\gamma\text{Ni}_3\text{Al}$  типа ВКНА, рабочие температуры которых на 100-150 °С выше таковых для ЖНС, которые могут кратковременно работать на воздухе. Эти ИМ сплавы сочетают жаропрочность при 1100-1200 °С с низкотемпературной пластичностью. Ранее была разработана система легирования, которая обеспечила соотношение фаз в сплаве, близкое к эвтектическому, что обеспечило термостабильность гетерофазной ( $\gamma'+\gamma$ ) структуры и упрочнение, вплоть до температуры начала плавления. Сплавы на основе  $\gamma\text{Ni}_3\text{Al}$  уже используются для изготовления рабочих и сопловых лопаток, створок сопла, камер сгорания и других ответственных деталей газотурбинных двигателей гражданской и военной авиации. Тяжелонагруженные 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 снижению жаропрочности, пластичности и вязкости разрушения, что ограничивает как рабочие температуры, так и срок службы наиболее нагруженных деталей.

Для выбора оптимальных режимов процессов получения и термической обработки (ТО) многокомпонентных жаропрочных легких ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов типа ВКНА необходимо изучение строения сплавов на всех стадиях их получения и эксплуатации, начиная от формирования структуры при затвердевании (кристаллизации), до разрушения в различных условиях, установление корреляции между происходящими при этом изменениями структуры и долговечностью материалов деталей горячего тракта современных ГТД. В этой связи диссертационная работа Булахтиной М.А. и поставленная цель исследования являются актуальными.

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации базируются на объемном и хорошо проанализированном экспериментальном материале,



полученном с применением широкого спектра современных физико-химических методов исследований.

Научная новизна работы состоит в изучении структурно-фазовые превращения и степени дендритной микроликвации в монокристаллах ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов на основе  $Ni_3Al$ , легированных Ti, Cr, Mo, W, Co и Re, в состояниях после НК, низко- и высокотемпературной ТО, кратковременных и длительных испытаний при статическом и циклических нагружении. Установлено, что увеличение продолжительности и повышение температуры ТО приводит к так называемой «гомогенизации» ( $\gamma'+\gamma$ ) интерметаллидных сплавов, сохраняющих гетерофазную структуру вплоть до температуры солидус. Коэффициенты дендритной микроликвации всех легирующих элементов (кроме Re) приближаются к единице, формируется принципиально отличающаяся от структуры ЖНС характерная микроструктура. Это приводит к снижению долговечности по сравнению с литым материалом, который сохраняет максимальную микроликвационную неоднородность после кратковременной ТО для снятия литейных напряжений. Также установлено наличие температурной аномалии предела выносливости при испытаниях на малоцикловую усталость (МЦУ) сплавов на основе  $\gamma'Ni_3Al$  (сверхструктура L12) типа ВКНА. Это обусловлено термически активируемым поперечным скольжением винтовых дислокаций, характерным для сплавов со сверхструктурой L12. При температуре максимума в  $Ni_3Al$  происходит изменение системы октаэдрического скольжения на кубическое. Показано, что при температурах ниже температуры максимума прочности сплавы типа ВКНА ведут себя, как композиционный материал, в котором достаточным запасом пластичности обладает только вязкая структурная составляющая  $\gamma Ni$  с ГЦК неупорядоченной кристаллической структурой.

Практическая значимость обусловлена рекомендациями температурно-временных параметров кратковременной термообработки монокристаллов ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов типа ВКНА, обеспечивающих сохранение максимальной микроликвационной неоднородности, что позволило повысить долговечность литых изделий. Рекомендации по способу постадийного введения основных и легирующих элементов в зависимости от их реакционной способности при вакуумной индукционной плавке (ВИП) заготовок для НК позволили предотвратить выделение крупных частиц топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз, аккумулирующих тугоплавкие легирующие элементы, что обеспечило повышение долговечности ( $\gamma'+\gamma$ ) сплавов. По результатам работы получен патент Российской Федерации на литейный сплав на основе  $Ni_3Al$  и изделие, выполненное из него, с повышенными характеристиками малоциклового усталости на базе  $N=10^4$  циклов.

Публикации отражают основное содержание работы, статьи опубликованы в авторитетных научных изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в базы данных РИНЦ, WoS, Scopus.. Результаты доложены на многих отечественных и международных научных конференциях.

Диссертационная работа М.А. Булахтиной соответствует паспорту специальности 2.6.1 (05.16.01) – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, представляет собой законченную целостную научно-квалификационную работу, в которой решены актуальные и практически важные научные задачи, вносящие значительный вклад в усовершенствование технологии жаропрочных никелевых сплавов.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, в том числе п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г к кандидатским диссертациям, а ее автор, Булахтина Марина Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Рецензент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую их обработку.

Заведующий кафедрой порошковой металлургии  
и функциональных покрытий,  
Директор Научно-учебного центра СВС МИСиС-ИСМАН,  
доктор технических наук, профессор

  
«12» 04 / 2022 г.

Е.А. Левашов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1.

Левашов Евгений Александрович

Тел.: (495)638-4500, (499)236-5298, e-mail: [levashov@shs.misis.ru](mailto:levashov@shs.misis.ru)

Заведующий кафедрой ПМиФП, директор НУЦ СВС,

Специальность 01.04.17 и 05.16.06



*Левашова Е.А. заверено  
заместитель начальника  
отдела кадров;*



И.В. Масленникова