

УДК 669.017.165

О.А. Базылева¹, О.Г. Оспенникова¹, Э.Г. Аргинбаева¹, Е.Ю. Летникова¹,
А.В. Шестаков¹

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115

Представлены результаты исследований по созданию литейных жаропрочных сплавов на основе алюминидов никеля и разработке технологий изготовления полуфабрикатов из этих материалов, включая селективный лазерный синтез. Рассмотрено влияние технологических параметров направленной кристаллизации: скорости и температурного градиента на фронте кристаллизации на микроструктуру, структурно-фазовые показатели и механические свойства интерметаллидных сплавов на основе алюминида никеля. Показана возможность улучшения жаростойкости и увеличения времени до разрушения интерметаллидного никелевого сплава при температуре 1200°C благодаря микролегированию РЗМ.

Ключевые слова: алюминид никеля, интерметаллид, монокристалл, математическое моделирование, композит на основе алюминида никеля, микроструктура, селективный лазерный синтез, микропористость.

O.A. Bazyleva, O.G. Ospennikova, E.G. Arginbaeva, E.Yu. Letnikova,
A.V. Shestakov

Development trends of nickel-based intermetallic alloys

The research resultson development of heat-resistant casting alloys based on nickel aluminide and manufacturing technologies of semi-finished products made from these materials, including selective laser synthesis are shown in this article. The influence of technological parameters of directed solidification, such as: crystallization rate and temperature gradient on microstructure, structural and phase parameters, mechanical properties of the intermetallic alloys based on nickel aluminide were defined. It was shown the improvement opportunity and increase in time till destruction of intermetallic nickel alloys at the temperature of 1200°C due to REM microalloying.

Keywords: nickel aluminide, intermetallic metal, single crystal, math modelling, nickel aluminide-based composite material, microstructure, selective laser sintering, microporosity.

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

Проблема повышения мощности перспективных двигателей типа ПД-14 привела конструкторов к мысли об использовании высокотемпературных литейных жаропрочных сплавов на основе алюминидов никеля, что нашло отражение в комплексном научном направлении 7.3. «Создание интерметаллидных никелевых сплавов и композиционных материалов на их основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2]. Уникальность алюминидов никеля заключается в кристаллической решетке типа $L1_2$ и упорядоченной структуре, которая сохраняется вплоть до температуры плавления и поддерживает удовлетворительный уровень физико-механических свойств, что является приоритетным при разработке конструкционных сплавов на их основе [3, 4]. Первый разработанный и паспортизованный литейный сплав на основе алюминидов никеля марки ВКНА-1ЛК с рабочими температурами 900–1200°C предназначен для литых фасонных деталей камер сгорания ГТД и ракетных двигателей, работающих во всеклиматических условиях без защитных покрытий [5, 6]. Высокая температура плавления интерметаллидов Ni_3Al и $NiAl$, жаростойкость до температур 1200–1350°C и способность растворять в гранцентрированной кубической (ГЦК) решетке легирующие элементы IV–VIII групп Периодической системы Д.И. Менделеева по типу замещения позволили разработать на основе соединений $NiAl$ и Ni_3Al жаростойкие и износостойкие покрытия – сплавы марок ВКНА-2Л и ВКНА-2М, которые нашли применение в деталях ГТД [7–9]. К штамповым материалам, используемым при изотермической штамповке, предъявляются следующие требования:

– соотношение предела текучести материала штампа к пределу текучести деформируемого сплава при температуре деформации должно составлять не менее 3:1;

– материалы должны обладать хорошей теплопроводностью и жаростойкостью, а также достаточной пластичностью и минимальным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Эти требования реализованы в разработанном составе интерметаллидного сплава ВКНА-3. Использование алюминида никеля в качестве основы сплава снижает его склонность к хрупкому разрушению в тонких сечениях штампового инструмента и, как следствие, повышает ресурс штампа [10, 11].

Весовая эффективность конструкционных материалов авиационного назначения – один из определяющих факторов их использования [12]. Соединение Ni_3Al с упорядоченной структурой и плотностью 7,25 г/см³, которое является основой литейных интерметаллидных сплавов, позволяет повысить весовую эффективность деталей газотурбинных двигателей. В период с 1975 по 1985 год были решены вопросы низко-

высокотемпературной хрупкости и созданы конструкционные литейные сплавы марок ВКНА-1ЛК и ВКНА-4 с поликристаллической структурой для отливки фасонных деталей ГТД (жаровые трубы, створки реактивного сопла, сопловые лопатки и цельнолитые сопловые аппараты) методом точного литья по выплавляемым моделям (табл. 1) [13].

Таблица 1

Сравнительные характеристики серийного никелевого сплава ЖС6У и сплавов на основе алюминиды никеля Ni₃Al с поликристаллической структурой

Сплав	Содержание дефицитных легирующих элементов, % (по массе)					Плотность, кг/м ³	Рабочая температура, °С	Сточасовая прочность σ_{100}^{1200} , МПа
	Cr	Co	W	Mo	Nb			
ЖС6У	–	9,4–10,4	9,8–10,5	1,2–1,6	0,8–1,2	8420	1050	110*
ВХ4Л	32–35	–	4,3–5,3	2,3–3,3	0,5–1,1	8180	1100	10*
ВКНА-1ЛК	4,0–5,0	–	1,5–2,2	–	–	7530	1200	5
ВКНА-4	4,5–5,5	6,0–8,0	1,6–2,2	2,0–3,0	–	7840	1200	17

* Для сплава ЖС6У приведены значения σ_{100} при 1050°С, для сплава ВХ4Л – при 1100°С; для этих сплавов требуется гомогенизирующий отжиг.

Исследования морфологии и состава карбидной фазы сплавов показали, что карбиды гафния и титана типа MeC являются наиболее высокотемпературными и жаростойкими [6, 14]. В настоящее время интерметаллидный сплав марки ВКНА-1ВР с поликристаллической структурой, созданный по принципам твердорастворного, гетерофазного и дисперсионного упрочнений, наряду со сплавом ВКНА-4 нашел применение в современном двигателе ПД-14 в качестве материала сопловых лопаток второй ступени турбины высокого давления [15, 16]. При разработке нового класса конструкционных материалов на основе алюминиды никеля Ni₃Al специалисты руководствовались не только классическими принципами упрочнения сплавов [17–19], но и новыми разработками. Г.И. Морозова предложила при легировании композиций проводить расчет состава с учетом взаимного замещения элементов в многокомпонентной системе γ' -фазы и вклада валентных электронов в организацию ее кристаллической структуры, независимо от занимаемых элементами позиций в кристаллической решетке [20, 21]. Исследования показали, что интерметаллидные сплавы с электронной плотностью валентных электронов $\bar{E}=8,35 \div 8,40$ эл./ат. обладают более высокими значениями жаропрочности по сравнению со сплавами с $\bar{E}=8,25$ эл./ат., характерной для чистого соединения Ni₃Al, и с $\bar{E}>8,4$ эл./ат., при котором, ввиду более низкого значения \bar{E} для алюминия, снижается количество γ' -фазы [23, 24]. Баланс расчета легирования проводят по формуле:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n E_i C_i - \left(0,036 \sum_{i=1}^n A_i C_i \pm 6,28 \right),$$

где ΔE – показатель дисбаланса легирования; A_i и E_i – соответственно атомная масса и количество валентных электронов i -компонента; C_i – атомная доля i -компонента [21].

Созданные сплавы на основе алюминиды никеля серии ВКНА являются сбалансированными, т. е. состоят только из γ' - и γ -фаз, при показателе дисбаланса легирования $\Delta E = \pm 0,04$ эл./ат. [24]. Основные физико-химические показатели паспортизованных интерметаллидных сплавов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Атомная масса, теоретическая плотность, электронная концентрация и дисбаланс легирования паспортизованных сплавов

Сплав	Содержание основных легирующих элементов, % (по массе)					Атомная масса	Плотность, кг/м ³	Электронная концентрация \bar{E} , эл./ат.	Дисбаланс легирования ΔE , эл./ат.
	Cr	W	Mo	Co	Re				
ВКНА-1В	5,7	3,3	3,8	–	–	54,6	7,74	8,38	0,016
ВКНА-1ВР	5,5	3,2	3,5	–	–	54,3	7,71	8,36	0,022
ВКНА-4У	5,2	2,2	5,2	4,0	–	54,4	7,74	8,35	0,019
ВКНА-4УР	5,2	2,2	5,2	4,0	–	54,3	7,73	8,35	0,021
ВКНА-25	5,8	3,0	5,0	4,5	1,2	55,6	7,88	8,32	-0,002

С учетом упорядоченной структуры соединения Ni_3Al и проведенного расчета композиций с минимальным дисбалансом легирования, сплавы имеют термостабильную структуру, сохраняющуюся при высоких рабочих температурах в течение длительного времени [25]. Сравнительный анализ микроструктуры рабочих лопаток турбовинтового двигателя ТВД-20, изготовленных из интерметаллидного сплава ВКНА-4У и серийного жаропрочного сплава ЖС6У и прошедших одновременно длительные испытания в течение 5000 ч и 4800 циклов, показал термостабильность структуры интерметаллидного сплава при эксплуатации двигателя в диапазоне температур 1050–1150°С с забросами до 1200°С. Высокая жаростойкость, экономное легирование (снижение стоимости изготовления сплава), пониженная плотность и высокие рабочие температуры делают перспективным использование разработанных сплавов на основе алюминиды никеля для деталей газотурбинных двигателей.

Для решения проблемы существенного повышения качества литой структуры, уменьшения дендритной ликвации, микропористости,

исключения образования литейных дефектов в виде струйчатой полосчатости, во ФГУП «ВИАМ» в рамках научной школы, возглавляемой Е.Н. Кабловым, при участии Ю.А. Бондаренко разработан новый процесс высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК) жаропрочных сплавов ($G \geq 200^\circ\text{C}/\text{см}$) [26]. Использование метода ВГНК применительно к интерметаллидным сплавам серии ВКНА [27] позволило не только уменьшить микропористость, снизить междендритные расстояния, но и получить более совершенную микроструктуру в осях дендритов (рис. 1), что положительно отразилось на свойствах сплавов и в первую очередь на усталостных характеристиках (рис. 2).

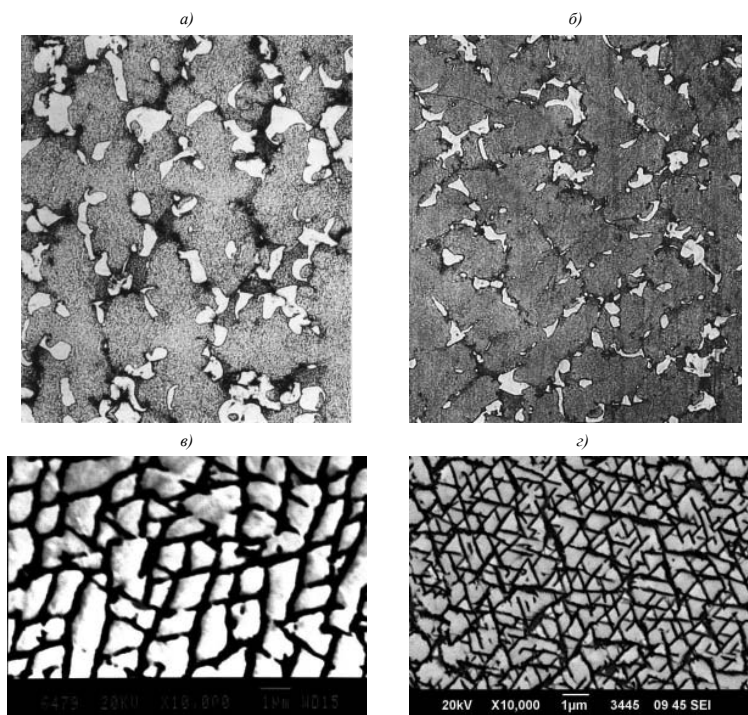


Рис. 1. Микроструктура сплавов ВКНА-1В (а, в) и ВКНА-25 (б, г), полученных при различных температурных градиентах G на фронте кристаллизации: 60–80 (а, б) и 150–180 $^\circ\text{C}/\text{см}$ (в, г)

С целью снижения концентрации газов и примесей при выплавке литейных и деформируемых жаропрочных серийных никелевых сплавов используются редкоземельные элементы (РЗМ) – в частности, из ряда лантаноидов Периодической системы Д.И. Менделеева, обладающие большим атомным радиусом и повышенной активностью. В настоящее время актуальной является задача разработки состава сплава на основе

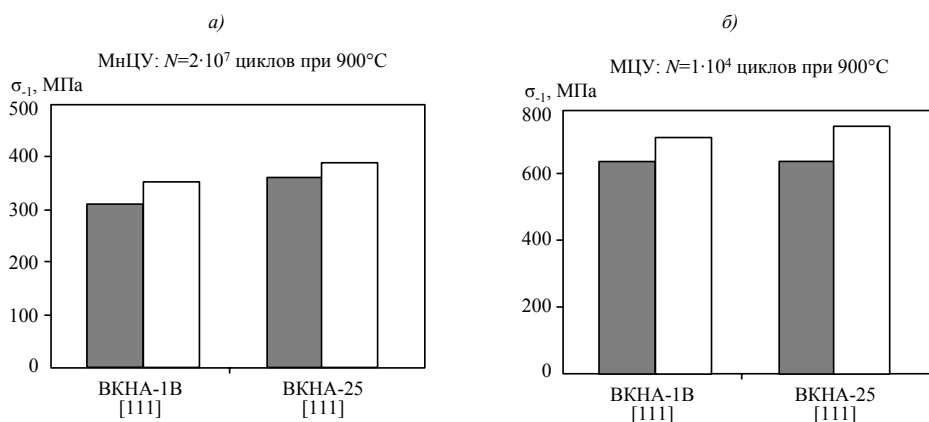


Рис. 2. Сравнительные характеристики пределов выносливости при многоцикловой (а) и малоцикловой усталости (б) паспортризованных интерметаллидных сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25, полученных методами высокоскоростной направленной кристаллизации (■) и высокоградиентной направленной кристаллизации (□)

интерметаллида никеля, микролегированного РЗМ, на базе сплава ВИН4 кристаллографической ориентации [001], более стойкого к теплосменам по сравнению с интерметаллидными сплавами серии ВКНА/ВИН. Исследования, проведенные при создании опытных и опытно-промышленных партий лигатур РЗМ (Ni–Nd, Ni–Pr, Ni–Er) с выпуском технической документации и передачей в собственное производство ФГУП «ВИАМ», по разработке состава сплава на основе интерметаллида никеля, микролегированного РЗМ, и комплексной технологии его производства, включающей выплавку с учетом переработки всех видов отходов, образующихся при выплавке и отливке, изготовление монокристаллических отливок и термическую обработку, совмещенную с горячим изостатическим прессованием, выявили положительное влияние выбранных РЗМ в первую очередь на жаростойкость и стойкость к сульфидной коррозии интерметаллидного сплава (рис. 3) [28, 29].

Пределы длительной прочности сохраняются в основном на уровне паспортных данных сплава ВИН4, рекомендуемого к использованию с кристаллографической ориентацией [001]. Введение лигатуры Ni–Nd (и/или Ni–Pr, и/или Ni–Er) при выплавке конструкционного сплава ВИН4 на основе алюминид никеля с использованием отходов рафинирует расплав, а разработанные технологии отливки и термической обработки, совмещенной с газостатической обработкой, позволяют получать высокий уровень прочностных свойств (рис. 4).

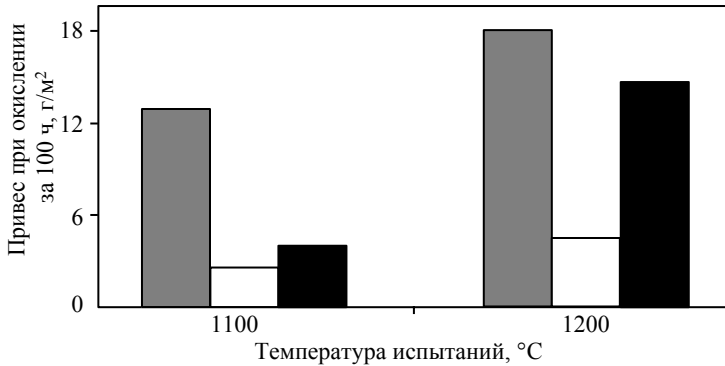


Рис. 3. Сравнение привеса за 100 ч при температурах 1100 и 1200°C конструкционного сплава на основе алюминидов никеля, микролегированного РЗМ, с учетом переработки всех видов образующихся отходов (■), на чистой шихте (□), и сплава-аналога ВИН4 – паспортный состав (■)

Низкая плотность и высокая жаростойкость алюминидов никеля определяют их востребованность для применения в качестве матрицы металлических композиционных материалов (МКМ) [30, 31]. Использование твердофазных методов порошковой металлургии и оксидное упрочнение в качестве фаз внедрения позволяют синтезировать композиционные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al и получать высококачественные изотропные образцы. Разработки, выполненные за последнее время, показали, что МКМ на основе алюминидов никеля, упрочненного частицами оксидов алюминия, скандия, иттрия, лантана и других РЗМ,

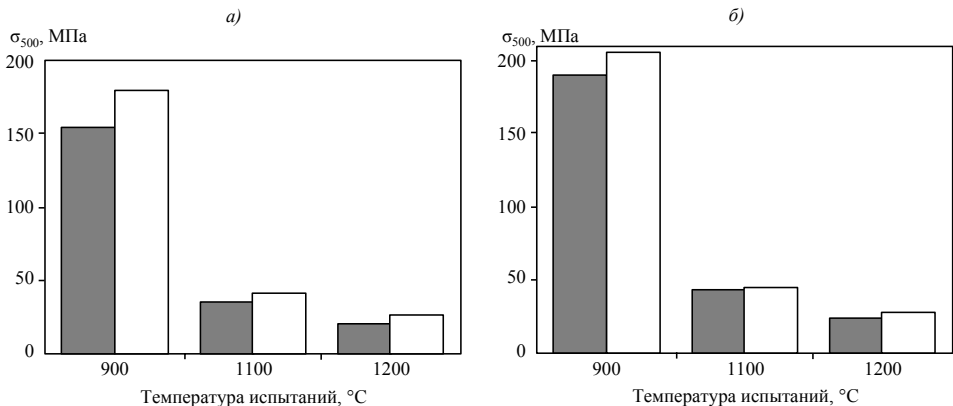


Рис. 4. Сравнение характеристик длительной прочности при испытаниях на базе 500 ч при различных температурах сплавов ВИН4 (■) и ВИН4М (□): а – минимальные значения; б – средние значения

с дендритной столбчатой (направленной) структурой и незначительной долей поперечных границ, изготавливаемые по технологической схеме, включающей вакуумную индукционную выплавку матричного сплава, распыление его до состояния порошка, механическое легирование порошка частицами оксидов, компактирование, консолидацию, горячее изостатическое прессование, являются наиболее перспективными для работы при температурах выше температуры плавления современных никелевых жаропрочных сплавов и обладают высоким уровнем прочности и удельной прочности (рис. 5) [31].

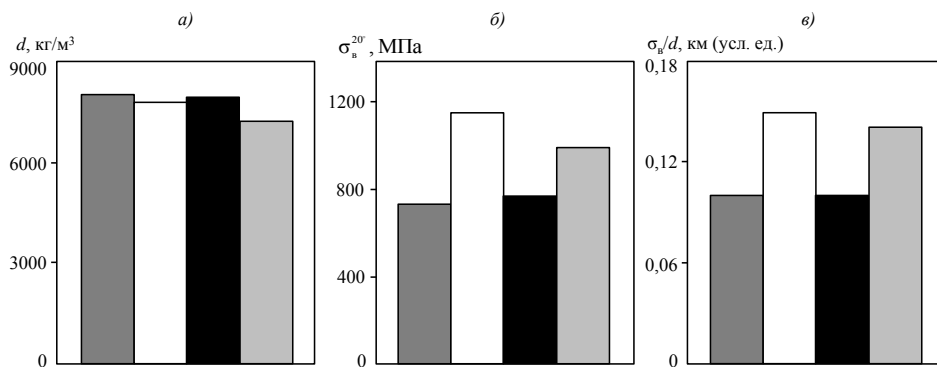


Рис. 5. Физико-механические свойства – плотность (а); кратковременная прочность (б); удельная прочность (в) – интерметаллидных сплавов и МКМ на основе алюминидов никеля, упрочненного частицами оксидов:

- – ВКНА-1В; □ – ВКНА-1В+2,5% НfО₂; ■ – ВКНА-4У;
- – ВКНА-4У+2,5% УО₂

Использование высокотемпературных композиционных материалов на основе алюминидов никеля повышает рабочую температуру и прочность деталей турбины, снижает их массу, что приводит к повышению тяги двигателя, надежности деталей и увеличивает ресурс их работы [32].

Принципиально новый подход к технологическому процессу изготовления деталей и узлов – аддитивное производство – открывает новые возможности и перспективы использования композиций на основе алюминидов никеля. В настоящее время ведутся работы по созданию плотных, без трещин и развитой пористости образцов из сплава типа ВКНА по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) с целью использования этого метода для получения деталей газотурбинного двигателя. Специалистами ФГУП «ВИАМ» достигнуты положительные результаты в получении синтезированных образцов из сплава с карбидным упрочнением типа ВКНА, в дальнейшем прошедших баротермическую обработку (рис. 6) [33]. При проведении исследований намечены новые перспективные направления применения материала на основе алюминидов никеля.

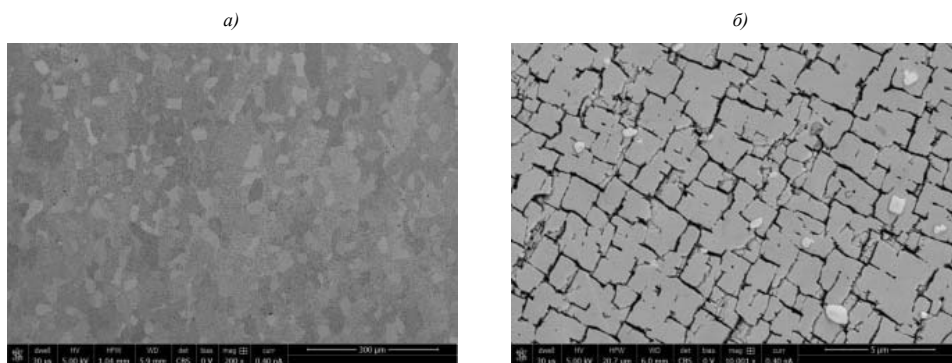


Рис. 6. Микроструктура образца из сплава ВКНА-1ВР, полученного методом селективного лазерного сплавления (СЛС), после высокотемпературной термообработки (ВТО):
 а – общий вид; б – γ'/γ -фазы и карбид

Работа выполнена в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ № НШ-9831.2016.8 «Разработка принципов создания жаропрочных материалов, получаемых методом селективного лазерного сплавления, на примере интерметаллидных сплавов с карбидным упрочнением системы Ni–Al–Ta–C».

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
3. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанозфазным упрочнением. М.: Изд. дом МИСиС, 2008. 328 с.
4. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 359 с.
5. Бунтушкин В.П., Ларина Л.В. и др. Исследование сплава на основе интерметаллида состава Ni_3Al (ВКНА-1ЛК) // Вопросы авиационной науки и техники. Сер.: Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 1987. №3. С. 14–17.
6. Афанасьев Н.И., Бунтушкин В.П., Касымов М.К., Ларина Л.В., Колобов Ю.Р. Прерывистая реакция образования γ -фазы в сплаве на

- основе Ni_3Al // Физика металлов и металловедение. Академия наук СССР. 1989. Т. 68. Вып. 3. С. 602–605.
7. Бунтушкин В.П., Матухнов В.М. и др. О характере повреждаемости рабочих лопаток турбин на участках контактных площадок // Авиационная промышленность. 1974. №2. С. 16–18.
 8. Бунтушкин В.П., Курочко Р.С., Елкин И.С. и др. Жаростойкий материал с повышенным сопротивлением износу // Авиационная промышленность. 1975. №7. С. 59–61.
 9. Бунтушкин В.П. Исследование и разработка жаростойкого интерметаллидного сплава и покрытий для теплонагруженных деталей авиационных газовых турбин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1976. 30 с.
 10. Каплин Ю.И., Мелимевкер О.Д., Бунтушкин В.П. Интерметаллидный сплав – штамповый материал для изостатического деформирования // Авиационная промышленность. 1981. №9. С. 48–50.
 11. Сплав на основе интерметаллида состава Ni_3Al : пат. 2088686 Рос. Федерация; заявл. 25.10.95; опубл. 27.08.97. Бюл. №24.
 12. Скляр Н.М. Становление и развитие Всероссийского института авиационных материалов (1932–1992 гг.) // Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 1994. С. 14–48.
 13. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н. и др. Высокотемпературные конструкционные сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al // Там же. С. 278–284.
 14. Базылева О.А., Бунтушкин В.П. Взаимосвязь длительной прочности сплава на основе интерметаллида состава Ni_3Al с составом карбидной фазы // Авиационные материалы. 1990. №2. С. 12–14.
 15. Лукин В.И., Базылева О.А., Ковальчук В.Г., Голев Е.В., Ходакова Е.А. Исследование свойств отливок из интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР после исправления дефектов методом сварки // Сварочное производство. 2014. №10. С. 5–12.
 16. Базылева О.А., Туренко Е.Ю., Рассохина Л.И. и др. Литые блоки соплового аппарата 2-й степени ТВД из интерметаллидного сплава ВКНА-4-ВИ // Литейное производство. 2014. №10. С. 7–12.
 17. Кишкин С.Т., Портной К.И., Бунтушкин В.П. и др. Теоретические исследования жаропрочных никелевых и интерметаллидных материалов // Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 1982. С. 28–32.
 18. Портной К.И., Бунтушкин В.П., Богданов В.И. и др. Влияние легирования на термодинамическую стабильность фаз в системе Ni–Al // Доклады АН СССР 1980. Т. 252. №1. С. 12.
 19. Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Трохина Г.Н. и др. Исследование причин хрупкого разрушения интерметаллида Ni_3Al при высоких температурах // Авиационные материалы. 1989. №3. С. 10–15.

20. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Морозова Г.И., Базылева О.А. Основные принципы легирования интерметаллида Ni_3Al при создании высокотемпературных сплавов // *Материаловедение*. 1998. №7. С. 13–17.
21. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // *МиТОМ*. 2012. №12. С. 52–58.
22. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля // *МиТОМ*. 1999. №1. С. 32–34.
23. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базылева О.А. и др. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // *Металлы РАН*. 1999. №1. С. 58–65.
24. Петрушин Н.В., Чабина Е.Б., Назаркин Р.Б. Конструирование жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе γ' -фазы с высокой температурой плавления. Часть 2 // *МиТОМ*. 2012. №3 (681). С. 20–23.
25. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Бунтушкин В.П., Базылева О.А. и др. Термостабильность структуры сплава на основе Ni_3Al и его применение в рабочих лопатках малоразмерных ГТД // *Металлы РАН*. 2003. №3. С. 95–100.
26. Ечин А.Б. Влияние температурного градиента и скорости кристаллизации на структуру и свойства монокристаллических Re и Ru содержащих жаропрочных сплавов применительно к высокоградиентной технологии литья лопаток ГТД: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. 2016. 26 с.
27. Бондаренко Ю.А., Базылева О.А., Ечин А.Б. и др. Высокоградиентная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В // *Литейное производство*. 2012. №6. С. 12–16.
28. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Ечин А.Б., Шестаков А.В. Влияние микролегирования редкоземельными металлами и технологии получения конструкционного интерметаллидного сплава на основе алюминида никеля на его свойства // *Материаловедение*. 2016. №4. С. 21–27.
29. Базылева О.А., Шестаков А.В., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Возможность повышения характеристик жаропрочности и жаростойкости конструкционного интерметаллидного сплава на основе алюминида никеля // *Металлы*. 2016. №1. С. 93–101.
30. Бурковская Н.П., Ефимочкин И.Ю., Севостьянов Н.В., Родионов А.И. Композиционный материал на основе интерметаллида никеля с дисперсным упрочнением Al_2O_3 // *Материаловедение*. 2015. №8. С. 29–34.

31. Бурковская Н.П., Ефимочкин И.Ю., Базылева О.А. и др. Исследование структурных особенностей, прочностных свойств и жаростойкости дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе интерметаллида никеля // *Материаловедение*. 2016. №3. С. 8–15.
32. Способ получения высокотемпературного композиционного материала на основе никеля: пат. 2563084 Рос. Федерация; заявл. 14.11.2014; опубл. 20.09.2015. Бюл. 26.
33. Евгенов А.Г., Щербаков С.И., Рогалев А.М. Применение порошков свариваемых и литейных жаропрочных сплавов производства ФГУП «ВИАМ» для ремонта деталей ГТД лазерной газопорошковой наплавкой // *Новости материаловедения*. Наука и техника. 2016. №4 (22). Ст. 04. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 07.11.2016).