

УДК 669.15:621.785

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВКНА-25

Владислав Витальевич Багетов<sup>(1)</sup>, Ольга Анатольевна Базылева<sup>(2)</sup>, Эльвира Гайсаевна Аргинбаева<sup>(3)</sup>

*Студент 4 курса,  
кафедра «Материаловедение»  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана<sup>(1)</sup>*

*Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, сотрудник, заместитель  
начальника лаборатории по науке ФГУП «ВИАМ»<sup>(2)</sup>*

*Кандидат технических наук, и.о. начальника сектора, ФГУП «ВИАМ»<sup>(3)</sup>*

*Научный руководитель: М. В. Унчикова  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана*

Ответственные детали авиационных и ракетных двигателей, стационарных энергетических установок изготавливают из высокотемпературных материалов. Традиционные жаропрочные никелевые сплавы для увеличения долговечности легируют тугоплавкими тяжелыми элементами, что увеличивает металлоемкость конструкции, уменьшает КПД двигателя [1]. В связи с низкой диффузионной подвижностью атомов тугоплавких металлов приходится проводить сложную и длительную термическую обработку для уменьшения ликвации и получения оптимальной дисперсно-упрочненной структуры [2].

Сплавы ВКНА на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ ) относятся к перспективным жаропрочным материалам, способным работать при температурах до 1250 °С [3]. Благодаря высокому содержанию алюминия и экономному легированию тугоплавкими элементами интерметаллидные сплавы имеют пониженную плотность и высокие удельные характеристики прочности. Высокая стабильность сплавов объясняется сохранением двухфазной структуры ( $Ni_3Al + \gamma$  – твердый раствор) в широком температурном интервале, в том числе при нагреве до температур, близких к солидусу, поэтому термическая обработка не имеет такого решающего значения в формировании эксплуатационных свойств, как в никелевых суперсплавах. Вместе с тем высокотемпературный отжиг можно рассматривать как способ повышения срока службы деталей из сплавов ВКНА за счет уменьшения ликвации, литейных напряжений, дополнительного выделения дисперсных частиц  $Ni_3Al$ . Режим отжига определяется химическим составом сплава и предшествующими технологическими операциями, влияющими на структурное состояние материала.

В настоящее время разработана серия сплавов ВКНА, которые различаются механическими и технологическими свойствами [4]. Особый интерес представляет сплав ВКНА-25, который для повышения жаропрочности легирован рением и по составу относится к системе Ni-Al-Cr-Co-Mo-W-Re-Ti. Рений существенно уменьшает скорость диффузии, может образовывать рений-содержащие фазы, препятствующие росту структурных составляющих в процессе длительных воздействий высоких температур.

Цель работы заключалась в разработке регрессионной модели и определении оптимального режима высокотемпературного отжига монокристаллического сплава ВКНА-25.

Исследования проводили на цилиндрических образцах, полученных методом высокоградиентной направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе с

использованием монокристаллических затравок, с кристаллографической ориентацией КГО  $\langle 111 \rangle$  [5].

Микроструктуру исследовали на компьютеризированном оптическом комплексе LEICA DM IRM.

Статические испытания на растяжение с определением времени до разрушения проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 на компьютеризированных стендах ZST2/3- ВИЭТ при  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\sigma = 100\text{ МПа}$ .

Для термической обработки использовали камерную печь VEBKS400/100 с максимальной рабочей температурой  $1350\text{ }^\circ\text{C}$ .

Оптимальный режим высокотемпературного отжига выбирали на основе метода планирования эксперимента. Была построена математическая модель, связывающая технологические параметры термической обработки с длительной прочностью сплава ВКНА-25. В качестве параметров оптимизации были выбраны температура и время отжига, которые варьировали в интервалах  $1250\text{...}1290\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $5\text{...}10\text{ ч}$ . Термическую обработку проводили в соответствии с матрицей полного факторного эксперимента. Результаты экспериментов представлены на рис. 1. Была выполнена статистическая обработка результатов, произведена проверка адекватности модели по критерию Фишера.

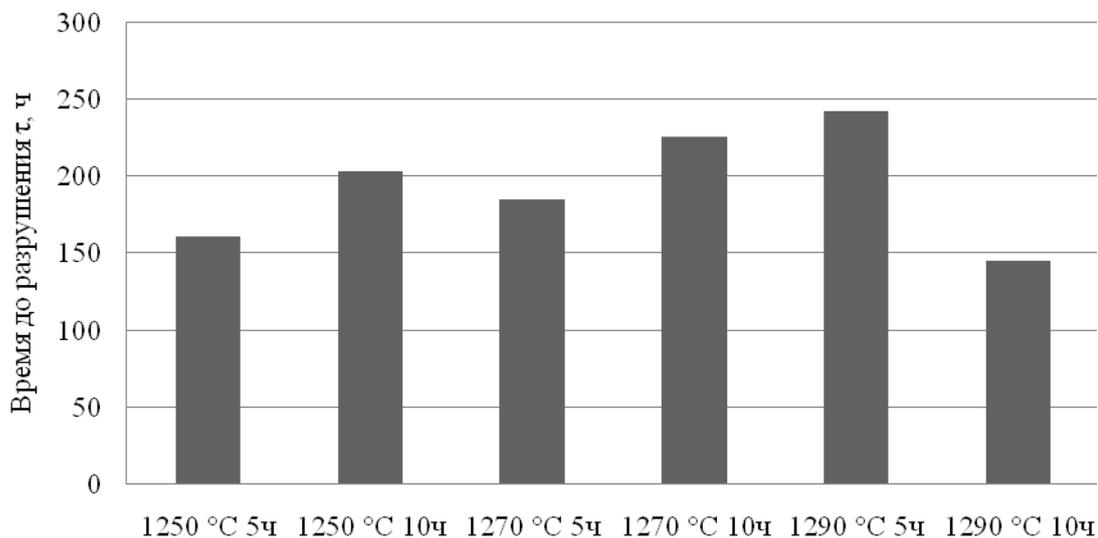


Рис. 1. Влияние режима термической обработки на время до разрушения при  $T=1100\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\sigma=100\text{ МПа}$

Выполнены микроструктурные исследования (рис. 2). Исследование структуры образца в исходном состоянии (литье, отжиг для снятия напряжений после механической обработки) на оптическом микроскопе показало наличие дендритной структуры. В литом металле химические элементы распределяются не однородно: элементы, повышающие температуру солидус, сегрегируют в осях дендритов. Ими, согласно литературным данным, являются рений и вольфрам. Если элементы понижают температуру солидус, то они скапливаются в междендритном пространстве.

Сравнительный анализ структур образцов в исходном состоянии и после высокотемпературных отжигов показал, что отжиг при  $1250$  и  $1270\text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $5\text{ ч}$  практически не уменьшает дендритной ликвации. Для растворения дендритов необходимы повышение температуры до  $1290\text{ }^\circ\text{C}$  или увеличение времени выдержки до  $10\text{ ч}$  в при нагреве до  $1250$  или  $1270\text{ }^\circ\text{C}$ .

Анализ структурного состояния сплава позволил также установить, что при повышении температуры отжига происходит уменьшение содержания первичных  $\gamma'$  выделений и количества прослоек  $\gamma$ -фазы, увеличивается содержание дисперсной  $\gamma'$ -фазы.

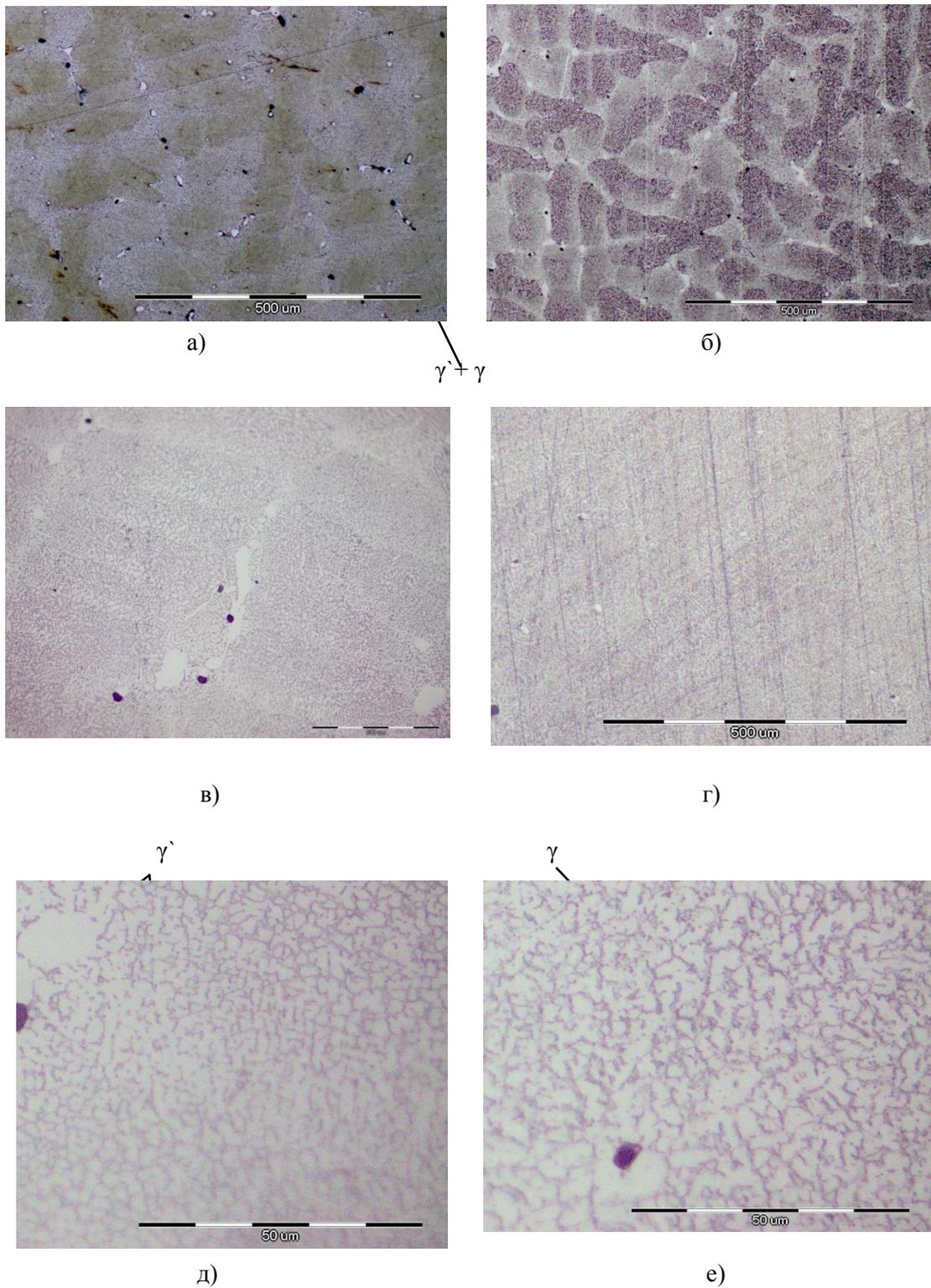


Рис. 2. Микроструктура сплава ВКНА-25:

а) в исходном состоянии; б) отжиг 1250 °С 5 ч, х100; в) отжиг 1250 °С 5 ч, х500; г) отжиг 1290 °С 5 ч, х100; д) отжиг 1250 °С 5 ч, х1000; е) отжиг 1290 °С 5 ч, х1000

На основе анализа полученных результатов в качестве оптимального режима термической обработки сплава ВКНА-25 рекомендован высокотемпературный отжиг при 1290 °С в течение 5 ч.

### Литература

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под. общ. ред. Е. Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. – 632 с.
2. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б., Толораия В. Н., Гаврилин О. С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Колобов Ю. Р., Каблов Е. Н., Козлов Э. В., Конева Н. А., Поварова К. Б., Грабовецкая Г. П., Бунтушкин В. П., Базылева О. А., Мубояджян С. А., Будиновский С. А. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением / под общ. ред. Каблова Е. Н., Колобова Ю. Р. – М.: Издательский дом МИСиС, 2008. – 328 с.
4. Поварова К. Б., Базылева Е. А., Дроздов А. А., Казанская Н. К., Морозов А. Е., Самсонова М. А. Конструкционные жаропрочные сплавы на основе Ni<sub>3</sub>Al: получение, структура, свойства. Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/2010/2010-205691.pdf> (дата обращения 01.03.2016).
5. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е. и др. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии, 2012. – № 5. – С. 97–105.