
Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-3-12

СТРУКТУРА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ Ni_3Al ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

О.А. Базылева¹, М.М. Карашаев¹, А.В. Шестаков¹, Н.С. Дмитриев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрено исследование влияния деформационного воздействия и последующей термической обработки на структуру монокристаллических образцов из жаропрочного интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al . Показано, что при степени деформации (осадки в закрытом контейнере) $\leq 40\%$ не происходит образования трещин в структуре исследуемого материала. Последующий температурный отжиг после деформации способствует процессу рекристаллизации и образованию зеренной структуры в деформированных образцах из интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al .

Ключевые слова: интерметаллид, ВКНА/ВИН, Ni_3Al , деформация, термическая обработка, γ' -фаза

Для цитирования: Базылева О.А., Карашаев М.М., Шестаков А.В., Дмитриев Н.С. Структура монокристаллического интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al после деформационно-термической обработки // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-3-12.

Scientific article

STRUCTURE OF A SINGLE CRYSTALLINE INTERMETALLIC ALLOY BASED ON Ni_3Al AFTER DEFORMATOIN-HEAT TREATMENT

O.A. Bazyleva¹, M.M. Karashaev¹, A.V. Shestakov¹, N.S. Dmitriev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Examines the study of the effect of deformation and subsequent heat treatment on the structure of single-crystal samples from a heat-resistant intermetallic alloy based on the Ni_3Al compound. It is shown that at a degree of deformation (upsetting in a closed container) $\leq 40\%$, no cracks are formed in the structure of the material under study. Subsequent thermal annealing after deformation promotes the process of recrystallization and the formation of a grain structure in deformed samples of an intermetallic alloy based on the Ni_3Al compound.

Keywords: intermetallic compound, VKNA/VIN, Ni_3Al , deformation, heat treatment, γ' -phase

For citation: Bazyleva O.A., Karashaev M.M., Shestakov A.V., Dmitriev N.S. Structure of a single crystalline intermetallic alloy based on Ni_3Al after deformatoin-heat treatment. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-3-12.

Введение

Жаропрочные интерметаллидные сплавы на основе соединения Ni_3Al давно рассматривают в качестве конструкционных материалов для перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) [1–5]. Материалы данного класса применяют в основном для статорных деталей или элементов камеры сгорания и жаровых труб. Однако известно, что в последнее время все чаще перед конструкторами авиационных ГТД встает вопрос о повышении температуры газа на входе в турбинную часть [6, 7]. В связи с этим в научно-технической литературе имеются сведения о перспективах применения сплавов интерметаллидного класса в качестве дисков ГТД, работоспособных в будущем до температур 850–900 °С [8, 9].

В настоящее время известно несколько попыток разработки дисковых материалов на основе интерметаллидных матриц в системе Ni–Al. Так, существует технология создания дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе соединения Ni_3Al , упрочненного дисперсными частицами оксидов в определенном количестве (с различной объемной долей), которые носят название ВКМ (ВИАМ Композиционный Материал). Технология получения полуфабрикатов из дисперсно-упрочненных композиционных материалов заключается в следующем: на начальном этапе методом вакуумной индукционной выплавки изготавливают литую прутковую (шихтовую) заготовку из интерметаллидного матричного сплава, которую затем методом атомизации расплава в потоке инертного газа (аргона) распыляют на гранулы сплава на основе соединения Ni_3Al . Методом плазменного химического осаждения получают смеси сложных оксидных соединений на основе тугоплавких металлов, которые служат упрочняющими частицами в конечном композиционном материале. Гранулы матрицы и частицы упрочнителя в определенном соотношении подвергают процессу механического легирования с последующим объединением в компактный монолит методами традиционной порошковой металлургии [10–13].

Существует также технология получения дисковых материалов системы Ni–Al–Co. Особенностью этой системы является широкий выбор конечных составляющих естественного композиционного материала на основе фаз γ , γ' и β . Сплавы данной системы получают по традиционной технологии деформации слитков, которая заключается в выплавке заготовок исходного состава и их последующей горячей деформации с промежуточными отжигами для придания структуре конечного материала необходимых механических свойств [14–19].

Таким образом, следует предположить, что одним из направлений создания новых конструкционных материалов будущего могут стать сплавы с матрицей на основе интерметаллидов, таких, например, как Ni_3Al . В настоящей работе ставилась задача исследования деформационного воздействия на интерметаллидный сплав на основе соединения Ni_3Al с целью создания на основе интерметаллидов конструкционных материалов для роторных деталей перспективных ГТД, работоспособных до температур 850–900 °С.

На рис. 1 представлены диаграмма состояния системы Ni–Al, а также структура сплава на основе соединения Ni_3Al (серия ВКНА/ВИН). Сплавы этой серии кристаллизуются в двухфазной области ($\gamma' + \gamma$) диаграммы состояния с преобладанием соединения Ni_3Al (γ' -фаза). Структура сплавов данного класса – дендритно-ячеистая, состоящая из смеси фаз $\gamma' + \gamma$, расположенных в осях дендритов; в междендритном пространстве преобладает эвтектическая γ' -фаза, образующаяся по реакции $L \rightarrow L + \gamma'$.

Цель работы – исследование технологичности литейных интерметаллидных сплавов на основе соединения Ni_3Al в процессе деформации, а также влияния степени деформации и последующей термической обработки на структуру монокристаллических образцов.

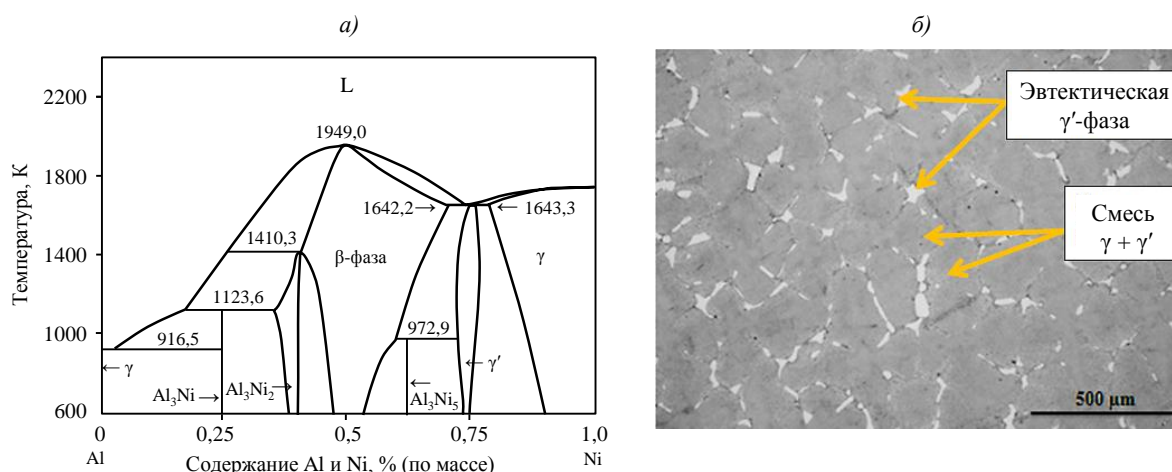


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Ni–Al (а) и дендритно-ячеистая структура литейного интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al (б), полученного методом высокоградиентной направленной кристаллизации

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- получение монокристаллических отливок из жаропрочного интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al методом высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК);
- определение критических точек полученного монокристалла (температуры ликвидус (L), солидус, полного растворения γ' -фазы эвтектического происхождения) методом дифференциального термического анализа (ДТА) для назначения режимов деформационной и последующей термической обработок исследуемых образцов;
- проведение деформационно-термического воздействия методом осадки цилиндрических образцов в контейнере с различной степенью деформации в диапазоне 20–60 %;
- проведение термической обработки для прохождения процесса рекристаллизации в деформированных образцах из интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al ;
- исследование структуры образцов на основе соединения Ni_3Al после деформационно-термического воздействия.

Материалы и методы

Для получения монокристаллических образцов из литейного интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al методом ВГНК использовали установку УВНС-5 с жидкометаллическим охладителем (олово) и компьютерной системой управления основными параметрами процесса направленной кристаллизации. Температура заливки металла составила $T_L + (180–200)^\circ C$, а температура формы: $T_L + (200–220)^\circ C$. Скорость кристаллизации при этом варьировалась в диапазоне 4–8 мм/мин. Диаметр полученных образцов составил 15 мм, высота 105 мм.

Следует отметить, что при исследовании влияния степени деформации на структуру интерметаллидного сплава предпочтение отдают монокристаллическим образцам (вместо поликристаллических) в связи с тем, что интерметаллидные материалы являются достаточно хрупкими, с низкой пластичностью при комнатной температуре. Поэтому при деформации образцов опирались на тот факт, что в структуре монокристаллических образцов всегда меньше границ, препятствующих движению дислокаций. Следовательно, их деформация будет не слишком затруднительной по сравнению с поликристаллическими образцами, полученными из того же сплава.

Критические точки исследуемых материалов определяли методом ДТА на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 404 F1. Диаметр образцов составил 5 мм, высота 1,5 мм.

Деформационную обработку образцов в виде осадки в закрытом контейнере проводили на вертикальном гидравлическом прессе с максимальным усилием 25 тс с различной степенью деформации в диапазоне 20–60 %. Диаметр образцов под деформацию составил 15 мм, высота 18 мм. Перед процессом осадки в закрытом контейнере образцы подвергали отжигу для снятия литейных напряжений в камерной печи фирмы «Сикрон».

Термическую обработку для прохождения процесса рекристаллизации в деформированных образцах выполняли в температурной области растворения эвтектической γ' -фазы на установке Nabertherm.

Исследование полученной после термической обработки структуры проводили на световом и растровом электронных микроскопах GX-52 и KSM-649DLV фирмы Olympus.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена монокристаллическая отливка на основе соединения Ni_3Al , полученная методом ВГНК на установке УВНС-5. После получения отливки ее разрезали на образцы для дальнейших экспериментальных исследований. Часть образцов использовали для определения критических точек данного сплава (температуры солидус, ликвидус, полного растворения эвтектической γ' -фазы), а другую часть передали на участок деформации для проведения процессов осадки с различной степенью деформации в диапазоне 20–60 %.




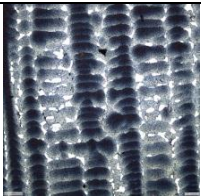
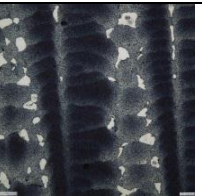
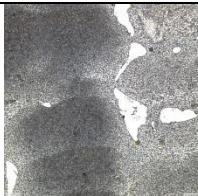
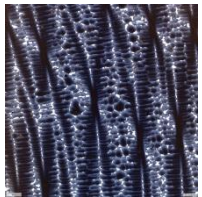
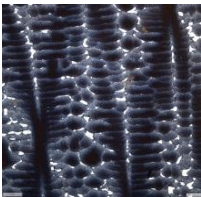
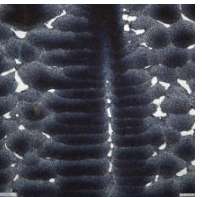
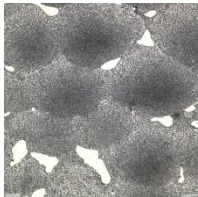

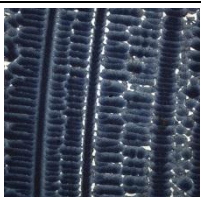
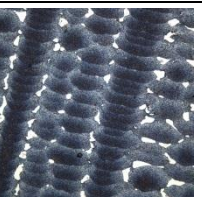






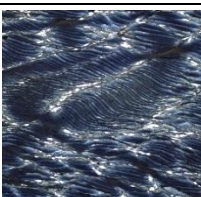

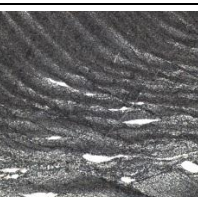
Рис. 2. Монокристаллическая отливка из литейного интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al , полученная на установке УВНС-5 методом высокоградиентной направленной кристаллизации

В работе [20] представлено исследование влияния температуры отжига на гомогенность интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al , а также результаты структурной и фазовой стабильности жаропрочного интерметаллидного сплава марки ВИН4М. Показано, что наибольший эффект растворения γ' -фазы эвтектического происхождения, влияющей на напряженное состояние сплава данного химического состава, наблюдают в температурном интервале 1310–1330 °С. В этой работе также определены критические точки материала после ВГНК. Поскольку материал для исследования влияния деформации и последующей термической обработки на структуру монокристаллических образцов на основе соединения Ni_3Al из той же партии, что и материал, исследуемый в указанной работе, принято решение взять за основу значения критических точек, опубликованных в работе [20]. Таким образом, максимальный эффект от растворения эвтектической γ' -фазы наблюдался в диапазоне температур 1310–1330 °С.

В табл. 1 представлены структуры образцов, полученных после горячей деформации в диапазоне 20–60 %. Осадку образцов из интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al проводили при скорости деформации ~ 40 мм/с после высокотемпературных выдержек.

Таблица 1

Структуры образцов из монокристаллического интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al , полученных при различной степени деформации

Степень деформации, %	Структура образцов при увеличении			
	×5	×10	×50	×100
20				
30				
40				
50				
60				

Анализ полученных результатов показал, что при деформации монокристаллических образцов в диапазоне 20–40 % не происходит образования трещин даже при неполном растворении эвтектической γ' -фазы. При степени деформации >40 % образуются трещины, связанные с неполным растворением эвтектической γ' -фазы, а также с природной пониженной пластичностью подобного рода материалов. Структура деформированных образцов представляет собой дендритные ячейки, состоящие из смеси ($\gamma' + \gamma$)-фаз, а также из эвтектической γ' -фазы, ориентированной вдоль направления деформации.

После деформации монокристаллических образцов измерена твердость по Виккерсу и построена кривая зависимости твердости от степени деформации (рис. 3).

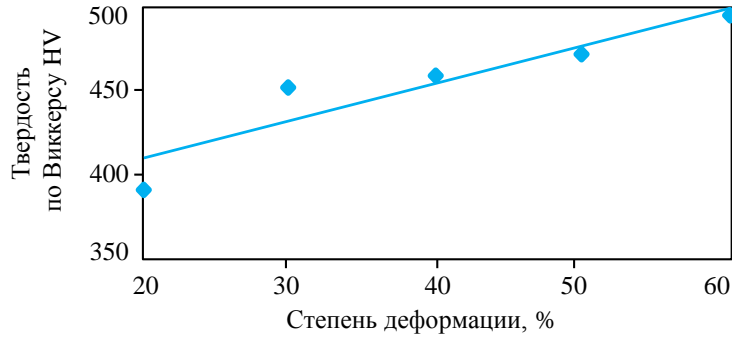


Рис. 3. Зависимость твердости по Виккерсу от степени деформации монокристаллических образцов из интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al

Видно, что повышение твердости происходит при увеличении степени деформации. Можно предположить, что это связано с повышением плотности структурных несовершенств, а также энергии, накопленной при деформационной обработке. Последние факторы, в свою очередь, являются термодинамическим стимулом для прохождения процесса первичной рекристаллизации. Следует также подчеркнуть, что чем больше твердость деформированного материала, тем меньше будет температура рекристаллизации, а также время, необходимое для реализации этого процесса. Однако в данной работе подобных экспериментов не проводили.

Заключительным этапом исследования явилось проведение процесса термической обработки в виде высокотемпературного отжига деформированных образцов для формирования в них поликристаллической структуры. Для экспериментов выбрали образцы со степенью деформации 30 %. На рис. 4 представлена структура образцов после термической обработки.

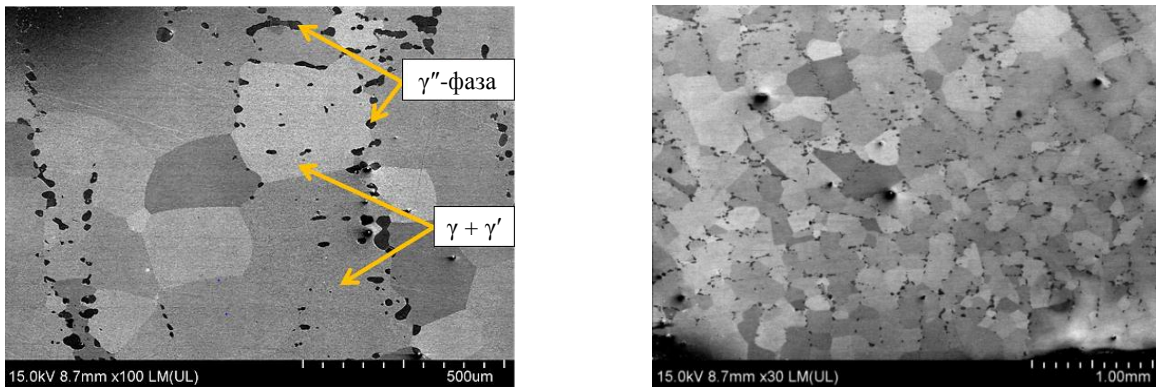


Рис. 4. Микроструктура образцов из монокристаллического интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al после деформации и термической обработки, полученная с помощью микроскопа GX-52 фирмы Olympus

При выборе режимов термической обработки опирались на критические точки материала, а именно на температуру растворения эвтектической γ' -фазы, расположенной в междендритном пространстве литейного сплава. Наличие данной фазы в структуре при отжиге, скорее всего, будет замедлять процесс образования зерен.

Таким образом, отсутствие в структуре деформированного материала фазы эвтектического происхождения, а также накопленная при пластической деформации энергия будут являться термодинамическим стимулом для прохождения процесса

первичной рекристаллизации в структуре исследуемого сплава. Как видно из рис. 4, в полученной зеренной структуре отсутствуют следы эвтектической γ' -фазы, что указывает на правильный выбор температуры термической обработки. Однако в структуре присутствуют выделения вторичной γ' -фазы (γ''), наличие которой, скорее всего, можно объяснить неоптимальным временем выдержки при термической обработке, которое следовало бы увеличить при заданной температуре. Несмотря на этот факт, в структуре деформированных образцов сформирована зеренная поликристаллическая структура.

Термическую обработку в виде высокотемпературного отжига деформированных образцов с целью прохождения процесса рекристаллизации проводили в области растворения эвтектической γ' -фазы. Данную температуру выбирали исходя из того, что при ней практически полностью растворяется эвтектическая γ' -фаза, наличие которой, по-видимому, препятствует процессу рекристаллизации и формированию поликристаллической зеренной структуры в полученных образцах. На рис. 5 представлена структура образцов после травления на γ' -фазу.

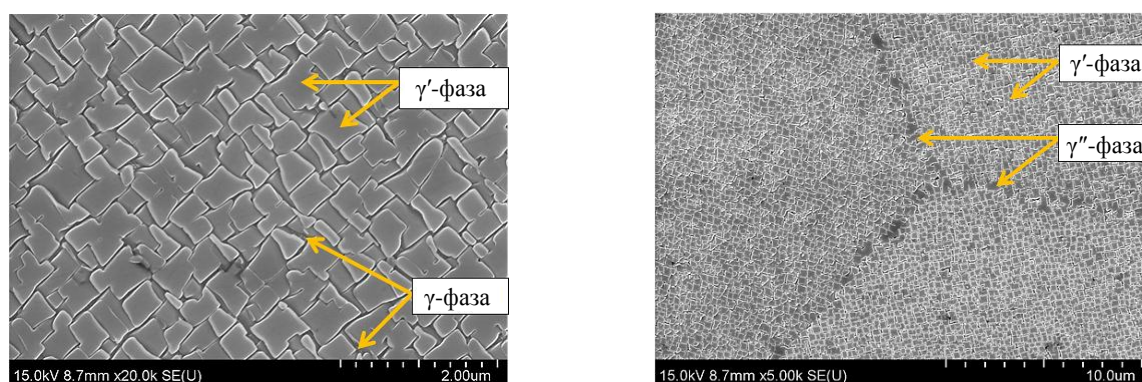


Рис. 5. Микроструктура образцов из монокристаллического интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al после деформации и термической обработки, полученная с помощью микроскопа KSM-649DLV фирмы Olympus

Видно, что после термической обработки (высокотемпературного отжига для формирования поликристаллической структуры) в деформированных образцах на основе интерметаллидного соединения Ni_3Al формируется структура, состоящая из γ' -фазы с прослойками γ -фазы, которая равномерно распределена во всем объеме зерен. В данном случае размер и морфология сформированной γ' -фазы зависят от температуры и времени высокотемпературного отжига. Следует отметить, что морфология γ' -фазы преимущественно кубоидная, размером $\sim 0,5$ мкм.

Таким образом, результаты исследования показали, что при деформационном воздействии на монокристаллические образцы на основе интерметаллидного соединения Ni_3Al и их последующей термической обработке в виде высокотемпературного отжига возможно получение поликристаллической структуры с равномерным выделением γ' -фазы во всем объеме сформированного поликристаллического материала. Это, в свою очередь, может являться основанием для получения подобного рода поликристаллических материалов, которые могли бы быть пригодны как для деформируемых лопаток компрессора высокого давления, так и для других ответственных деталей, например в виде турбинных дисков высокого давления, работоспособных при повышенной температуре эксплуатации (>750 °C).

Заключения

В данной работе с целью исследования технологической пластичности литейных монокристаллических образцов на основе интерметаллидного соединения Ni_3Al проанализировано влияние деформации и последующей термической обработки на структуру монокристаллических образцов.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что при определенных степенях деформации образования трещин в интерметаллидном материале не происходит. Это является важным технологическим требованием при получении опытных или опытно-промышленных образцов из интерметаллидных сплавов для их применения в качестве высокоответственных материалов перспективных ГТД нового поколения, получаемых по различным перспективным технологиям, включающим деформационное воздействие на сплав.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологии их переработки для авиационных двигателей // Автоматическая сварка. 2013. № 10. С. 23–32.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
4. Каблов Е.Н. Нам очень нужен прорыв // Известия. 2018. 6 сент.
5. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. № 31. С. 43–47.
6. Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // Материаловедение. 2010. № 9. С. 29–38.
7. Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si-композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам // Двигатель. 2010. № 5 (71). С. 36–37.
8. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
9. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Овсепян С.В. Исследование композиций системы Ni–Al–Co при разработке нового жаропрочного деформируемого интерметаллидного сплава // Труды ВИАМ. 2013. № 10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.11.2021).
10. Ping Li, Shu-suo Li, Ya-fang Han. Influence of solution heat treatment on microstructure and stress rupture properties of a Ni_3Al base single crystal superalloy IC6SX // Intermetallics. 2011. No. 19. P. 182–186.
11. Базылева О.А., Ефимочкин И.Ю., Аргинбаева Э.Г., Купцов Р.С., Карашаев М.М. Композиционный материал на основе интерметаллидного сплава типа ВКНА, армированного оксидами // Перспективные материалы. 2020. № 10. С. 19–27.
12. Jozwik P., Polkowski W., Wojar Z. Applications of Ni_3Al based intermetallic alloys – current stage and potential perceptivities // Materials. 2015. No. 8. P. 2537–2568. DOI: 10.3390/ma8052537.
13. Большакова А.Н., Ефимочкин И.Ю., Мурашева В.В. Механически легированные дисперсно-упрочненные композиционные материалы // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 1 (137). С. 36–40.
14. Интерметаллидный сплав на основе системы никель–алюминий–кобальт: пат. RU 2603415 С1; заявл. 15.08.15; опубл. 27.11.16.
15. Поварова К.Б., Ломберг Б.С., Филин С.А., Казанская Н.К., Школьников Д.Ю., Беспалова М.Д. Структура и свойства ($\beta + \gamma$)-сплавов системы Ni–Al–Co // Металлы. 1994. № 3. С. 77–81.

16. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Ломберг Б.С., Школьников Д.Ю., Филин С.А., Беспалова М.Д. Фазовый состав и структура сплавов на основе NiAl системы Ni–Al–Co–M, где M – Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo // *Металлы*. 1996. № 3. С. 85–94.
17. Поварова К.Б., Филин С.А., Масленков С.Б. Фазовые равновесия с участием β -фазы в системах Ni–Al–Me (Me – Co, Fe, Mn, Cu) при 900 и 1100 °C // *Металлы*. 1993. № 1. С. 191–205.
18. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Ломберг Б.С., Бондаренко Ю.А., Школьников Д.Ю. Конструкционные жаропрочные ($\beta + \gamma$)-сплавы на основе NiAl с повышенной низкотемпературной пластичностью // *Металлург*. 1996. № 5. С. 1.
19. Кучеряев В.В., Миронова Н.А., Шишков С.Ю. Исследование технологических особенностей деформирования слитков из сплава системы Ni–Al–Co // *Труды ВИАМ*. 2016. № 3 (39). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-1-1.
20. Базылева О.А., Карашаев М.М., Шестаков А.В., Аргинбаева Э.Г. Влияние температуры отжига на гомогенность интерметаллидного сплава на основе соединения Ni₃Al // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-10.

References

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Strategic Directions for the Development of Structural Materials and Technologies for Their Processing for Aircraft Engines. *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, no. 10, pp. 23–32.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Development of technology of cast superalloys directional solidification with variable controlled temperature gradient. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
4. Kablov E.N. We really need a breakthrough. *Izvestia*, 2018. 6 Sept.
5. Kablov E.N. VIAM materials and technologies for Aviadvigatel. *Permskiye aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
6. Svetlov I.L. High-temperature Nb–Si-composites. *Materialovedenie*, 2010, no. 9, pp. 29–38.
7. Svetlov I.L. High-temperature Nb–Si-composites – replacement of single-crystal nickel heat-resistant alloys. *Dvigatel*, 2010, no. 5 (71). pp. 36–37.
8. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
9. Letnikov M.N., Lomberg B.S., Ovsepyan S.V. Investigation experimental alloys based on Ni–Al–Co ternary system for development a new high-temperature intermetallic alloy for disk application. *Trudy VIAM*, 2013, no. 10, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 23, 2021).
10. Ping Li, Shu-suo Li, Ya-fang Han. Influence of solution heat treatment on microstructure and stress rupture properties of a Ni₃Al base single crystal superalloy IC6SX. *Intermetallics*, 2011, no. 19, pp. 182–186.
11. Bazyleva O.A., Efimochkin I.Yu., Arginbaeva E.G., Kuptsov R.S., Karashaev M.M. Composite material based on an intermetallic alloy of the VKNA type, reinforced with oxides. *Perspektivnye materialy*, 2020, no. 10, pp. 19–27.
12. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni₃Al based intermetallic alloys – current stage and potential perceptivities. *Materials*, 2015, no. 8, pp. 2537–2568. DOI: 10.3390/ma8052537.
13. Bolshakova A.N., Efimochkin I.Yu., Murasheva V.V. Mechanically alloyed dispersion-strengthened composite materials. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2015, no. 1 (137). pp. 36–40.
14. Intermetallic alloy based on the nickel-aluminum-cobalt system: pat. RU 2603415 C1; filed 15.08.15; publ. 27.11.16.

15. Povarova K.B., Lomberg B.S., Filin S.A., Kazanskaya N.K., Shkolnikov D.Yu., Bespalova M.D. Structure and properties of ($\beta + \gamma$)-alloys of the Ni–Al–Co system. *Metally*, 1994, no. 3, pp. 77–81.
16. Povarova K.B., Kazanskaya N.K., Lomberg B.S., Shkolnikov D.Yu., Filin S.A., Bespalova M.D. Phase composition and structure of alloys based on NiAl of the Ni–Al–Co–M system, where M is Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo. *Metally*, 1996, no. 3, pp. 85–94.
17. Povarova K.B., Filin S.A., Maslennikov S.B. Phase equilibria with the participation of the β -phase in Ni–Al–Me (Me – Co, Fe, Mn, Cu) systems at 900 and 1100 °C. *Metally*, 1993, no. 1, pp. 191–205.
18. Povarova K.B., Kazanskaya N.K., Lomberg B.S., Bondarenko Yu.A., Shkolnikov D.Yu. Structural heat-resistant ($\beta + \gamma$)-alloys based on NiAl with increased low-temperature plasticity. *Metallurg*, 1996, no. 5, pp. 1.
19. Kucheryaev V.V., Mironova N.A., Shishkov S.U. Research of technological features of Ni–Al–Co system ingots deformation. *Trudy VIAM*, 2016, no. 3 (39), paper no. 01. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: November 23, 2021). DOI: 10.18557/2307-6046-2016-0-3-1-1.
20. Bazyleva O.A., Karashaev M.M., Shestakov A.V., E.G. Arginbaeva. Effect of annealing temperature on the homogeneity of inter-metallic alloy based on Ni₃Al compound. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 23, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-10.

Информация об авторах

Базылева Ольга Анатольевна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Карашаев Мухамед Муаедович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шестаков Александр Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дмитриев Никита Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Olga A. Bazyleva, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mukhamed M. Karashaev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Shestakov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikita S. Dmitriev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.01.2022.

The article was submitted 08.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 17.01.2022.