

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ*

Приведены результаты исследований анизотропии прочностных характеристик и микроструктуры интерметаллидных сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25, отлитых с монокристаллической структурой разных кристаллографических ориентаций (КГО). Интерес представляют сравнительные исследования рассмотренных интерметаллидных сплавов – экономнолегированного высокотемпературного ВКНА-1В с рабочей температурой до 1250°C и жаропрочного ренийсодержащего ВКНА-25 с рабочей температурой до 1200°C. Установлено, что выбор КГО обусловлен условиями эксплуатации конкретной детали. Таким образом, у конструкторов появилась возможность выбора не только материала, но и технологии его производства, которая обеспечивала бы оптимальные значения физико-механических свойств.

Переход с серийных жаропрочных никелевых сплавов на интерметаллидные с низкой плотностью серии ВКНА позволит повысить рабочую температуру на 50–100°C и весовую отдачу двигателя, снизить эмиссию – выбросы CO_x, NO_x, а также снизить стоимость шихтовой заготовки на 25–30%.

Ключевые слова: ВКНА, монокристаллические заготовки, кристаллографическая ориентация (КГО), микроструктура, интерметаллид Ni₃Al, модуль упругости, длительная прочность.

THE RESEARCH THE STRUCTURE, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE INTERMETALLIC NICKEL ALLOYS

Results of research of strength properties anisotropy and microstructure of single-crystal intermetallic alloys VKNA-1V and VKNA-25 with different crystallographic orientations, are described.

Of interest are the comparative research intermetallic alloys – low alloyed high-temperature VKNA-1V, with working temperatures up to 1250°C and heat-resisting rhenium-containing VKNA-25 with working temperatures up to 1200°C.

It is established that the choice of crystallographic orientation due to working conditions of specific engine parts. Thus, the designer can choose as the material as its production technology, which would provide optimum physical and mechanical properties.

The replacement standard superalloys by intermetallic nickel alloys with low-density series VKNA will increase working temperature at 50–100°C and weight engine efficiency, reduce emissions of CO_x, NO_x, as well as reduce the cost of batch ingots on 25–30%.

Keywords: VKNA, single-crystal bars, crystallographic orientation, microstructure, intermetallic compound Ni₃Al, elastic modulus, high-temperature strength.

¹ 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

Эффективность газотурбинных двигателей определяется параметрами рабочего процесса. Одним из факторов, характеризующих уровень эффективности двигателя, является температура газа перед турбиной. Ее повышение приводит к увеличению тяги, а следовательно, к снижению удельной массы двигателя. Рост температуры перед турбиной при одновременном увеличении суммарной степени повышения давления позволяет получить не только высокие значения удельной тяги, но и низкие значения удельного расхода топлива [1].

* В работе принимали участие В.Г. Колодочкина и Р.Р. Байрамуков.

Повышение КПД двигателя возможно при условии увеличения полноты сгорания топлива, т. е. повышения рабочей температуры камеры сгорания.

Успешное решение задачи по созданию перспективной конструкции газотурбинного двигателя невозможно без применения новых материалов и технологий изготовления.

Требования, предъявляемые моторостроительными предприятиями к материалам для горячей части газоздушного тракта: рабочие температуры до 1250°C, высокая жаростойкость и технологичность, относительно малая плотность в сочетании с низкой стоимостью. Таким требованиям отвечают интерметаллидные сплавы, в которых количество γ' -фазы (Ni_3Al) составляет до 95%, как альтернатива применяемым никелевым сплавам, содержащим до 70% упрочняющей γ' -фазы. Интерметаллидные сплавы на основе Ni_3Al благодаря химическому и фазовому составам имеют повышенные по сравнению с жаропрочными никелевыми сплавами рабочую температуру (до 1200–1250°C) и жаростойкость, низкую стоимость. Эти сплавы в меньшей степени легированы тяжелыми тугоплавкими элементами и, как следствие, обладают более высокими значениями удельной жаропрочности [2–5].

С целью расширения областей применения литейных жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al типа ВКНА в перспективных авиационных двигателях и установления ресурса работы узлов и деталей, изготовленных из этих материалов, исследована анизотропия комплекса физико-механических свойств.

Материалы и методика исследования

В качестве материалов (объектов) исследований использовали цилиндрические заготовки образцов из интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al с монокристаллической структурой кристаллографических ориентаций (КГО) $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Выплавку прутковых (шихтовых) заготовок исследуемых интерметаллидных сплавов проводили вакуумным индукционным (ВИ) методом в вакуумной индукционной печи при давлении в плавильной камере 5,33 Па (40 мкм рт. ст.), температуре слива металла $T_{\text{сл.Ме}} = T_L + (120 \div 130)^\circ\text{C}$. Для последующей операции прутковые заготовки шлифовали на глубину 2–3 мм для снятия слоя, контактирующего с чугунами кокилями, и разрезали на мерные заготовки массой ~3,5 кг.

Химический состав интерметаллидных сплавов определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL4460; содержание углерода, серы, кислорода и азота – на газоанализаторе ТС-600.

Монокристаллические заготовки под образцы для определения физико-механических характеристик интерметаллидных сплавов серии ВКНА отливали на установке высокоградиентной направленной кристаллизации УВНС-5 с компьютерным управлением процессом [6–8]. Кристаллографическая ориентация (КГО) литых заготовок задается КГО монокристаллических затравок.

Макроструктуру полученных заготовок выявляли травлением в специально подготовленной смеси концентрированной соляной кислоты и перекиси водорода. После визуального контроля монокристаллические заготовки каждой из заданных ориентаций направляли на рентгеноструктурный контроль.

Рентгеносъемку стартовых конусов осуществляли на поперечных шлифах с помощью дифрактометра ДРОН-3 по разработанной методике. По результатам рентгеносъемки годными по ориентации считаются заготовки образцов, у которых стартовые конуса имеют угол отклонения (α) требуемого кристаллографического направления от вертикальной оси заготовки не более 10 град, отсутствуют большеугловые границы, однако имеются малоугловые границы, разделяющие блоки структуры. Допускаемая максимальная разориентация между блоками ($\Delta\alpha$) в заготовках под образцы из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 составляла ≤ 2 –3 град. Таким образом, определено отклонение

каждой монокристаллической заготовки под образцы от заданного направления $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ или $\langle 111 \rangle$. Годные монокристаллические заготовки, удовлетворяющие условиям $\alpha \leq 10$ град, $\Delta \alpha \leq 2-3$ град, переданы на изготовление образцов для испытаний физико-механических свойств интерметаллидных сплавов серии ВКНА.

Микроструктуру исследуемых интерметаллидных сплавов анализировали на растровом микроскопе JSM-840 в поперечном сечении цилиндрической заготовки образца.

Статические испытания на растяжение с определением предела кратковременной прочности в соответствии с требованиями ГОСТ 1497 «Металлы. Методы испытания на растяжение» и ГОСТ 9651 «Металлы. Методы испытания на растяжение при повышенных температурах» на испытательных машинах ИР-5113 и времени до разрушения в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 «Металлы. Метод испытания на длительную прочность» проводили на компьютеризированных стендах ZST2/3-ВИЭТ.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследование микроструктуры интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al показало, что независимо от кристаллографической ориентации монокристаллическая заготовка имеет дендритно-ячеистое строение, оси дендритов состоят на 80–85% (по массе) из интерметаллида Ni_3Al (γ' -фаза), разделенного пластичными прослойками твердого раствора на основе никеля (γ -фаза); межосное пространство заполнено γ' -фазой. Пересыщенность твердого раствора γ' -фазы в составе сплава ВКНА-25 привело к тому, что в межосном пространстве на подложке из γ' -фазы также находится метастабильная интерметаллидная фаза с повышенным содержанием Al (рис. 1) [9]. Морфология γ' -фазы в осях дендритов изменяется в зависимости от КГО: для кристаллографической ориентации $\langle 001 \rangle$ она имеет форму квадрата, для КГО $\langle 111 \rangle$ – форму треугольника (рис. 1 и 2, б, в).

Свойства монокристаллических интерметаллидных, как и никелевых, сплавов определяются упругими характеристиками кристаллической решетки матрицы сплава в кристаллографических направлениях $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ [10, 11].

Испытания при растяжении с определением статического модуля упругости при температурах 20, 800, 900 и 1000°C интерметаллидных сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 в сравнении со значениями модуля упругости чистого соединения Ni_3Al подтвердили тенденцию поведения интерметаллида: при КГО $\langle 111 \rangle$ значения модуля упругости стабильно максимальные, при КГО $\langle 001 \rangle$ – минимальные (рис. 3) [12, 13]. Снижение значений статического модуля упругости при повышении температуры от 20 до 1000°C связано, по-видимому, с увеличением межатомного расстояния при повышении температуры. Причем для сплава ВКНА-25 значения модуля упругости при кристаллографических ориентациях $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ стабильно выше аналогичных показателей сплава ВКНА-1В, а также чистого Ni_3Al . Эти результаты можно объяснить особенностями химических составов и влиянием степени легирования на упругие характеристики рассматриваемых сплавов. Рений, содержащийся в сплаве ВКНА-25 и упрочняющий γ' -фазу, предположительно вносит изменения в кристаллическую решетку и создает упругие напряжения.

Поведение интерметаллидных сплавов при растяжении показало, что комплексное воздействие перехода к более сложному кристаллографическому направлению от $\langle 001 \rangle$ к $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ и дополнительного легирования матрицы сплава способствует большему влиянию на значения статического модуля упругости и его отклонению от кривой значений для чистого соединения Ni_3Al .

Отмечено, что значения кривой статического модуля упругости для интерметаллидных сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 с КГО $\langle 001 \rangle$ практически идентичны с аналогичной кривой для чистого соединения Ni_3Al , предположительно при эксплуатации сплава ВКНА-1В с КГО $\langle 001 \rangle$ возникнут наименьшие термические напряжения.

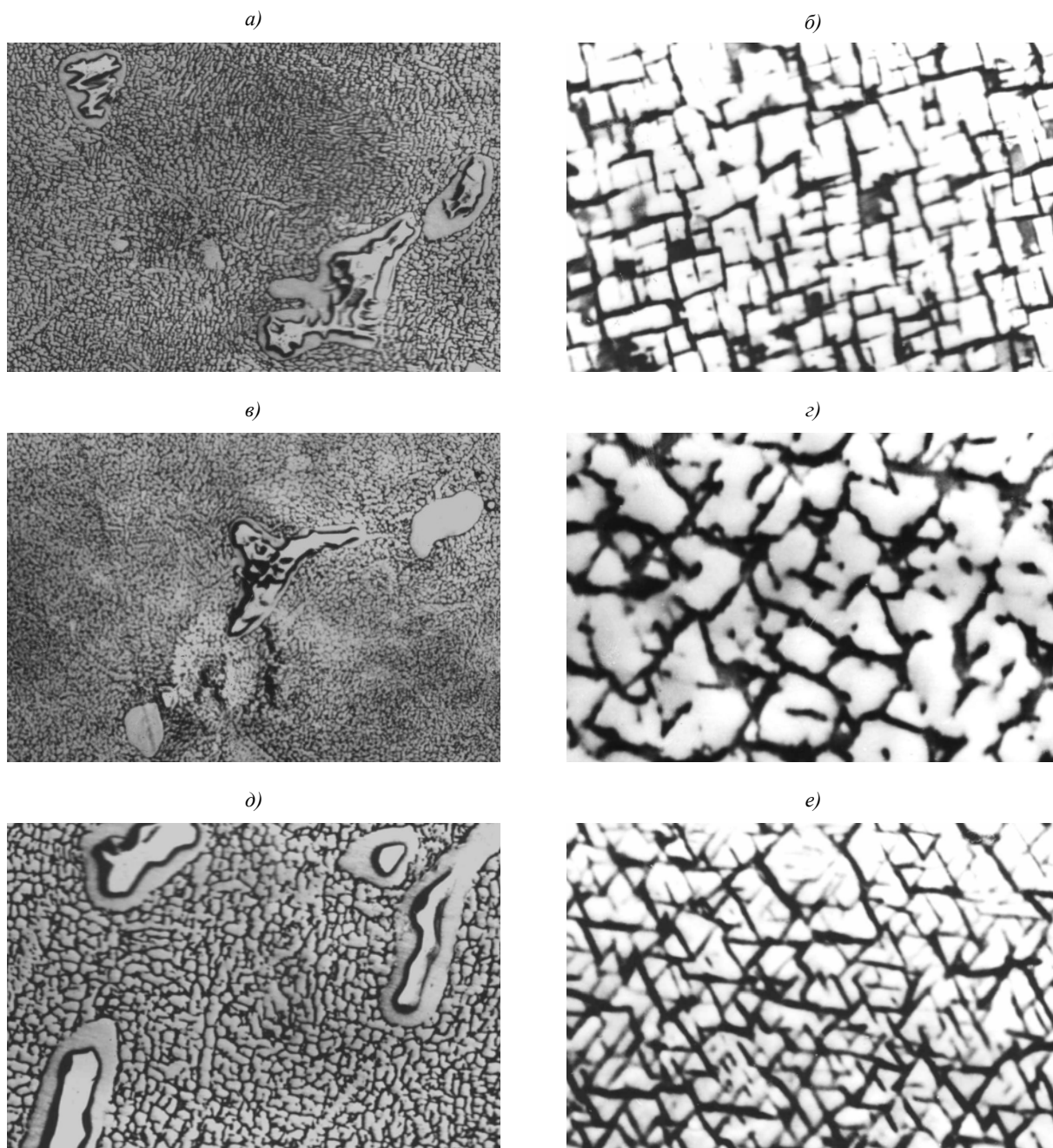


Рис. 1. Микроструктура (*a, в, д* – $\times 500$; *б, з, e* – $\times 10000$) интерметаллического сплава ВКНА-25 с КГО $\langle 001 \rangle$ (*a, б*), $\langle 011 \rangle$ (*в, з*), $\langle 111 \rangle$ (*д, e*)

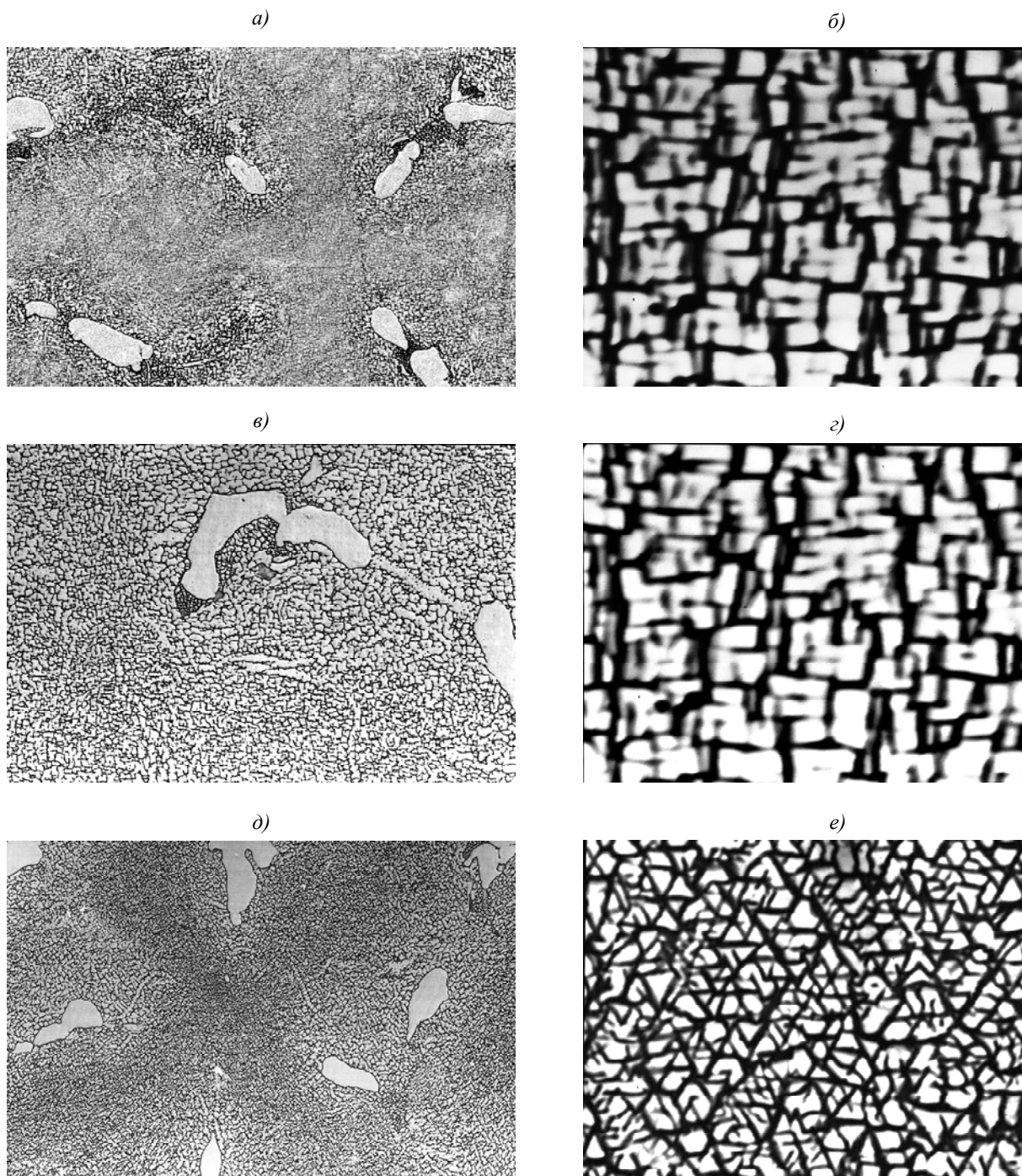


Рис. 2. Микроструктура (*a, в, д* – $\times 500$; *б, г, е* – $\times 10000$) интерметаллидного сплава ВКНА-1В с КГО $\langle 001 \rangle$ (*a, б*), $\langle 011 \rangle$ (*в, г*), $\langle 111 \rangle$ (*д, е*)

Результаты испытаний интерметаллидных сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 подтверждают поведение монокристаллов жаропрочных сплавов при испытаниях на длительную прочность: максимальные значения имеют образцы с КГО $\langle 111 \rangle$, минимальные – с КГО $\langle 001 \rangle$, с КГО $\langle 011 \rangle$ – занимают промежуточное положение (рис. 4).

Установлено, что сплав ВКНА-25 с КГО $\langle 001 \rangle$ при температуре 1100°C на базах испытаний >500 ч имеет значения длительной прочности, близкие к значениям для сплава ВКНА-1В с КГО $\langle 111 \rangle$, при температуре 1150°C – близкие к значениям для сплава ВКНА-1В с КГО $\langle 011 \rangle$.

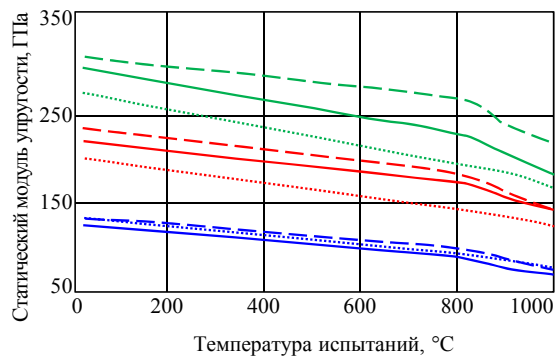


Рис. 3. Статический модуль упругости сплавов ВКНА-25 (---) и ВКНА-1В (—), Ni₃Al (.....) с КГО <001> (—), <011> (—), <111> (—)

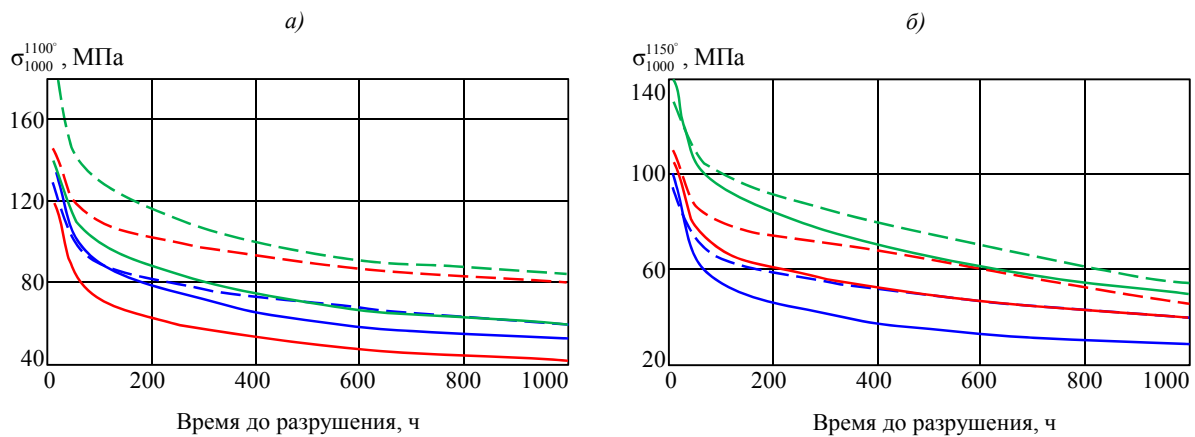


Рис. 4. Длительная прочность сплавов ВКНА-25 (---) и ВКНА-1В (—) с КГО <001> (—), <011> (—), <111> (—) при температуре испытаний 1100 (а) и 1150°C (б)

Сравнительный анализ результатов определения длительной прочности при температурах 1100–1150°C показал, что при 1100°C упрочнение сплавов достигается благодаря твердорастворному упрочнению и формированию макроструктуры типа «паркетная структура», которая, образуясь при ползучести монокристалла <111>, ограничивает движение дислокаций [14]; при температуре 1150°C – благодаря формированию макроструктуры, легированию «тяжелыми» тугоплавкими элементами, снижающими диффузионные процессы, и наличию упорядоченной структуры.

Таким образом, микроструктура интерметаллидных сплавов серии ВКНА имеет дендритно-ячеистое строение: оси дендритов на 80–85% (по массе) состоят из интерметаллида Ni₃Al (γ'-фаза), разделенного прослойками твердого раствора на основе никеля (γ-фаза). В межосном пространстве у сплава ВКНА-25 в отличие от сплава ВКНА-1В кроме γ'-фазы наблюдается фаза с повышенным содержанием Al.

В исследуемом температурном диапазоне при кристаллографических ориентациях <011> и <111> значения модуля упругости сплава ВКНА-25 стабильно выше аналогичных показателей сплава ВКНА-1В, а также чистого Ni₃Al. Предположительно при эксплуатации сплава ВКНА-1В с КГО <001> возникнут меньшие термические напряжения.

Комплексное воздействие кристаллографической ориентации, а также дополнительное легирование матрицы интерметаллидного сплава оказывают большее влияние на значения статического модуля упругости и его отклонения от значений Ni₃Al.

Максимальные значения длительной прочности при температурах 1100 и 1150°C

имеют образцы сплава ВКНА-25 с КГО <111>, минимальные – сплава ВКНА-1В с КГО <001>.

Таким образом, оптимальное сочетание эксплуатационных свойств деталей ГТД может быть подобрано конструкторами при выборе не только материала, но и технологий его производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скибин В.А. Научный вклад в создание авиационных двигателей. М.: Машиностроение. 2000. Т. 2. 750 с.
2. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
3. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Интерметаллидные сплавы на основе Ni_3Al //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 27–29.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №2. С. 13–19.
5. Поварова К.Б., Базылева О.А., Казанская Н.К., Дроздов А.А. и др. Конструкционные жаропрочные сплавы на основе Ni_3Al : получение, структура и свойства //Материаловедение. 2011. №4. С. 39–48.
6. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
7. 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.
8. Бондаренко Ю.А., Базылева О.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. Высокоградиентная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В //Литейное производство. 2012. №6. С. 12–16.
9. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов //МиТОМ. 2012. №12. С. 52–58.
10. Бадамшин И.Х., Кусова О.И. Температурная зависимость модуля упругости интерметаллидов $TiAl$ и Ni_3Al – основных компонентов сплавов лопаток газовых турбин //Авиационная и ракетно-космическая техника. 2012. №5. С. 41–43.
11. Бадамшин И.Х. Прочность элементов конструкций из эвтектических композитов на основе электростатической природы упругости: Автореф. дис. д.т.н. 2010. 35 с.
12. Базылева О.А., Бондаренко Ю.А., Тимофеева О.Б., Хвацкий К.К. Влияние кристаллографической ориентации на структуру и физико-механические свойства интерметаллидного сплава ВКНА-1В //Металлургия машиностроения. 2012. №4. С. 8–12.
13. Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А., Колодочкина В.Г., Хвацкий К.К. Влияние кристаллографической ориентации на структуру и физико-механические свойства интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al //Авиационные материалы и технологии. 2013 (в печати).
14. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л. Температурно-временная зависимость анизотропии характеристик длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов //Проблемы прочности. 2002. №2. С. 5–19.

REFERENS LIST

1. Skibin V.A. Nauchnyj vklad v sozdanie aviacionnyh dvigatelej [Scientific contribution to creation of aviation engines]. M.: Mashinostroenie. 2000. T. 2. 750 s.
2. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat resisting foundry intermetallic alloys] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
3. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Intermetallidnye splavy na osnove Ni_3Al [Intermetallic alloys on the basis of Ni_3Al] //Все материалы. Jenciklopedicheskiy spravochnik. 2012. №5. С. 27–29.

4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteplo-nagruzhennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for high-heat – the loaded details of gas-turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №2. S. 13–19.
5. Povarova K.B., Bazyleva O.A., Kazanskaja N.K., Drozdov A.A. i dr. Konstrukcionnye zharoprochnye splavy na osnove Ni_3Al : poluchenie, struktura i svojstva [Constructional heat-resisting alloys on the basis of Ni_3Al : receiving, structure and properties] //Materialovedenie. 2011. №4. S. 39–48.
6. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnykh svojstv monokristallov $\langle 001 \rangle$ vysokorenievogo nikeljevogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v uslovijah vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii [Features of structure and heat-resisting properties of monocrystals of $\langle 001 \rangle$ high-rhenium nickel heat-resisting alloys received in the conditions of high-gradient directed crystallization] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.
7. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnykh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [Development of process of the directed crystallization of shovels of GTD from heat-resisting alloys with single-crystal and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
8. Bondarenko Ju.A., Bazyleva O.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskij A.R. Vysokogradientnaja napravlenaja kristallizacija detalej iz splava VKNA-1V [The high-gradient directed crystallization of details from VKNA-1V alloy] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №6. S. 12–16.
9. Morozova G.I. Kompensacija disbalansa legirovanija zharoprochnykh nikeljevych splavov [Compensation of an imbalance of an alloying of heat resisting nickel alloys] //MiTOM. 2012. №12. S. 52–58.
10. Badamshin I.H., Kusova O.I. Temperaturnaja zavisimost' modulja uprugosti intermetallidov TiAl i Ni_3Al – osnovnyh komponentov splavov lopatok gazovyh turbin [Temperature dependence of the module of elasticity intermetallic TiAl and Ni_3Al – the main components of alloys of shovels of gas turbines] //Aviacionnaja i raketno-kosmicheskaja tehnika. 2012. №5. S. 41–43.
11. Badamshin I.H. Prochnost' jelementov konstrukcij iz jevtekticheskikh kompozitov na osnove jelektrostaticheskoj prirody uprugosti [Strength of structural elements from the eutectic composites on the basis of the electrostatic nature of elasticity]: Avtoref. dis. d.t.n. 2010. 35 s.
12. Bazyleva O.A., Bondarenko Ju.A., Timofeeva O.B., Hvackij K.K. Vlijanie kristallograficheskoj orientacii na strukturu i fiziko-mehaničeskie svojstva intermetallidnogo splava VKNA-1V [Influence of crystallographic orientation on structure and physico-mechanical properties of an intermetallic alloy of VKNA-1V] //Metallurgija mashinostroenija. 2012. №4. S. 8–12.
13. Arginbaeva Je.G., Bazyleva O.A., Kolodochkina V.G., Hvackij K.K. Vlijanie kristallograficheskoj orientacii na strukturu i fiziko-mehaničeskie svojstva intermetallidnogo splava na osnove Ni_3Al [Influence of crystallographic orientation on structure and physico-mechanical properties of an intermetallic alloy on the basis of Ni_3Al] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013 (v pečati).
14. Golubovskij E.R., Svetlov I.L. Temperaturno-vremennaja zavisimost' anizotropii harakteristik dlitel'noj prochnosti monokristallov nikeljevych zharoprochnykh splavov [Temperature and time dependence of anisotropy of characteristics of long durability of monocrystals of nickel heat resisting alloys] //Problemy prochnosti. 2002. №2. S. 5–19.