

Э.Г. Аргинбаева¹, О.А. Базылева¹, В.Г. Колодочкина¹, К.К. Хвацкий¹

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni₃Al

Представлены результаты исследования монокристаллических заготовок образцов интерметаллидного сплава типа ВКНА с различной кристаллографической ориентацией (КГО). Выявлено влияние кристаллографических ориентаций <001>, <011> и <111> на микроструктуру, модуль упругости, пределы кратковременной прочности и текучести, длительную прочность.

Установлено, что выбор КГО обусловлен условиями эксплуатации конкретной детали. Таким образом, конструкторы имеют возможность выбора не только материала, но и технологии его производства, которая обеспечивала бы максимальные значения физико-механических свойств.

Применение интерметаллидных материалов с низкой плотностью типа ВКНА позволит снизить массу деталей на 10–15%, трудоемкость их изготовления, повысить рабочую температуру на 50–100°C, увеличить срок службы сопловых лопаток в ~3 раза, дисков – в 1,5–2 раза, также снизить стоимость шихтовой заготовки по сравнению с серийными жаропрочными сплавами на 25–30%.

Ключевые слова: ВКНА, монокристаллические заготовки, кристаллографическая ориентация (КГО), микроструктура, интерметаллид Ni₃Al, модуль упругости, предел кратковременной прочности, предел текучести, относительное удлинение, длительная прочность.

E.G. Arginbaeva¹, O.A. Bazyleva¹, V.G. Kolodochkina¹, K.K. Khvatsky¹

THE INFLUENCE OF CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATION ON STRUCTURE, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF INTERMETALLIC ALLOYS BASED ON Ni₃Al

The article presents the results of study of single-crystal samples of VKNA-type intermetallic alloy with different crystallographic orientations (CGO). The effect of crystallographic orientation <001>, <011> and <111> on microstructure, elastic modulus, tensile strength, yield strength and rupture strength.

It was stated that the choice of the CGO depends on working conditions of each specific part. Accordingly, aircraft designer may choose not only materials, but also production technologies, which ensure maximum values of physical and mechanical properties.

Application of intermetallic materials such as low-density VKNA alloy allows a reduction in the weight of components by 10–15%, labor input in their production, an increase of working temperature by 50–100°C, an increase in service life of nozzle blades and turbine disks about 3 and 1,5–2 times respectively and a reduction in costs of ingots as compared with commercial superalloys by 25–30%.

Keywords: VKNA, single-crystal sample, crystallographic orientation (CGO), microstructure, Ni₃Al intermetallic alloy, elasticity modulus, tensile strength, yield strength, elongation, rupture 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

В настоящее время сопловые лопатки, проставки и створки сопла авиационных ГТД изготавливают из никелевых жаропрочных сплавов, плотность которых достигает

9 г/см³ и более, а рабочая температура ограничена 1100°C. Для перспективного авиационного двигателестроения необходимо как повышение рабочих температур, так и снижение массы деталей двигателя. 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 [1].

Требования, предъявляемые моторостроительными предприятиями к материалам для горячей части газозвоздушного 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 (Ni₃Al) составляет до 95%, как альтернатива применяемым никелевым сплавам, содержащим до 70% упрочняющей γ' -фазы. Интерметаллидные сплавы на основе Ni₃Al благодаря химическому и фазовому составам имеют повышенную по сравнению с жаропрочными никелевыми сплавами рабочую температуру (до 1200–1250°C) и жаростойкость, легирование в меньшей степени тяжелыми тугоплавкими элементами и, как следствие, более высокие значения удельной жаропрочности, низкую стоимость [2–4].

С целью расширения области применения литейного жаропрочного интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al типа ВКНА в перспективных авиационных двигателях и установления ресурса работы узлов и деталей, изготовленных из этого материала, исследовано влияние кристаллографической ориентации монокристаллических заготовок образцов на комплекс физико-механических свойств.

Материалы и методика исследования

В качестве материала (объекта) для исследований использовали цилиндрические заготовки образцов из интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al с монокристаллической структурой кристаллографических ориентаций (КГО) $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Выплавку прутковых (шихтовых) заготовок исследуемого интерметаллидного сплава проводили вакуумным индукционным (ВИ) методом в вакуумной индукционной печи по режиму: давление в плавильной камере составляет 5,33 Па; температура слива металла ($T_{\text{сл.Мет}}$) – ($T_L + 120 \div 130$)°C [5]. Для последующей операции отливки прутковые заготовки шлифовали на глубину 2–3 мм для снятия слоя, контактирующего с чугунными кокилями, и разрезали на мерные заготовки массой ~3,5 кг.

Химический состав сплава на основе Ni₃Al – основные легирующие элементы: алюминий, хром, молибден, вольфрам, титан, кобальт, рений и примеси (железо, кремний, фосфор) – определяли спектральным анализом на спектрометре ARL4460; содержание углерода, серы, кислорода и азота – на газоанализаторе ТС-600.

Монокристаллические заготовки под образцы для определения физико-механических характеристик интерметаллидного сплава типа ВКНА отливали на установке высокоградиентной направленной кристаллизации УВНС-5 с компьютерным управлением процессом [6, 7]. Кристаллографическая ориентация (КГО) литых заготовок задается КГО монокристаллических затравок. Для этого в керамических формах цилиндрических заготовок $\varnothing 16$ мм со стартовым конусом, в вершине которого предусмотрена затравочная полость, перед плавкой устанавливали тугоплавкие монокристаллические затравки с заданной КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ или $\langle 111 \rangle$. Сами затравки заданной КГО получали методом ориентированной вырезки из цилиндрических монокристаллических заготовок $\varnothing 8$ мм, которые были предварительно отлиты из сплава системы Ni–W на установке УВНЭС-4 по той же технологии, что и монокристаллические заготовки из интерметаллидного сплава. После резки все затравки подвергали травлению и рентгеноструктурному контролю ориентации на установке типа ДРОН. Для работы были использованы затравки с отклонением от заданного направления не более 5 град.

Технологический процесс отливки монокристаллических заготовок интерметаллидного сплава на установке УВНС-5 заключается в следующем: керамические формы, с установленными в них затравками требуемой КГО, при нагреве располагают в нагревателе в области постоянного по высоте теплового поля в интервале температур выше температуры ликвидус интерметаллидного сплава, но ниже температуры ликвидус сплава затравки. Мерную шихтовую заготовку интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al расплавляли в индукторе, заливали в керамические формы и проводили процесс направленной кристаллизации сплава путем перемещения формы с расплавом из зоны нагрева через тепловой экран в зону охлаждения с заданной скоростью до максимально возможного погружения в охладитель (расплав олова).

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. Для этого стартовые конусы от каждой монокристаллической заготовки отрезали перпендикулярно основной оси отливки и подвергали глубокому травлению до четкого выявления дендритной структуры. Рентгено съемку стартовых конусов осуществляли на поперечных шлифах с помощью дифрактометра ДРОН-3 по разработанной методике.

По результатам рентгено съемки годными по ориентации считаются заготовки образцов, у которых соответствующие им стартовые конусы имеют угол отклонения α требуемого кристаллографического направления от вертикальной оси заготовки не более 10 град, т. е. $\alpha_{001} \leq 10$ град, $\alpha_{011} \leq 10$ град, $\alpha_{111} \leq 10$ град.

В монокристаллах интерметаллидных сплавов не допускаются большеугловые границы, однако имеются малоугловые границы, разделяющие блоки структуры. Допускаемая максимальная разориентация между блоками $\Delta\alpha$ в заготовках под образцы из сплава типа ВКНА составляла $\leq 2-3$ град.

Таким образом, было определено отклонение каждой монокристаллической заготовки под образцы от заданного направления КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ или $\langle 111 \rangle$. Годные монокристаллические заготовки, удовлетворяющие условиям $\alpha \leq 10$ град, $\Delta\alpha \leq 2-3$ град, были переданы на изготовление образцов для испытаний физико-механических свойств интерметаллидного сплава типа ВКНА.

Микроструктуру исследуемого интерметаллидного сплава анализировали на растровом микроскопе JSM-840 в поперечном сечении цилиндрической заготовки образца.

Статические испытания проводили на растяжение с определением предела кратковременной прочности в соответствии с требованиями ГОСТ 1497 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 интерметаллидного сплава 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 содержит интерметаллидную фазу Ni_2Al , окруженную γ' -фазой (рис. 1, а, в, г). 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, б, е).

Исследования статического модуля упругости показали, что при температурах 20, 800, 900 и 1000°C модуль упругости при КГО $\langle 111 \rangle$ стабильно максимальный, при КГО $\langle 001 \rangle$ – минимальный, при КГО $\langle 011 \rangle$ – занимает промежуточное положение

(рис. 2). Обращает на себя внимание то, что с повышением температуры от 20 до 1000°C для вышеуказанных кристаллографических ориентаций наблюдается снижение показателей модуля упругости, причем для КГО <011> и <001> – на ~40%, для КГО <111> – на ~30%, т. е. темп снижения значений статического модуля упругости интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al типа ВКНА для КГО <111> медленнее.

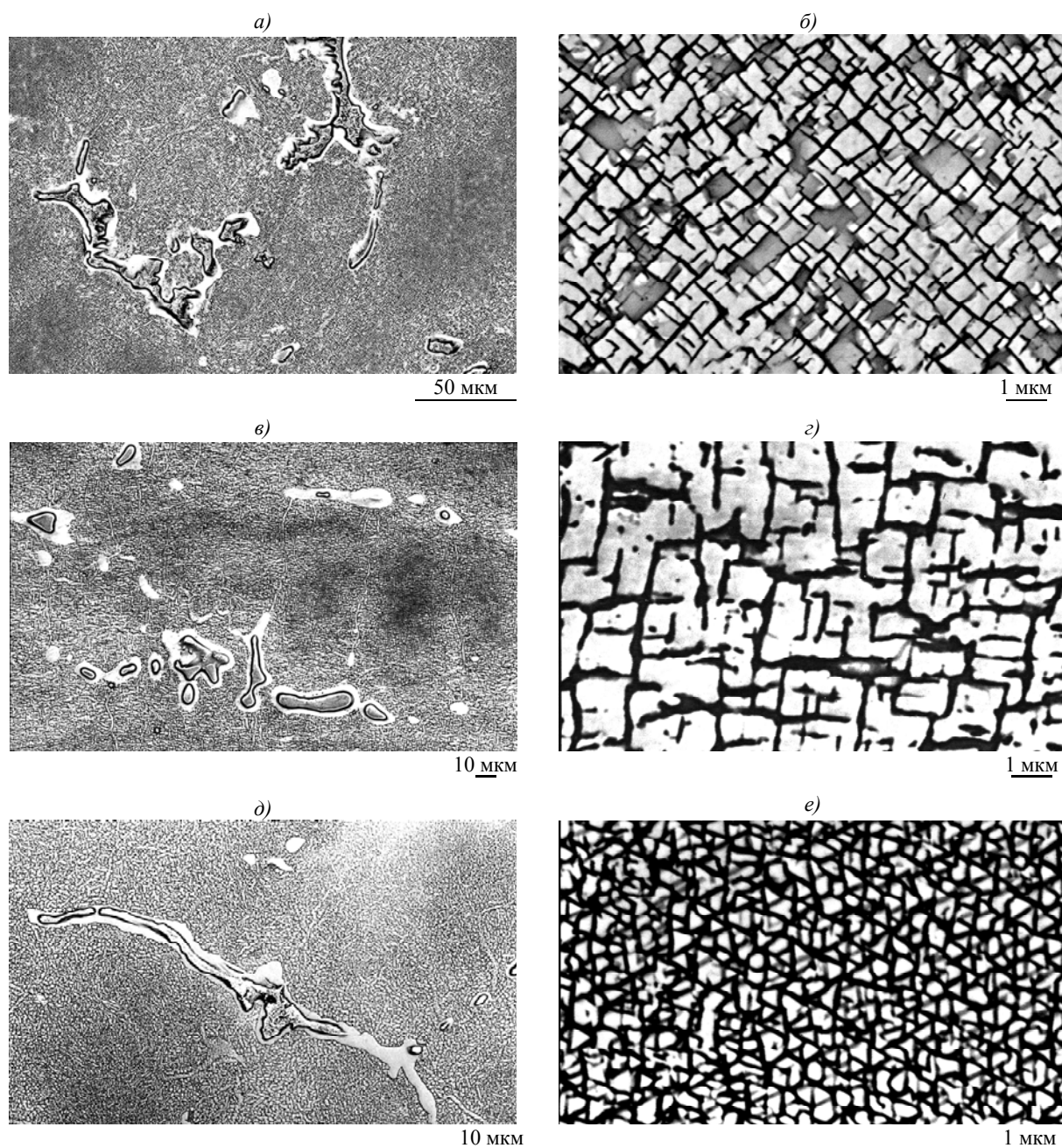


Рис. 1. Микроструктура (*а, в, д* – $\times 500$; *б, з, е* – $\times 10000$) интерметаллидного сплава типа ВКНА с кристаллографической ориентацией (КГО) <001> (*а, б*), <011> (*в, з*) и <111> (*д, е*)

Предел кратковременной прочности (σ_b) сплава на основе Ni₃Al при комнатной температуре для КГО <111> – максимальный и составляет по средним значениям 1470 МПа, для КГО <011> – минимальный и составляет 905 МПа; для КГО <001>: 1105 МПа. В интервале температур 20–1200°C значения кратковременной прочности снижаются для всех трех кристаллографических ориентаций. При температуре 1200°C уровень средних значений одинаков для КГО <001> и <111> и составляет 180 МПа; для КГО <011>: 200 МПа, т. е. степень разупрочнения для КГО <111> выше, а для КГО

$\langle 011 \rangle$ – минимальная (рис. 3). Предел текучести ($\sigma_{0,2}$) сплава на основе Ni_3Al имеет максимальные значения при температурах 800–1150°C для КГО $\langle 001 \rangle$ и составляет соответственно 950–300 МПа.

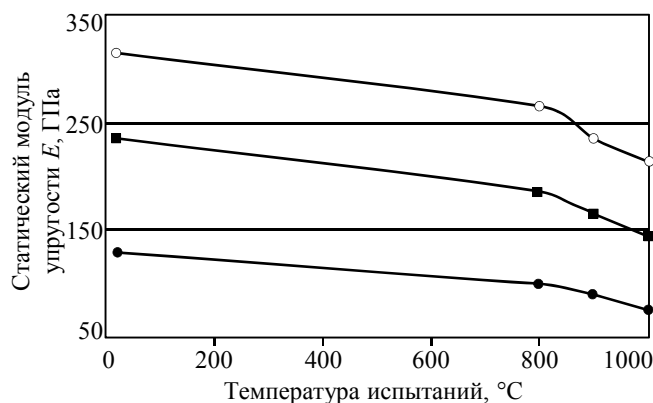


Рис. 2. Температурная зависимость статического модуля упругости сплава типа ВКНА с КГО $\langle 001 \rangle$ (●), $\langle 011 \rangle$ (■), $\langle 111 \rangle$ (○)

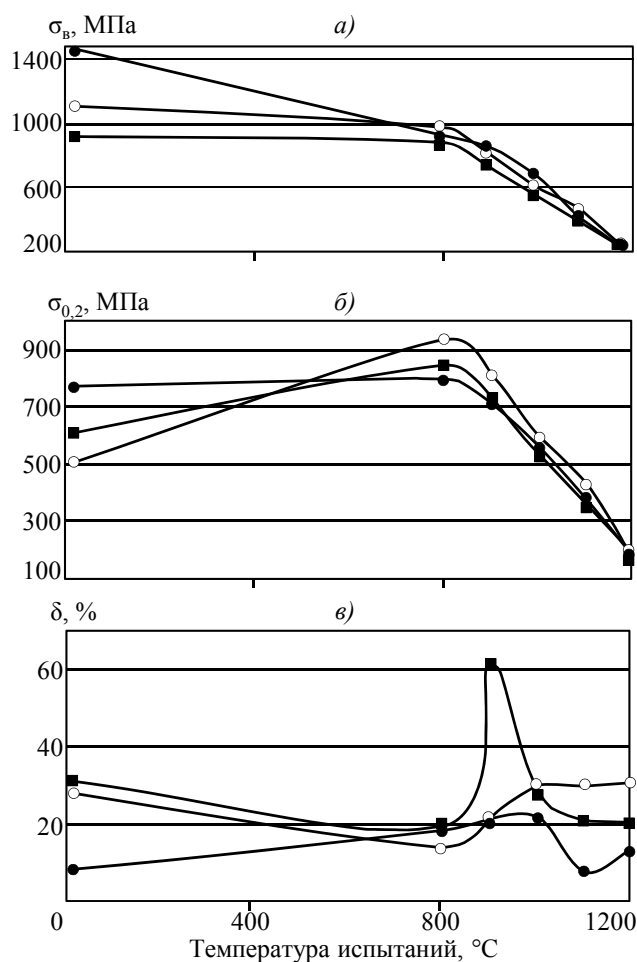


Рис. 3. Температурная зависимость средних значений характеристик кратковременной прочности сплава типа ВКНА с КГО $\langle 001 \rangle$ (○), $\langle 011 \rangle$ (■), $\langle 111 \rangle$ (●)

Относительное удлинение (δ) сплава типа ВКНА в диапазоне температур 20–1200°C носит нерегулярный характер: так, для КГО $\langle 111 \rangle$ средние значения δ составляют 8% при температуре 20°C, для КГО $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$ при температуре 800°C они составляют 14 и 19,5% соответственно; при температуре 1200°C для КГО $\langle 001 \rangle$: 31%, для КГО $\langle 011 \rangle$: 20%, для КГО $\langle 111 \rangle$: 14%. Таким образом, сплав с КГО $\langle 111 \rangle$

имеет меньшие значения относительного удлинения в диапазоне температур 20, 800–1200°C (см. рис. 3).

Проведенные испытания сплава на основе Ni₃Al на длительную прочность при температурах 900, 1000, 1200°C показали, что максимальные значения имеют образцы с КГО <111>, минимальные – с КГО <001>, с КГО <011> – занимают промежуточное положение (рис. 4). При температуре 1200°C средние значения длительной прочности образцов сплава с КГО <001> и <011> равны.

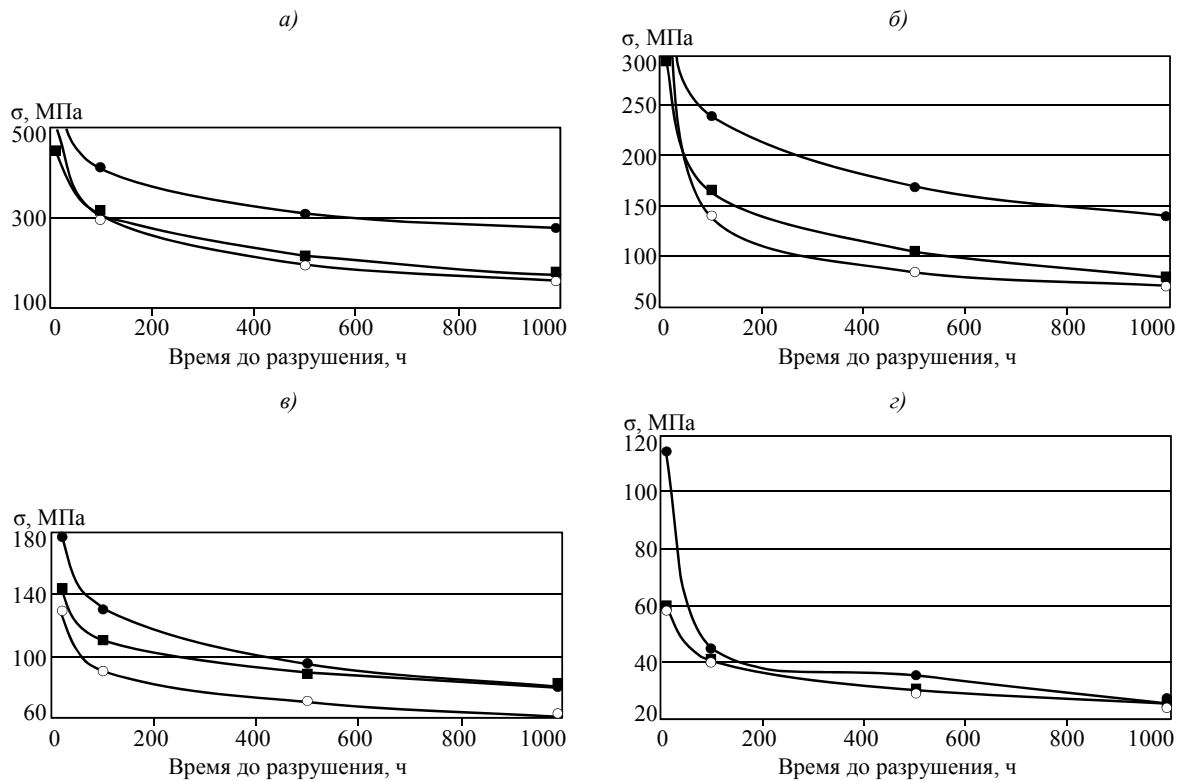


Рис. 4. Зависимость средних значений характеристик длительной прочности сплава типа ВКНА с КГО <001> (○), <011> (■), <111> (●) при температурах 900 (а), 1000 (б), 1100 (в) и 1200°C (з)

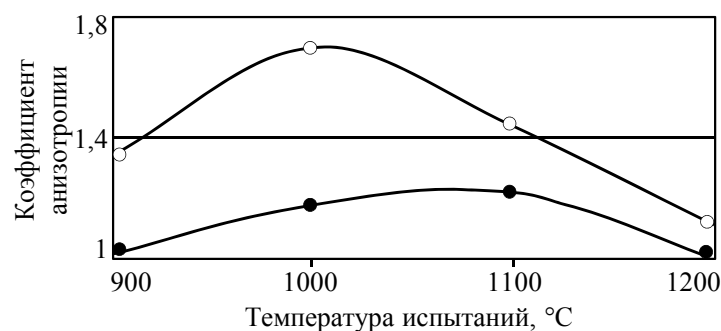


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента анизотропии $K_{<111>/<001>}$ (○) и $K_{<011>/<001>}$ (●)

По результатам полученных значений прочностных характеристик рассчитаны коэффициенты анизотропии, характеризующие отношение длительной прочности монокристаллов ориентаций <111> и <011> к длительной прочности монокристаллов ориентации <001> (рис. 5) [8].

Установлено, что наблюдается в основном положительная ориентационная зависимость (отношения $\sigma_{<111>}$ и $\sigma_{<011>}$ к $\sigma_{<001>}$ – больше 1) значений пределов длительной

прочности, что характерно для интерметаллидных сплавов серии ВКНА. При испытаниях при температуре 1200°C на базах до 1000 ч преимущество кристаллографической ориентации $\langle 111 \rangle$ нивелируется.

Установлено, что выбор КГО обусловлен условиями эксплуатации конкретной детали. Таким образом, конструкторы имеют возможность выбора не только материала, но и технологии его производства, которая обеспечивала бы максимальные значения физико-механических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение. 2008. Т. 2. С. 159–192.
2. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
3. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А. Литые лопатки из интерметаллида никеля (Ni_3Al) для высокотемпературных газовых турбин //Конверсия в машиностроении. 2004. №4. С. 57–59.
4. 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.
5. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 97–105.
6. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Нарский А.Р. О направленной кристаллизации жаропрочных сплавов с использованием охладителя //Литейное производство. 2011. №5. С. 36–39.
7. Бондаренко Ю.А., Базылева О.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Нарский А.Р. Высокоградиентная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В //Литейное производство. 2012. №6. С. 12–16.
8. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 152 с.

REFERENS LIST

1. Inozemcev A.A., Nihamkin M.A., Sandrackij V.L. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok [Basis for designing aircraft engines and power plants]. M.: Mashinostroenie. 2008. T. 2. S. 159–192.
2. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat resisting foundry intermetallic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 57–60.
3. Kablov E.N., Buntushkin V.P., Bazyleva O.A. Liteye lopatki iz intermetallida nikelja (Ni_3Al) dlja vysokotemperaturnyh gazovyh turbin [Alloy blades intermetallic nickel (Ni_3Al) for high-temperature gas turbines] //Konversija v mashinostroenii. 2004. №4. S. 57–59.
4. 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.
5. Kablov E.N., Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovykh zagotovok iz litejnyh zharoprochnykh splavov novogo pokolenija [Modern technologies of receiving the bar stock from foundry heat resisting alloys of new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 97–105.
6. Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskij A.R. O napravlennoj kristal-lizacii zharoprochnykh splavov s ispol'zovaniem ohladitelja [About the directed crystallization of heat resisting alloys with cooler use] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №5. S. 36–39.
7. Bondarenko Ju.A., Bazyleva O.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskij A.R. Vysokogradientnaja napravlennaja kristallizacija detalej iz splava ВКНА-1В [The high-gradient directed crystallization of details from ВКНА-1В alloy] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №6. S. 12–16.
8. Kablov E.N., Golubovskij E.R. Zharoprochnost' nikel'evykh splavov [Heat-resistant nickel alloys]. M.: Mashinostroenie. 1998. 152 s