



УДК 669.245.018.44:629.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-2-2

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА МИКРОСТРУКТУРУ  
И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА  
НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА NiAl**

О.А. Базылева

Е.Ю. Туренко

А.В. Шестаков

**Сентябрь 2014**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

*О.А. Базылева<sup>1</sup>, Е.Ю. Туренко<sup>1</sup>, А.В. Шестаков<sup>1</sup>*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА NiAl**

*В статье представлены результаты исследования влияния термической обработки на микроструктуру и механические свойства сплава на основе NiAl. Показано, что значения предела прочности и относительного удлинения образцов сплава на основе интерметаллида NiAl при комнатной температуре максимальны для режима термической обработки:  $T_S=120^\circ\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением.*

**Ключевые слова:** *интерметаллид, термическая обработка, микроструктура, фазовый состав, механические свойства.*

*O.A. Bazyleva, E.Yu. Turenko, A.V. Shestakov*

## **AN EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NIAL-BASED INTERMETALLIC ALLOY**

*The results of investigation of heat treatment influence on microstructure and mechanical properties of NiAl-based alloy are presented in the paper. Tensile strength and elongation of NiAl-based alloy at room temperature reached their top values owing to heat treatment ( $T_S=120^\circ\text{C}/2\text{ h}$ ) followed by ageing.*

**Keywords:** *intermetallic compound, heat treatment, microstructure, phase composition, mechanical properties.*

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

## Введение

В настоящее время, в эру непрерывно развивающихся технологий, требования, предъявляемые к двигателям нового поколения, значительно увеличились. Необходимы более высокая степень сжатия воздуха на входе в турбину, повышение ресурса, увеличение температуры газа на выходе из турбины. К решению этих задач специалисты подходят с разных сторон: одной из них является совершенствование конструкции газотурбинного двигателя (ГТД), а другой – переход к новым перспективным материалам, отвечающим заданным параметрам [1–5].

Среди большого количества интерметаллидов с привлекательными свойствами интерес вызывает B2-упорядоченное соединение NiAl и сплавы на его основе [6–9]. По сравнению с применяемыми в настоящее время суперсплавами на основе никеля сплавы на основе NiAl имеют ряд преимуществ по термofизическим свойствам [10, 11]. Это соединение имеет более высокую температуру плавления (1674°C), значительно более низкую плотность (5,86 г/см<sup>3</sup>) и более высокую теплопроводность (76 Вт/(м·К)) при комнатной температуре, а также обладает высокой жаростойкостью, которая может быть улучшена путем легирования иттрием и такими элементами, как цирконий и гафний [12–17]. Однако применение сплавов на основе NiAl в качестве материалов для деталей ГТД сопровождается рядом ограничений: при комнатной температуре – низкие пластичность и сопротивление разрушению, при повышенных – низкие прочность и сопротивление ползучести. Для достижения желаемого баланса свойств проведен ряд исследований [18, 19].

Известно, что термическая обработка значительно влияет на морфологию, размер, объемную долю и распределение упрочняющей фазы [20, 21]. Таким образом, механические свойства могут быть значительно улучшены при правильно подобранной термической обработке. В работе исследовали влияние термической обработки на микроструктуру и механические свойства сплава на основе интерметаллида NiAl.

## Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовали образцы с направленной столбчатой структурой, полученные методом ВГНК. Для проведения эксперимента отлиты заготовки из композиции на основе NiAl, дополнительно легированные Co, Re и Ta, причем общее содержание легирующих элементов не превышает 14% (атомн.).

Выплавку прутковых (шихтовых) заготовок исследуемых композиций проводили вакуумным индукционным (ВИ) методом, мерные шихтовые заготовки переплавляли

методом высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК) на установках типа УВНЭС. Высокоградиентная направленная кристаллизация благодаря формированию однородной тонкодендритной структуры с меньшими дендритной ликвацией и пористостью позволяет получить более высокий уровень механических свойств жаропрочных сплавов [22].

Микроструктуру выбранных интерметаллидных композиций исследовали на растовом электронном микроскопе JSM-840. Локальный химический состав определяли методом количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на аппарате Суперпроб-733 (JСМА-733, фирма Jeol, Япония). Анализ проводили на нетравленных шлифах. Фотографии микроструктуры выполнены в специальном режиме СОМРО, контраст изображения в котором создается за счет разницы средних атомных номеров фаз ( $Z$ ) – чем выше  $Z$ , тем более светлой выглядит фаза на фотографии.

Температуры солидус и ликвидус сплава определяли методом дифференциального термического анализа (ДТА) на установке DSC 404 F1 при нагреве и охлаждении в среде гелия со скоростью 20 К/мин.

Статические испытания при растяжении с определением времени до разрушения проводили на компьютеризированных стендах ZST2/3-ВИЭТ в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 «Металлы. Метод испытания на длительную прочность».

## Результаты

### *Микроструктура сплава в литом состоянии*

Микроструктура сплава на основе интерметаллида NiAl в исходном литом состоянии состоит из  $\beta$ -,  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фаз и имеет характерное дендритное строение (рис. 1, *a*). В объеме  $\beta$ -фазы присутствуют игольчатые выделения  $\gamma'$ -фазы разной степени дисперсности (рис. 1, *b*). В образцах наблюдаются частицы дополнительной фазы, содержащей тантал (рис. 1, *в*). В междендритных участках находятся крупные фазовые образования, в центре которых расположена эвтектическая смесь  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фаз, а по краям –  $\gamma'$ -фаза (см. рис. 1, *в*).

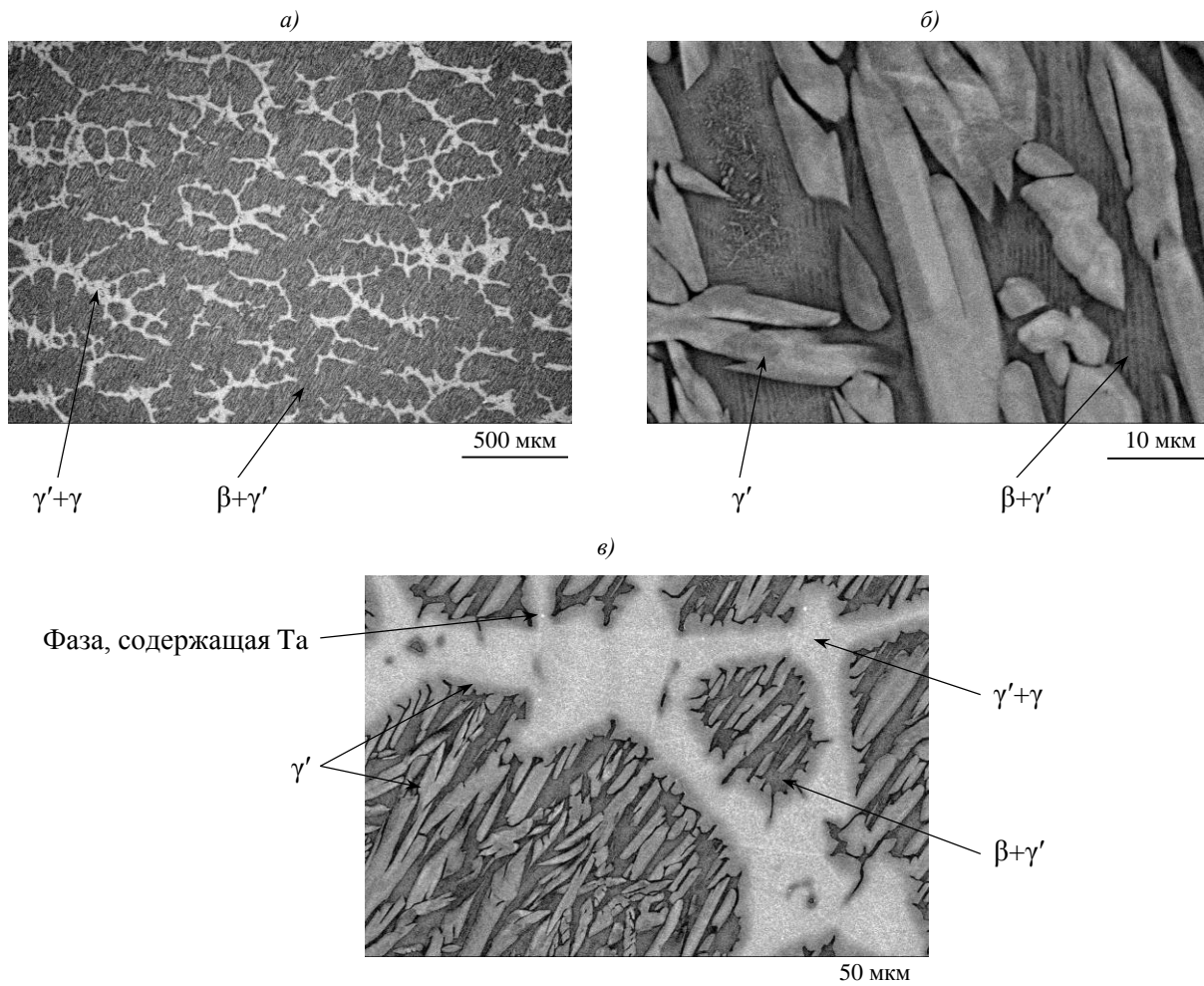


Рисунок 1. Микроструктура интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta в литом состоянии

### ***Микроструктура сплава после термической обработки***

Анализ кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) сплава на основе интерметаллида NiAl позволил определить температуры фазовых превращений (табл. 1), исходя из значений которых выбраны экспериментальные режимы термической обработки заготовок:

- режим 1:  $T_5=120^{\circ}\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением при  $800^{\circ}\text{C}$  в течение 5 ч;
- режим 2:  $T_5=90^{\circ}\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением при  $800^{\circ}\text{C}$  в течение 5 ч.

Таблица 1

### **Температуры фазовых превращений сплава на основе интерметаллида NiAl**

Температуры фазовых превращений, °C	Композиция Ni–Al–Co–Ta–Re
-------------------------------------	---------------------------

$T_L$	1439
$T_S$	1417

После термической обработки по режиму 1 дендритное строение сплава сохраняется, происходит увеличение содержания игольчатой  $\gamma'$ -фазы в объеме  $\beta$ -фазы (рис. 2, а), а также увеличение размеров крупных фазовых образований (эвтектика ( $\gamma'+\gamma$ )) в междендритной области (рис. 2, б, в). В образцах после термической обработки наряду с крупными частицами эвтектики присутствуют мелкие частицы, расположенные в осях дендритов, в центре которых наблюдается повышенная концентрация «тяжелых» элементов (рис. 2, г).

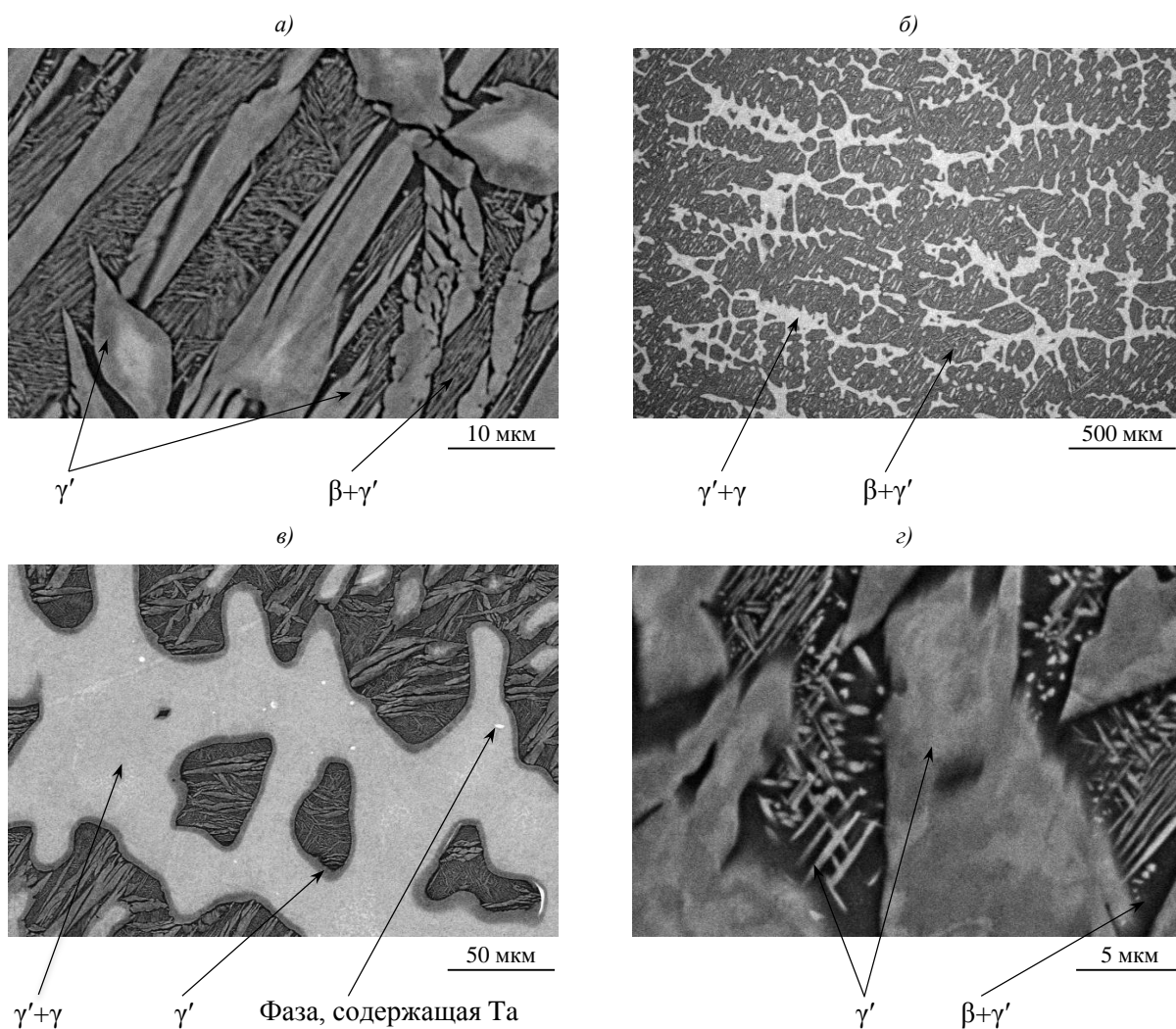


Рисунок 2. Микроструктура интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta после термической обработки по режиму:  $T_S=120^\circ\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением

После термической обработки по режиму 2 микроструктура сплава становится более однородной, в осях дендритов увеличивается количество игольчатых выделений  $\gamma'$ -фазы, при этом выделения становятся тоньше (рис. 3, а, б, г). В межосном пространстве частично растворяется ( $\gamma'+\gamma$ )-эвтектика (рис. 3, в), а также происходит полное раство-

рение упрочняющей фазы, содержащей Ta, что, по-видимому, отрицательно скажется на уровне прочности сплава.

По результатам проведенных исследований установлено, что:

– после термической обработки по режиму 2 ( $T_S=90^\circ\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением) наблюдается большее по сравнению с режимом 1 ( $T_S=120^\circ\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением) растворение эвтектических фазовых образований ( $\gamma'+\gamma$ ), что может привести к снижению уровня пластичности сплава;

– после термической обработки по режиму 2 происходит растворение упрочняющей фазы, содержащей Ta, что, по-видимому, отрицательно скажется на уровне прочности сплава.

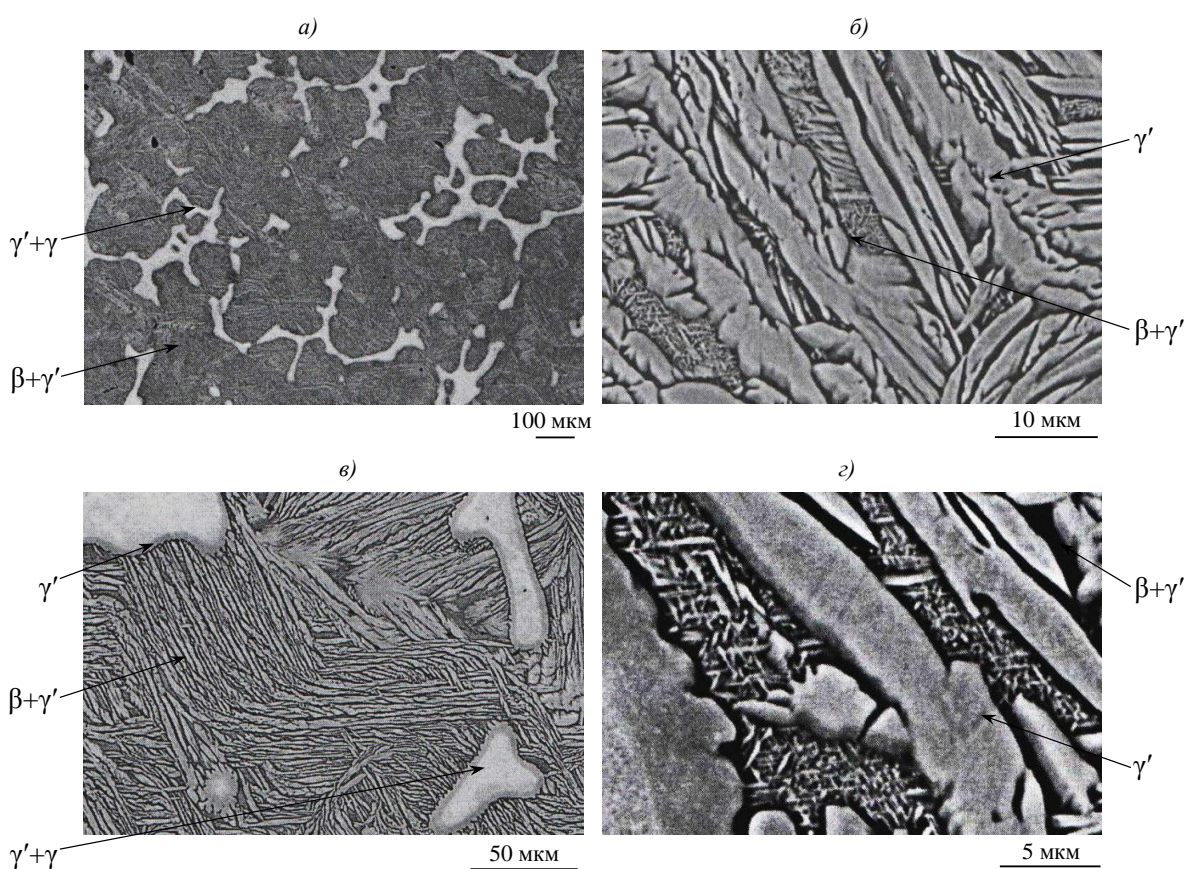


Рисунок 3. Микроструктура интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta после термической обработки по режиму:  $T_S=90^\circ\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением

### ***Исследование механических свойств сплава на основе NiAl после термической обработки***

Проведено исследование влияния режимов термической обработки на кратковременную прочность и пластичность при комнатной температуре и при  $1300^\circ\text{C}$  образцов

из интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co–Ta–Re. Результаты испытаний механических свойств приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Свойства образцов из интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co–Ta–Re**

Режим термической обработки	$\sigma_B^{20^\circ}$ , МПа	$\delta^{20^\circ}$ , %	$\sigma_B^{1300^\circ}$ , МПа
1	637–755	7,8–11,5	9,0–10,5
2	314–471	1,2–3,0	9,5–10,5

Показано, что значения предела прочности и относительного удлинения образцов, термообработанных по режиму 1, значительно превышают показатели образцов, термообработанных по режиму 2, следовательно данный режим термообработки позволяет получить более термостабильную (устойчивую) структуру сплава, работоспособного в большем диапазоне температур.

Микроструктура образца сплава на основе интерметаллида NiAl после механических испытаний при растяжении показана на рис. 4.

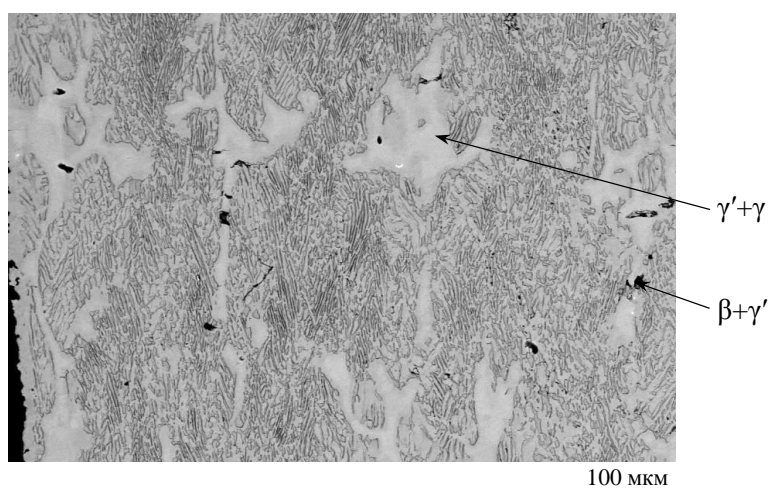


Рисунок 4. Микроструктура образца интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta после испытаний при растяжении

В результате исследования установлено, что разрушение сплава начинается в межосном пространстве на границе эвтектики ( $\gamma'+\gamma$ ) и матрицы с появления микропор в местах образования дислокационных скоплений, возникающих под воздействием приложенного напряжения. В осях дендритов происходит вытягивание частиц  $\gamma'$ -фазы вдоль направления действия растягивающих напряжений.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что термическая обработка по режиму 1 способна повысить механические свойства сплава на основе интерметаллида

NiAl. Это связано со значительным влиянием термической обработки на микроструктуру сплава. Известно, что междендритные области являются основными местами зарождения и распространения трещин вследствие воздействия растягивающих напряжений. Термическая обработка способствует выравниванию грубой дендритной структуры и снижению ликвационной неоднородности, а следовательно, повышению сопротивлению ползучести и увеличению времени до разрушения. При термической обработке по режиму 2 происходит растворение упрочняющей фазы, содержащей Ta, что неблагоприятно сказывается на прочности сплава.

### Обсуждение и заключения

Исследовано влияние различных режимов термической обработки на микроструктуру, прочность и пластичность сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta.

Показано, что микроструктура сплава была улучшена после термической обработки – она стала более однородной благодаря снижению ликвационной неоднородности.

Значения предела прочности и относительного удлинения образцов, термообработанных по режиму 1 ( $T_S=120^\circ\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением), значительно превышают показатели образцов, термообработанных по режиму 2 ( $T_S=90^\circ\text{C}$  в течение 2 ч с последующим старением). Из этого следует, что данный режим термообработки позволяет получить более термостабильную (устойчивую) структуру сплава, работоспособного в более широком диапазоне температур.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
3. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 3–7.
4. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. I //Материаловедение. 1997. №4. С. 32–39.

5. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой Ч. II //Материаловедение. 1997. №5. С. 14–16.
6. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 26–31.
7. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
8. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базылева О.А., Морозова Г.И., Казанская Н.К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  //Металлы. 1999. № 1. С. 58–65.
9. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Интерметаллидные сплавы на основе  $Ni_3Al$  //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 27–29.
10. Bei H., George E.P. Microstructures and mechanical properties of a directionally solidified  $NiAl-Mo$  eutectic alloy //Acta Materialia. 2005. №53. P. 69–77.
11. Tang Lin-zhi, Zhang Zhi-gang, LI Shu-suo, Gong Sheng-kai. Mechanical behaviors of  $NiAl-Cr(Mo)$ -based near eutectic alloy with Ti, Hf, Nb and W additions //Trans. Non-ferrous Met. Soc. 2010. V. 20. P. 212–216.
12. Zhang Yanfang, Li Shusuo, Han Yafang. Effect of yttrium on oxidation behavior of  $Ni_3Al$ -based single crystal alloys //RARE metals. 2011. V. 30. Spec. Issue. P. 538–543.
13. Wufeng D., Tietao Zh., Heli L., Li Shangping, Peiying L. Effects of hafnium and yttrium on the oxidation resistance of  $Ni_3Al/CrMoB$  alloy //Rare Metal Materials and Engineering. 2008. V. 37 (9). P. 1549.
14. Ballard D.L., Pilchak A.L. The use of precious-metal-modified nickel-based superalloys for thin gage applications //JOM. 2010. V. 62. №10. P. 45–47.
15. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов  $\langle 001 \rangle$  высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
16. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базылева О.А., Морозова Г.И., Казанская Н.К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида  $Ni^3Al$  //Металлы. 1999. №1. С. 58–65.
17. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом //МиТОМ. 2002. №7. С. 20–23.

18. Frommeyer G., Rablbauer R. High Temperature Materials Based on the Intermetallic Compound NiAl Reinforced by Refractory Metals for Advanced Energy Conversion Technologies //Steel Research International. 2008. V. 79. P. 507–513.
19. Xie Y., Guo J.T., Liang Y.C., Zhou L.Z., Ye H.Q. Modification of NiAl–Cr(Mo)–0.15Hf alloy by Sc addition //Intermetallics. 2009. №17. P. 400–403.
20. Sajjadi S.A., Zebarjad S.M., Guthrie R.I.L., Isac M. Microstructure evolution of highperformance Ni-base superalloy GTD-111 with heat treatment parameters //Journal of Materials Processing Technology. 2006. V. 175. P. 376–381.
21. He L.Z., Zheng Q., Sun X.F., Guan H.R., Hu Z.Q., Tieu A.K. et al. Effect of heat treatment on microstructures and tensile properties of Ni-base superalloy M963 //Materials Science and Engineering. A. 2005. V. 398. P. 128–136.
22. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Novye materialy dlja perspektivnogo dvigatelja OAO «NPO „Saturn”» [New materials for advanced engine JSC «NPO „Saturn”»] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
3. Gorjunov A.V., Rigin V.E. Sovremennaja tehnologija poluchenija litejnyh zharoprochnyh nikelovyh splavov [Modern technology for producing heat-resistant nickel alloys casting] //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 3–7.
4. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy dlja lit'ja lopatok s napravlennoj i monokristallicheskoj strukturoj [Nickel superalloys for blades casting with directional and single-crystal structure]. Ch. I //Materialovedenie. 1997. №4. С. 32–39.
5. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy dlja lit'ja lopatok s napravlennoj i monokristallicheskoj strukturoj [Nickel superalloys for blades casting with directional and single-crystal structure]. Ch. II //Materialovedenie. 1997. №5. С. 14–16.

6. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Vysokotemperaturnye intermetallidnye splavy dlja detalej GTD [High-temperature intermetallic alloys for GTD parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 26–31.
7. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat-resistant casting intermetallic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 57–60.
8. Kablov E.N., Buntushkin V.P., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Morozova G.I., Kazanskaja N.K. Malolegirovannye legkie zharoprochnye vysokotemperaturnye materialy na osnove intermetallida  $Ni_3Al$  [Low-alloy high-temperature heat-resistant lightweight materials based on the intermetallic  $Ni_3Al$ ] //Metally. 1999. № 1. S. 58–65.
9. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Intermetallidnye splavy na osnove  $Ni_3Al$  [Intermetallic alloys based on  $Ni_3Al$ ] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocchnik. 2012. №5. S. 27–29.
10. Bei H., George E.P. Microstructures and mechanical properties of a directionally solidified NiAl–Mo eutectic alloy //Acta Materialia. 2005. №53. P. 69–77.
11. Tang Lin-zhi, Zhang Zhi-gang, LI Shu-suo, Gong Sheng-kai. Mechanical behaviors of NiAl–Cr(Mo)-based near eutectic alloy with Ti, Hf, Nb and W additions //Trans. Non-ferrous Met. Soc. 2010. V. 20. P. 212–216.
12. Zhang Yanfang, Li Shusuo, Han Yafang. Effect of yttrium on oxidation behavior of  $Ni_3Al$ -based single crystal alloys //RARE metals. 2011. V. 30. Spec. Issue. P. 538–543.
13. Wufeng D., Tietao Zh., Heli L., Li Shangping, Peiying L. Effects of hafnium and yttrium on the oxidation resistance of  $Ni_3Al/CrMoB$  alloy //Rare Metal Materials and Engineering. 2008. V. 37 (9). P. 1549.
14. Ballard D.L., Pilchak A.L. The use of precious-metal-modified nickel-based superalloys for thin gage applications //JOM. 2010. V. 62. №10. P. 45–47.
15. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnyh svojstv monokristallov  $\langle 001 \rangle$  vysokorenievogo nikelovogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v uslovijah vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii [Features of the structure and properties of single crystals of high-temperature  $\langle 001 \rangle$  vysokorenievogo nickel superalloy, obtained with high-gradient directional solidification] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.
16. Kablov E.N., Buntushkin V.P., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Morozova G.I., Kazanskaja N.K. Malolegirovannye legkie zharoprochnye vysokotemperaturnye materialy na

- osnove intermetallida Ni<sub>3</sub>Al [Low-alloy high-temperature heat-resistant lightweight materials based on the intermetallic Ni<sub>3</sub>Al] //Metally. 1999. №1. S. 58–65.
17. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N. Napravlenaja kristalizacija zharoprochnyh splavov s povyshennym temperaturnym gradientom [Directional solidification of superalloys with a high temperature gradient] //MiTOM. 2002. №7. S. 20–23.
  18. Frommeyer G., Rablbauer R. High Temperature Materials Based on the Intermetallic Compound NiAl Reinforced by Refractory Metals for Advanced Energy Conversion Technologies //Steel Research International. 2008. V. 79. P. 507–513.
  19. Xie Y., Guo J.T., Liang Y.C., Zhou L.Z., Ye H.Q. Modification of NiAl–Cr(Mo)–0.15Hf alloy by Sc addition //Intermetallics. 2009. №17. P. 400–403.
  20. Sajjadi S.A., Zebarjad S.M., Guthrie R.I.L., Isac M. Microstructure evolution of highperformance Ni-base superalloy GTD-111 with heat treatment parameters //Journal of Materials Processing Technology. 2006. V. 175. P. 376–381.
  21. He L.Z., Zheng Q., Sun X.F., Guan H.R., Hu Z.Q., Tieu A.K. et al. Effect of heat treatment on microstructures and tensile properties of Ni-base superalloy M963 //Materials Science and Engineering. A. 2005. V. 398. P. 128–136.
  22. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristalizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of gas turbine engine blades with a single-crystal superalloys and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.