

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-112-122

УДК 669.715'24

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni_3Al

О.А. Базылева¹, Э.Г. Аргинбаева¹, М.В. Унчикова², Ю.В. Костенко²

¹ВИАМ, Москва, Российская Федерация
e-mail: lab3@viam.ru; elargin@mail.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: Unchikova_mv@mail.ru; kostenkojulia@list.ru

Показаны преимущества литейных сплавов на основе легированного интерметаллида Ni_3Al по сравнению с никелевыми суперсплавами серии ЖС. Проанализированы особенности легирования и области применения современных монокристаллических сплавов ВКНА-1В и ВКНА-4У, рассмотрены основные технологические операции при изготовлении деталей из указанных сплавов, сопровождающиеся нагревом до 1000...1200 °С. Проведены металлографические и рентгеноструктурные исследования по изучению влияния высокотемпературного отжига на структурно-фазовое состояние сплавов. Установлено, что отжиг в диапазоне температур 1000...1150 °С приводит к дополнительному образованию дисперсных частиц Ni_3Al и увеличению несоответствия параметров кристаллических решеток γ и γ' -фаз, что существенно влияет на длительную прочность сплавов. Выполнен сравнительный анализ изменений структуры и свойств исследуемых сплавов.

Ключевые слова: интерметаллид Ni_3Al , высокотемпературный отжиг, несоответствие параметров кристаллических решеток γ и γ' -фаз, длительная прочность.

EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE ANNEALING ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ni_3Al INTERMETALLIC COMPOUND IN ALLOYS

О.А. Bazyleva¹, E.G. Arginbaeva¹, M.V. Unchikova², Yu.V. Kostenko²

¹All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,
Moscow, Russian Federation
e-mail: lab3@viam.ru; elargin@mail.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: Unchikova_mv@mail.ru; kostenkojulia@list.ru

The article demonstrates advantages of the Ni_3Al intermetallic compound in alloys over the heat-resisting nickel superalloys. The authors analyze both annealing features and application areas of the state-of-the-art VKNA-1B and VKNA-4U monocrystal alloys. The article also discusses the main technological operations conducted during the process of manufacturing some items from these alloys, which involve heating up to 1000...1200 °C. The authors carry out metallographic and X-ray structure analysis studying the effect of high-temperature annealing on the structural and phase state of the alloys. The analysis shows that annealing within the temperature range of 1000...1150 °C leads to formation of disperse Ni_3Al particles

and increases the crystal lattice mismatch of γ and γ' -phases which has considerable impact on the long-term strength of the alloys. The authors perform the comparative analysis of the changes occurred in both the structure and properties of the alloys under consideration.

Keywords: intermetallic compound Ni_3Al , high-temperature annealing, lattice mismatch of γ and γ' -phases, long-term strength.

Сплавы ВКНА, разработанные на основе интерметаллида Ni_3Al , относятся к перспективным жаропрочным материалам нового поколения и являются альтернативой никелевым суперсплавам ЖС6У, ЖС26, ЖС32, превосходя их по жаростойкости, рабочим температурам, удельной прочности [1–4]. Интерметаллидные сплавы применяются для лопаток газовых турбин, элементов камер сгорания, створок регулируемого сопла и других высокотемпературных тонкостенных литых деталей.

Термостабильность интерметаллидных сплавов объясняется [3, 4] близостью состава к эвтектическому γ' - Ni_3Al (до 90 %) + γ -Ni-твердый раствор, что с одной стороны определяет незначительное изменение объема фаз во всем температурном интервале, с другой — решает проблему повышения низкотемпературной пластичности за счет образования прерывистых пластичных γ -прослоек, равномерно распределенных в γ' -матрице и обеспечивающих передачу скольжения дислокаций через границы зерен.

Другая причина повышенной стабильности сплавов ВКНА связана со структурой и свойствами самой фазы Ni_3Al , имеющей, как и все фазы с упорядоченной структурой, положительную температурную зависимость напряжения течения и высокую энергию активации диффузии. В результате для достижения одинакового уровня жаропрочности в сплавах на основе γ' -фазы требуется в 1,8–2,5 раза меньше тугоплавких элементов, чем в никелевых суперсплавах [4], что позволяет считать сплавы ВКНА малолегированными высокотемпературными материалами.

Основные механизмы упрочнения сплавов ВКНА в большинстве случаев аналогичны тем, которые используют в жаропрочных никелевых сплавах, и связаны с формированием металлографической и кристаллографической текстуры, твердорастворным упрочнением и созданием гетерофазной структуры с оптимальным значением несоответствия параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз [5–7].

Установлено [8–10], что уменьшение протяженности поперечных границ в столбчатой структуре или отсутствие их в монокристаллической благоприятно влияют на сопротивление ползучести и длительную прочность. Прочность монокристаллов ориентации $\langle 111 \rangle$ значительно выше по сравнению с монокристаллами ориентации $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$.

Эффективность твердорастворного упрочнения определяется различием в электронном строении и размерах атомов алюминия или

никеля и элементов Cr, Ti, Mo, W, Zr, Co. Чем больше искажение кристаллической решетки Ni_3Al , тем значительнее твердорастворное упрочнение при низких и средних температурах. При температурах $T \geq 0,5T_{пл}$ сопротивление ползучести зависит от интенсивности диффузионных процессов, скорость которых уменьшается при легировании тугоплавкими металлами W, Mo, Ta, Nb [3, 5].

Несоответствие периодов кристаллических решеток (D) γ -твердого раствора (a_γ) и γ' -фазы ($a_{\gamma'}$) относится к структурным параметрам, определяющим высокотемпературные эксплуатационные свойства сплавов [11, 12],

$$D = (a_\gamma - a_{\gamma'})/a_\gamma.$$

Величина D зависит от растворимости легирующих элементов в γ - и γ' -фазах и распределения их по подрешеткам никеля и алюминия в γ' -фазе. Известно [13], что Co, Pt, Cu занимают позиции в центре граней Ni-подрешетки, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Zn — в узлах Al-подрешетки.

В настоящее время разработаны несколько сплавов серии ВКНА, составы которых оптимизированы в целях получения определенной регламентированной литой структуры, а также физико-механических и технологических свойств [14]. Сплав ВКНА-4 предназначен для тяжело нагруженных литых деталей с равноосной структурой, работающих в общеклиматических условиях до $1200^\circ C$, сплав ВКНА-1В — для фасонных деталей с направленной структурой, которые эксплуатируются при $900 \dots 1250^\circ C$ с кратковременными забросами температуры до $1300^\circ C$, сплав ВКНА-4У — для монокристаллических лопаток с кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$ и рабочей температурой до $1200^\circ C$.

Оптимальная с точки зрения жаропрочности структура никелевых суперсплавов окончательно формируется в результате термической обработки, включающей в себя гомогенизацию и старение, общей продолжительностью до $80 \dots 100$ ч [5]. Стабильная структура интерметаллидных сплавов образуется в процессе кристаллизации, что исключает необходимость в проведении упрочняющей термической обработки. Вместе с тем технологический процесс изготовления деталей из сплавов ВКНА включает такие высокотемпературные операции, как отжиг для уменьшения литейных напряжений, пайка, отжиг после нанесения жаростойких покрытий, которые могут сопровождаться изменением структуры и свойств материала [15].

Настоящая работа посвящена сравнительной оценке изменений структурно-фазового состояния монокристаллических сплавов ВКНА-1В и ВКНА-4У в зависимости от режима отжига.

Материал и методика исследований. Сплавы выплавляли в вакуумной индукционной печи [16], мерные шихтовые заготовки переплавляли методом высокоградиентной направленной кристаллизации

на установке УВНС-5 с компьютерным управлением процессом [17]. Для получения монокристаллической структуры с заданной кристаллографической ориентацией использовали затравки из сплава Ni–W, имеющего, как и фаза Ni₃Al, кристаллическую решетку ГЦК. Исследования проводили на цилиндрических образцах с монокристаллической структурой КГО <111>, отклонение от направления роста в которых не превышает 10°. Контроль КГО проводили рентгеноструктурным методом.

Химический состав исследуемых сплавов приведен в таблице. Сплав ВКНА-1В по сравнению с ВКНА-4У является экономно-легированным: в нем отсутствует кобальт, уменьшено содержание молибдена.

Химический состав исследуемых сплавов

Сплав	Содержание легирующих элементов, масс. %						
	Ni	Al	Ti	Cr	Co	W	Mo
ВКНА-1В	Осн.	8...9	3	5...6	–	2...4	2,5...4,5
ВКНА-4У	Осн.	8...9	0,6...1,2	4,5...5,5	3,5...4,5	1,8...2,5	4,5...5,5

Для термической обработки, включающей в себя нагрев до 1000, 1100, 1150, 1200 °С в камерной печи VEBKS400/100 с максимальной рабочей температурой 1350 °С, выдержку в течение 4 ч, охлаждение с печью до 800 °С, далее — на воздухе. Образцы загружались в предварительно разогретую печь с температурой, не превышающей 800 °С.

Шлифы в литом и отожженном состояниях исследовали на оптическом микроскопе Olympus GX 51 и электронном растровом микроскопе JSM-840.

Параметры кристаллических решеток и количество γ' и γ -фаз определяли при комнатной температуре дифрактометрическим методом на установке ДРОН-3М с использованием компьютерной программы “Outset”.

Испытания на длительную прочность проводили на испытательных компьютеризированных стендах ZST2/3–ВИЭТ в соответствии с ГОСТ 10145–81.

Результаты исследований и обсуждение. Сплавы в исходном литом состоянии имеют дендритно-ячеистое строение с крупными первичными выделениями γ' -фазы в междендритных участках. В дендритах частицы Ni₃Al имеют кубическую форму и окружены тонкими прослойками вязкой γ -фазы (рис. 1). Исследования микроструктуры отожженных образцов показали, что при температуре отжига 1200 °С в межсосных участках происходит укрупнение зон γ -твердого раствора (рис. 2).

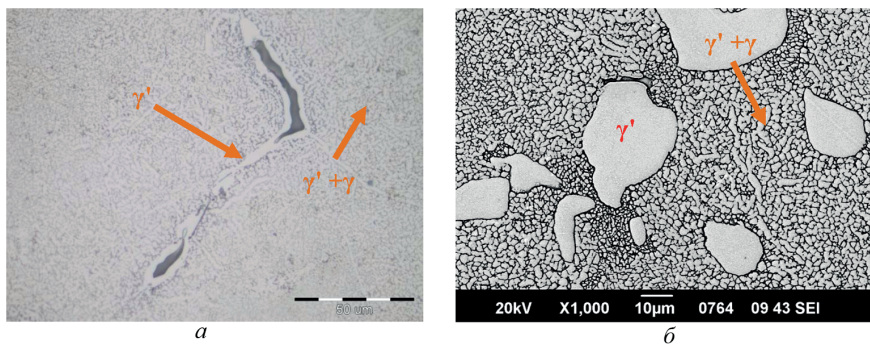


Рис. 1. Микроструктура сплавов в литом состоянии:

a – ВКНА-4У; *б* – ВКНА-1В ($\times 1000$)

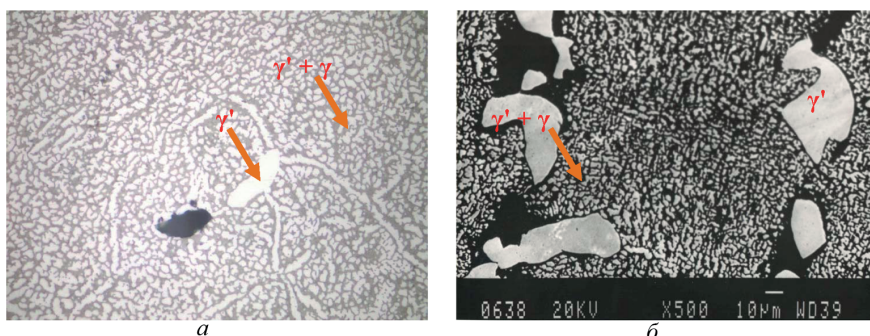


Рис. 2. Микроструктура сплавов после отжига $t = 1200\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 4\text{ ч}$:

a – ВКНА-4У; *б* – ВКНА-1В

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа количество γ' -фазы увеличивается в сплаве ВКНА-1В с 87... 88 % до 90... 93 %, в сплаве ВКНА-4У с 86... 87 % до 89... 90 % (рис. 3). Более активный распад твердого раствора в сплаве ВКНА-1В, очевидно, связан с меньшим содержанием молибдена и кобальта, которые увеличивают энергию активации диффузионных процессов [5].

Перераспределение элементов при распаде твердого раствора привело к увеличению параметра кристаллической решетки γ -твердого раствора как в сплаве ВКНА-1В, так и в ВКНА-4У (рис. 4), причем

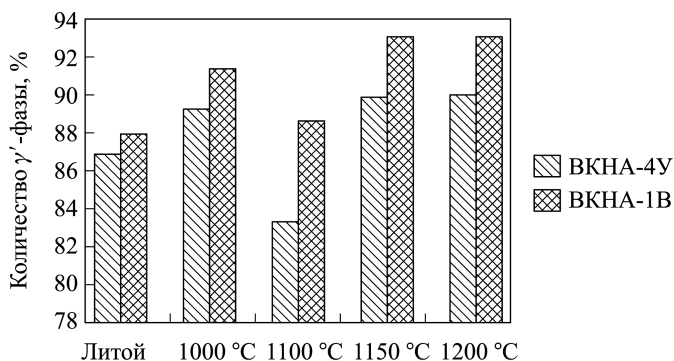


Рис. 3. Влияние температуры отжига на количество γ' -фазы:

1 – ВКНА-4У; *2* – ВКНА-1В

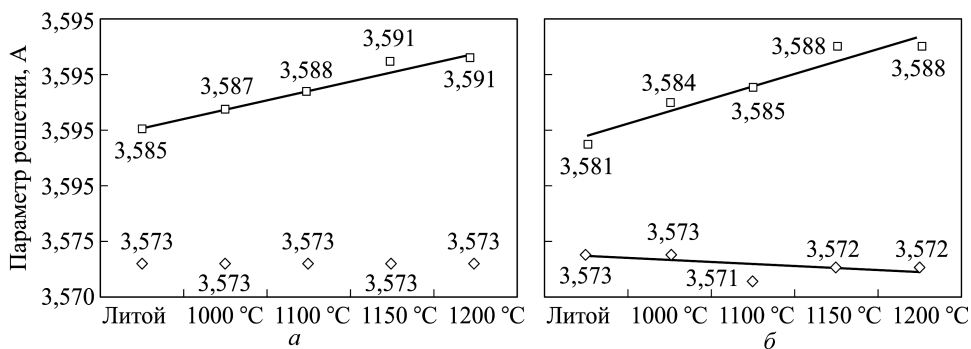


Рис. 4. Зависимость параметров решеток фаз сплавов от температуры отжига:
 а – ВКНА-4У; б – ВКНА-1В: ◇ – ВКНА-4У; □ – ВКНА-1В

более значительное изменение произошло в первом из упомянутых материалов, что хорошо согласуется с предположением о повышенной диффузионной подвижности атомов в этом сплаве. Параметр решетки γ' -фазы в сплаве ВКНА-4У остается неизменным и незначительно снижается в ВКНА-1В, что подтверждает данные о высокой термической стабильности упорядоченных интерметаллидных фаз с ковалентным типом связи.

Полученные данные позволили определить несоответствие параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в исследуемых сплавах в зависимости от температуры отжига. Установлено, что повышение температуры до 1150 °С приводит к увеличению параметра D (рис. 5), значение которого сохраняется постоянным при дальнейшем нагреве до 1200 °С. Согласно выполненным расчетам наиболее существенное изменение указанного параметра произошло в сплаве ВКНА-1В: значение D в сплаве увеличилось от 0,23 до 0,45 %, в ВКНА-4У – от 0,40 до 0,52 %.

Происходящие структурные изменения при отжиге в диапазоне температур 1000...1150 °С благоприятно повлияли на характеристики жаропрочности и привели к двукратному увеличению длительной

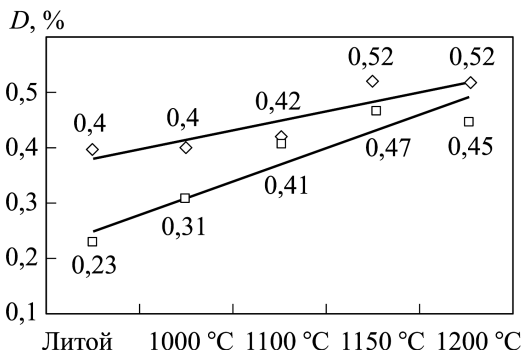


Рис. 5. Зависимость несоответствия параметров кристаллических решеток γ и γ' -фаз от температуры отжига:
 ◇ – ВКНА-4У; □ – ВКНА-1В

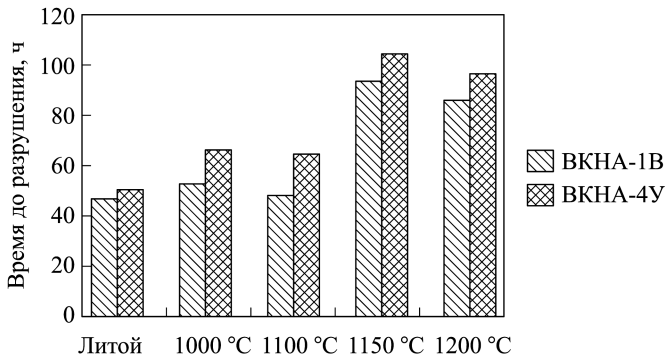


Рис. 6. Зависимость времени до разрушения от температуры отжига при температуре 1000 °С и напряжении 150 МПа

прочности, определяемой временем до разрушения при температуре испытания 1000 °С и напряжениях 150 МПа для сплава ВКНА-1В и 200 МПа — для ВКНА-4У (рис. 6). Приведенные результаты показывают, что сплав ВКНА-4У по сравнению с ВКНА-1В имеет более высокую жаропрочность как в исходном литом состоянии, так и после термической обработки, что может быть связано с большим суммарным содержанием тугоплавких элементов и более высоким абсолютным значением несоответствия параметров кристаллических решеток γ и γ' -фаз в этом сплаве (см. рис. 5).

Уменьшение времени до разрушения в исследуемых сплавах после отжига при 1200, °С предположительно является следствием обеднения поверхности легирующими элементами при окислении.

Выводы. Подтверждена термическая стабильность сплавов ВКНА-1В и ВКНА-4У, сохранивших двухфазную ($\gamma + \gamma'$)-структуру после высокотемпературного отжига.

Установлено, что при отжиге в исследуемых сплавах протекают идентичные количественные изменения фазово-структурного состояния.

Показано, что при отжиге возрастает количество фазы Ni_3Al и происходит увеличение параметра кристаллической решетки γ -твердого раствора при постоянном значении параметра γ' -фазы в сплаве ВКНА-4У и незначительном его уменьшении в сплаве ВКНА-1В.

Увеличение периода решетки γ -твердого раствора приводит к росту несоответствия параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в сплавах, что вместе с выделением γ' -фазы благоприятно влияет на жаропрочность материалов, увеличивая время до разрушения.

Установлено, что в литом состоянии и во всем диапазоне исследуемых температур нагрева несоответствие параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в сплаве ВКНА-4У, дополнительно легированном молибденом и кобальтом, больше, что объясняет его повышенную жаропрочность по сравнению с ВКНА-1В.

Экспериментально подтверждено большее количество упорядоченной γ' -фазы в сплаве ВКНА-1В, вследствие чего рабочая температура сплава на 50 °С выше, чем у сплава ВКНА-4У.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы*. № 8. 2012. С. 36–51.
2. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al — перспективный материал для лопаток турбин / Е.Н. Каблов, Б.С. Ломберг, В.П. Бунтушкин, Е.Р. Голубовский, С.А. Мубояджян // *МиТОМ*. 2002. № 7. С. 16–19.
3. Каблов Е.Н., Базылева О.А., Воронцов М.А. Новая основа для создания литейных высокотемпературных жаропрочных сплавов // *МиТОМ*. 2006. № 8. С. 21–25.
4. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 8. С. 57–60.
5. Поварова К.Б. Физико-химические принципы создания термически стабильных сплавов на основе переходных металлов // *Материаловедение*. 2007. № 12. С. 20–27.
6. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al / Е.Н. Каблов, В.П. Бунтушкин, К.Б. Поварова, О.А. Базылева, Г.И. Морозова, Н.К. Казанская // *Металлы*. 1999. № 1. С. 58–65.
7. Конструкционные жаропрочные сплавы на основе Ni_3Al : получение, структура, свойства / К.Б. Поварова, О.А. Базылева, А.А. Дроздов, Н.К. Казанская, А.Е. Морозов, М.А. Самсонова // *Материаловедение*. 2011. № 4. С. 39–48.
8. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Петрушин Н.В., Моисеева Н.С. Мисфит как характеристика уровня межфазных напряжений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах // *Металлы*. 2011. № 3. С. 71–77.
9. Аргинбаева Э.Г. Влияние легирования, технологий литья и термической обработки на структуру и свойства интерметаллидных сплавов на основе никеля. Автореф. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 2015. 26 с.
10. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г. Исследование структуры и физико-механических свойств интерметаллидных никелевых сплавов с разной кристаллографической ориентацией // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 4. С. 14–19.
11. Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Физико-химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов // *Металлы*. 2001. № 2. С. 63–73.
12. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Мисфит как источник и критерий работоспособности жаропрочных никелевых сплавов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013. Т. 79. № 6. С. 33–36.
13. Enomoto M., Harada. Analysis of γ/γ' Equilibrium in Ni-Al-X Alloys by the Cluster Variation Method with the Lennard-Jones Potential // *Metallurgical Transactions*. 1989. Vol. 20A. No. 4. P. 649–664.
14. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением / Ю.Р. Колобов, Е.Н. Каблов, Э.В. Козлов, Н.А. Конева, К.Б. Поварова, Г.П. Грабовецкая, В.П. Бунтушкин, О.А. Базылева, С.А. Мубояджян, С.А. Будинковский. М.: Издательский Дом МИСиС, 2008. 328 с.
15. Базылева О.А., Бондаренко Ю.А., Морозова Г.И., Тимофеева О.Б. Структура, химический и фазовый составы интерметаллидного сплава ВКНА-1В после высокотемпературных термических обработок и технологических нагревов // *МиТОМ*. 2014. № 5. С. 3–6.

16. Горюнов А.В., Ризин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2. С. 3–7.
17. 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

- [1] Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Ni-base casting superalloy of the new generation. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 8, pp. 36–51 (in Russ.).
- [2] Kablov E.N., Lomborg B.S., Buntushkin V.P., Golubovskiy E.R., Muboyazhdyan S.A. Single crystal rhenium-containing nickel alloys for turbine engine blades. *Metallovedenie i tekhnicheskaya obrabotka* [Metal Science and Heat Treatment], 2002, no. 7, pp. 16–19 (in Russ.).
- [3] Kablov E.N., Bazyleva O.A., Vorontsov M.A. Novel foundations for development of castable high-temperature superalloys. *Metallovedenie i tekhnicheskaya obrabotka* [Metal Science and Heat Treatment], 2006, no. 8, pp. 21–25 (in Russ.).
- [4] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Turenko E.Yu. High-temperature casting intermetallic alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 8, pp. 57–60 (in Russ.).
- [5] Povarova K.B. Physico-Chemical Principles of Obtaining the Thermally Stable Alloys Based on Transition Metals. *Materialovedenie* [J. of Materials Science], 2007, no. 12, pp. 20–27 (in Russ.).
- [6] Kablov E.N., Buntushkin V.P., Povarova K.B. Bazyleva, O.A., Morozova G.I., Kazanskaya N.K. The Low-Alloyed Heat-Resistant High-Temperature Lightweight Materials Based on the Intermetallic Compound Ni₃Al. *Metally* [Russ. Metall. (Engl. Transl.)], 1999, no. 1, pp. 58–65.
- [7] Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Kazanskaya N.K., Morozov A.E., Samsonova M.A. Structural Superalloys Based on Ni₃Al: Alloying, Structure, Properties. *Materialovedenie* [J. of Materials Science], 2011, no. 4, pp. 39–48 (in Russ.).
- [8] Samoylov A.I., Nazarkin R.M., Petrushin N.V., Moiseeva N.S. Misfit as a Characteristic of the Interfacial Stress Level in Single-Crystal High-Temperature Nickel Alloys. *Metally* [Russ. Metall. (Engl. Transl.)], 2011, no. 3, pp. 71–77.
- [9] Arginbaeva E.G. Vliyanie legirovaniya, tekhnologiy lit'ya i termicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva intermetallidnykh splavov na osnove nikelya. Avtoreferat diss. kand.tekhn. nauk [Effect of Alloying, Casting Technology and Heat Treatment on the Structure and Properties of Intermetallic Alloys Based on Nickel. Cand. tech. sci. diss. abstr.]. Moscow, 2015. 26 p.
- [10] Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A. The research the structure, physical and mechanical properties of the intermetallic nickel alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2013, no. 4, pp. 14–19 (in Russ.).
- [11] Petrushin N.V., Svetlov I.L. Fiziko-khimicheskie i strukturnye kharakteristiki zharoprochnykh nikelovykh splavov. *Metally* [Russ. Metall. (Engl. Transl.)], 2001, no. 2, pp. 63–73.
- [12] Samoylov A.I., Nazarkin R.M., Moiseeva N.S. Misfit as the Source and Criterion of Efficiency of Heat-Resistant Nickel Alloys. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Material Diagnostics.], 2013, vol. 79, no. 6, pp. 33–36 (in Russ.).

- [13] Enomoto M., Harada. Analysis of γ/γ' Equilibrium in Ni-Al-X Alloys by the Cluster Variation Method with the Lennard-Jones Potential. *Metallurgical Transactions*, 1989, vol. 20A, no. 4, pp. 649–664.
- [14] Kolobov Yu.R., Kablov E.N., Kozlov E.V., Koneva N.A., Povarova K.B., Grabovetskaya G.P., Buntushkin V.P., Bazyleva O.A., Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. Структура и свойства интерметаллических материалов с нанозатверждением [The Structure and Properties of Intermetallic Materials with Nanophase Hardening]. Moscow, Izdatel'skiy Dom MISiS Publ., 2008. 328 p.
- [15] Bazyleva O.A., Bondarenko Yu.A., Morozova G.I., Timofeeva O.B. Structure and chemical and phase compositions of intermetallic alloy VKNA-1V after high-temperature heat treatment and process heating. *Metallovedenie i tekhnicheskaya obrabotka* [Metal Science and Heat Treatment], 2014, no. 5, pp. 3–6 (in Russ.).
- [16] Goryunov A.V., Rigin V.E. The modern technology of cast nickel base superalloys production. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. 2, pp. 3–7 (in Russ.).
- [17] Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. Advancement of the directional crystallization process of GTE blades of superalloys with the single-crystal and composition structures. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 1, pp. 3–8 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.04.2015

Базылева Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории “Жаропрочные сплавы на никелевой основе” Всероссийского института авиационных материалов (ВИАМ).

Всероссийский институт авиационных материалов, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17.

Bazyleva O.A. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist, Deputy Head of the Laboratory Heat-resistant nickel-based alloys, All-Russian Research Institute of Aviation Materials (VIAM).

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation.

Аргинбаева Эльвира Гайсаевна — канд. техн. наук, и.о. начальника сектора “Жаропрочные литейные интерметаллические сплавы” лаборатории “Жаропрочные сплавы на никелевой основе” Всероссийского института авиационных материалов (ВИАМ).

Всероссийский институт авиационных материалов, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17.

Arginbaeva E.G. — Cand. Sci. (Eng.), acting Head of the Sector Heat-resistant casting intermetallic alloys, the Laboratory Heat-resistant nickel-based alloys, All-Russian Research Institute of Aviation Materials (VIAM).

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation.

Унчикова Марина Васильевна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Unchikova M.V. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Materials Science department, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Костенко Юлия Вячеславовна — студентка кафедры “Материаловедение” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kostenko Yu.V. — student of Materials Science department, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Унчикова М.В., Костенко Ю.В. Влияние высокотемпературного отжига на структуру и свойства сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 1. С. 112–122. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-112-122

Please cite this article in English as:

Bazyleva O.A., Arginbayeva E.G., Unchikova M.V., Kostenko Yu.V. Effect of high-temperature annealing on structure and properties of Ni_3Al intermetallic compound in alloys. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no.1, pp. 112–122. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-112-122