

СОЗДАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ

О.Г. Оспенникова

lab3@viam.ru

О.А. Базылева

Э.Г. Аргинбаева

А.В. Шестаков

Е.Ю. Туренко

Всероссийский институт авиационных материалов, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Отражены основные направления и результаты исследований по созданию высокотемпературных сплавов на основе алюминидов никеля, композиционных материалов на их основе. Приведены технологии изготовления полуфабрикатов из этих материалов

Ключевые слова

Алюминид никеля, интерметаллид никеля, монокристалл, математическое моделирование, композиционный материал, дисперсное упрочнение, механическое легирование, экструзия, прокатка, микроструктура

Поступила в редакцию 05.04.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 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»)

Введение. В целях успешной реализации направления начиная с 2011 г. проводится комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию высокотемпературных сплавов на основе алюминидов никеля, композиционных материалов на их основе и технологий изготовления полуфабрикатов из этих материалов. Результаты работ приведены в [1–15].

Исследования в рамках комплексной проблемы «Интерметаллидные материалы» развиваются по трем основным направлениям:

- разработка с использованием метода расчета баланса легирования высокотемпературных сплавов на основе алюминидов никеля с поликристаллической структурой и технологии их изготовления методом точного литья по выплавляемым моделям, паспортизация, опробование и внедрение этих сплавов для деталей перспективных изделий двойного назначения;
- разработка с использованием математической модели расчета жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе соединения Ni_3Al с дендритной столбчатой (направленной) и монокристаллической структурами, технологии их изготовления методом направленной кристаллизации, паспортизация, опробование и внедрение в качестве деталей ГТД;
- создание легких высокотемпературных интерметаллидно-оксидных композиционных материалов (сплав ВКНА+ HfO_2 или ВКНА+ Al_2O_3) и технологии

изготовления из них полуфабрикатов для применения в авиационной, автомобильной и судостроительной промышленности.

Материалы и методики исследований. Объект исследования — класс интерметаллидных материалов на основе соединения Ni_3Al (γ -фаза) с гетерофазной поликристаллической и монокристаллической структурами (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав интерметаллидных никелевых сплавов

| Марка сплава | Содержание основных легирующих элементов, % масс. (Ni — основа) | | | | | | | | |
|-------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------|
| | Al | Ti | Co | Cr | W | Mo | Re | Zr(Hf) | C |
| ВКНА-4 | 9,0 | – | 7,0 | 5,0 | 2,0 | 2,5 | – | 1,2 | 0,18 |
| ВКНА-4УР | 8,5 | 0,8 | 4,0 | 5,0 | 2,2 | 5,0 | – | 0,5 | 0,18 |
| ВКНА-1ВР | 8,5 | 1,5 | – | 5,5 | 3,0 | 3,5 | – | 0,5 | 0,15 |
| ВКНА-4У | 8,5 | 0,9 | 4,0 | 5,0 | 2,2 | 5,0 | – | 0,05 | 0,02 |
| ВКНА-1В | 8,5 | 1,0 | – | 5,7 | 3,6 | 3,5 | – | 0,3 | 0,02 |
| ВИН1 (ВКНА-25) | 8,3 | 0,5 | 5,0 | 5,5 | 3,0 | 5,0 | 1,5 | 0,3 | 0,02 |
| ВИН2 | 8,4 | 1,0 | 5,0 | 5,0 | 2,7 | 3,5 | 2,0 | 0,3 | 0,02 |
| ВИН4 | 8,5 | 0,8 | 4,5 | 4,5 | 4,6 | 3,5 | 1,2 | 0,05 | 0,02 |

Шихтовые заготовки выплавляли вакуумным индукционным (ВИ) методом на установках типа VIM-12 [6], заготовки под образцы получали ВИ-методом точного литья по выплавляемым моделям: для получения равноосной поликристаллической структуры температура перегрева расплава составляет $(1640 + 5)$ °С, температура заливки $(1530 + 10)$ °С, температура формы (1050 ± 10) °С [7–9]; для получения монокристаллов $T_{Me} = 1580...1600$ °С, температура формы $1600...1620$ °С, скорость кристаллизации $R_{кр} = 5...8$ мм/мин при градиенте кристаллизации $G = 150...180$ °С/см. Химический состав сплавов определяли атомно-эмиссионным анализом на спектрометре Varian 730ES; содержание углерода, серы, кислорода и азота — на газоанализаторе ТС-600. Для исследования фазового состава применяли метод физико-химического фазового анализа, основанного на электрохимическом изолировании фаз в различных электролитах. Микроструктуру исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV. Измерение фактической плотности образцов композиционного материала проводили по методу гидростатического взвешивания в воде по ГОСТ 18898–89.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Разработка высокотемпературных сплавов на основе алюминидов никеля с поликристаллической структурой. При создании конструкционных интерметаллидных сплавов на основе алюминида никеля использовали метод расчета сбалансированного легирования, разработанный Г.И. Морозовой [16]:

$$\bar{E}_c = \sum_{i=1}^n e_i a_i; \quad E_0 = 0,036 \bar{A}_c + 6,28; \quad \Delta E = \bar{E}_c - E_0 = \pm 0,01,$$

где \bar{E}_c — среднее значение электронной концентрации композиции сплава; e_i — концентрация валентных электронов; a_i — атомная доля i -го элемента; \bar{A}_c — атомная масса сплава; n — число компонентов сплава, включая основу; ΔE — параметр, определяющий дисбаланс легирования.

Расчет составов композиций проводили параллельно с физико-химическим фазовым анализом с учетом легирующих элементов, участвующих в образовании карбидов. Структурно-стабильным сплав будет, если из смеси ($\gamma' + \gamma$)-фаз, когерентно связанных между собой, в процессе эксплуатации не будут выделяться топологически плотноупакованные (ТПУ) фазы, а границы зерен будут упрочнены карбидами.

Результаты физико-химического фазового анализа и расчета ΔE показали, что оптимальными параметрами для интерметаллидных композиций системы Ni₃Al–Cr–Mo–W–Ti–Hf являются: содержание карбидной фазы ~1,5 % масс. состава MeC и Mo₂C; $\bar{E}_c \sim 8,37$ эл/ат, а $\Delta E = (+0,01)$.

Химический состав и массовая доля карбидной фазы после длительных испытаний при температуре 1200 °С мало изменяются (табл. 2), ТПУ-фазы в сплаве не выделяются (рис. 1).

Таблица 2

Число и состав карбидной фазы в сплаве ВКНА-1ВР после испытаний на длительную прочность при температуре 1200 °С

| Условия испытаний | | Количество карбидов, % масс. | Содержание элементов в карбидах по отношению к массе сплава, % масс. | | | | | |
|--------------------|------|------------------------------|--|------|------|------|------|------|
| | | | Ni | Cr | W | Mo | Ti | Hf |
| σ, МПа | τ, ч | | | | | | | |
| Исходное состояние | | 1,24 | 0,36 | 0,18 | 0,19 | 0,48 | 0,02 | 0,01 |
| 40 | 100 | 1,37 | 0,35 | 0,18 | 0,27 | 0,54 | 0,02 | 0,01 |
| 30 | 500 | 1,28 | 0,30 | 0,17 | 0,27 | 0,51 | 0,02 | 0,01 |

Исследование микроструктуры сопловых лопаток ТВД второй ступени из интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР в исходном состоянии и после наработки в течение 180 ч показало, что сплав технологичен и выбранные температурно-временные режимы отливки позволяют сформировать в структуре в основном карбиды типа MeC благоприятной округлой формы, выделяющиеся по границам зерен и упрочняющие их. Анализ микроструктуры сопловой лопатки выявил, что составляющие оси дендритов ($\gamma' + \gamma$)-фазы и карбиды в замке крупнее, чем в пере лопатки (рис. 2, а и б). После 180 ч наработки морфология карбидной фазы несколько меняется: наряду с карбидами MeC, располагающимися по границам зерен (рис. 2, в и ж), в межосном пространстве выделяются конгломераты карбидов Cr₇C₃ в виде «китайских иероглифов» (рис. 2, г и д), которые могут являться концентраторами напряжений, в осях дендритов новых фаз не обнаружено, выделения γ' - и γ -фаз несколько укрупняются и вытягиваются в направлении приложенных напряжений (рис. 2, б, е и з).

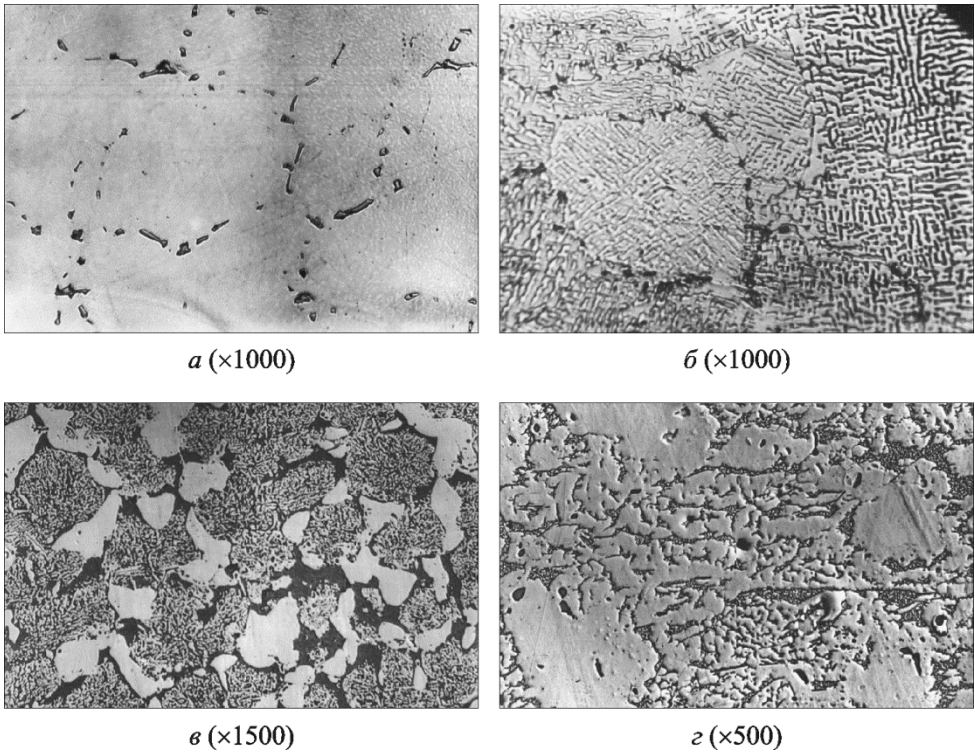


Рис. 1. Микроструктура интерметаллидного сплава с поликристаллической (равноосной) структурой системы $\text{Ni}_3\text{Al-Cr-Mo-W-Ti-Hf}$:

a — морфология и распределение карбидной фазы в исходном литом состоянии; *б* — оси дендритов ($\gamma' + \gamma$)-фазы в литом состоянии (ВИ выплавка + ВИ переплав); *в* — оси дендритов и межосные области ($(\gamma' + \gamma)$ - и γ' -фазы) после высокотемпературной выдержки 1250°C в течение 500 ч; *г* — изменения микроструктуры в осях дендритов и межосных областях после испытаний при температуре 1200°C и напряжении 40 МПа в течение 100 ч (рабочая часть образца)

На основе этой системы легирования разработан конструкционный жаростойкий сплав ВКНА-1ВР, который прошел опробование в двигателе ПД-14 в качестве материала сопловых лопаток первой и второй ступеней турбины высокого давления (ТВД) (рис. 2).

По результатам сравнительных металлографических исследований соплового аппарата первой ступени, состоящего из сопловых лопаток, выполненных из сплавов ВКНА-1ВР, ВКНА-1В, ЖС32, и прошедшего длительные сертификационные испытания при максимально допустимых значениях температуры и частот вращения роторов, принято решение об использовании интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР с поликристаллической структурой с теплозащитными покрытиями в качестве материала сопловых лопаток первой и второй ступеней ТВД перспективного двигателя ПД-14.

Моделирование упругопластических характеристик монокристаллических интерметаллидных сплавов на основе микроструктурного численного анализа. Для прогнозирования механических свойств интерметаллидных сплавов на основе

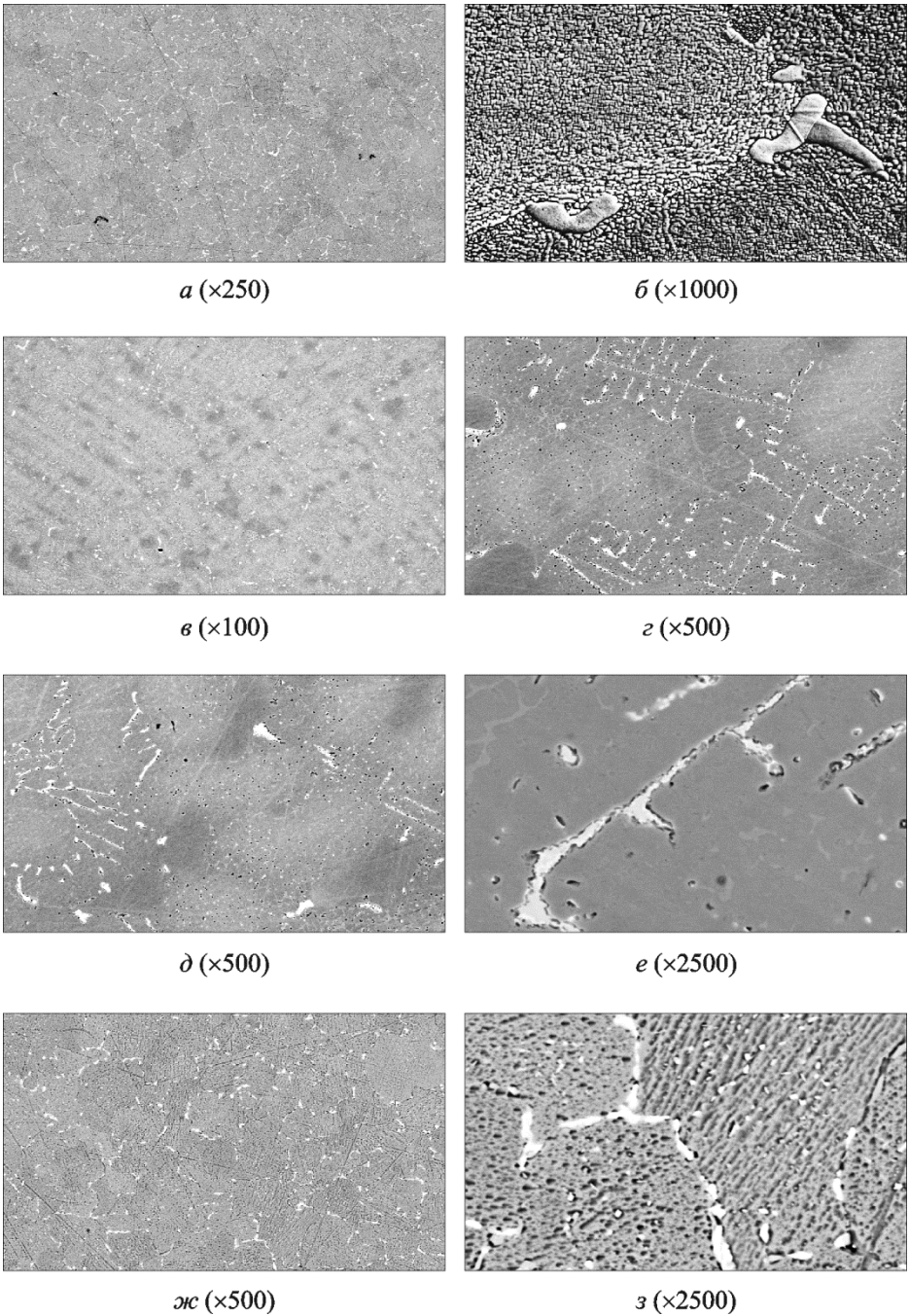


Рис. 2. Микроструктура сопловой лопатки второй ступени ТВД из интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР:

а — перо сопловой лопатки; *б* — замок сопловой лопатки; *в, г, д* — морфология карбидной фазы в пере лопатки после наработки 180 ч; *е* — оси и межосные области в пере лопатки после наработки 180 ч; *ж* — морфология карбидной фазы в замке сопловой лопатки после наработки 180 ч; *з* — оси дендритов замка сопловой лопатки после наработки 180 ч

соединения Ni_3Al с дендритной столбчатой (направленной) и монокристаллической структурами использовали метод многомасштабного моделирования структуры. Проведен расчет упругопластического деформирования и разрушения монокристаллических интерметаллидных сплавов в зависимости от фазового состава и структуры методом асимптотического осреднения композитов с периодической структурой, с использованием конечно-элементных программных вычислительных комплексов [17]. Математическое моделирование свойств конструкционных интерметаллидных сплавов включает в себя:

- математическое моделирование структуры материала (описание геометрии типовых структур материала на нескольких масштабных уровнях) в зависимости от фазового состава и технологии получения;
- построение зависимостей состав–свойства авиационных материалов и физико-химических процессов, происходящих при их изготовлении на основе экспериментальных данных;
- прогноз свойств в зависимости от структурных составляющих на основе экспериментальных данных;
- расчеты упругопрочностных свойств жаропрочных интерметаллидных сплавов с типовой мезоструктурой (группа структурных составляющих, образующих минимальный объем, который можно наделить осредненными свойствами) и диаграмм деформирования жаропрочных интерметаллидных сплавов при действии различных видов напряженно-деформированного состояния.

Для монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-1В с ячеисто-дендритной микроструктурой (рис. 3), отдельные кристаллы которой размером в несколько микрометров имеют форму, близкую к гексагональной, в каждом кристалле достаточно четко выделены две основные фазы: γ' -фаза на основе соединения Ni_3Al , составляющая ~80 % об., и γ -фаза на основе твердого раствора никеля, была разработана математическая модель, с помощью которой проведено моделирование микронапряжений и выполнен расчет диаграмм упругопластического деформирования жаропрочного монокристаллического никелевого интерметаллидного сплава ВКНА-1В.

В результате проведенного моделирования микронапряжений и расчетов диаграмм упругопластического деформирования жаропрочного монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-1В установлено, что увеличение содержания γ' -фазы в сплаве приводит к росту его прочностных характеристик. Сопоставление тестовых результатов расчетов с экспериментальными данными по прочности сплава ВКНА-1В показало достаточно хорошее совпадение [18]. Дальнейшее моделирование и совершенствование расчетов составов сплавов требует многоуровневого, включая наноструктурные составляющие, описания структуры.

Создание легких высокотемпературных интерметаллидно-оксидных композиционных материалов. Повышение рабочих температур и весовой отдачи авиационных двигателей напрямую связано с разработкой оксидно-дисперсных

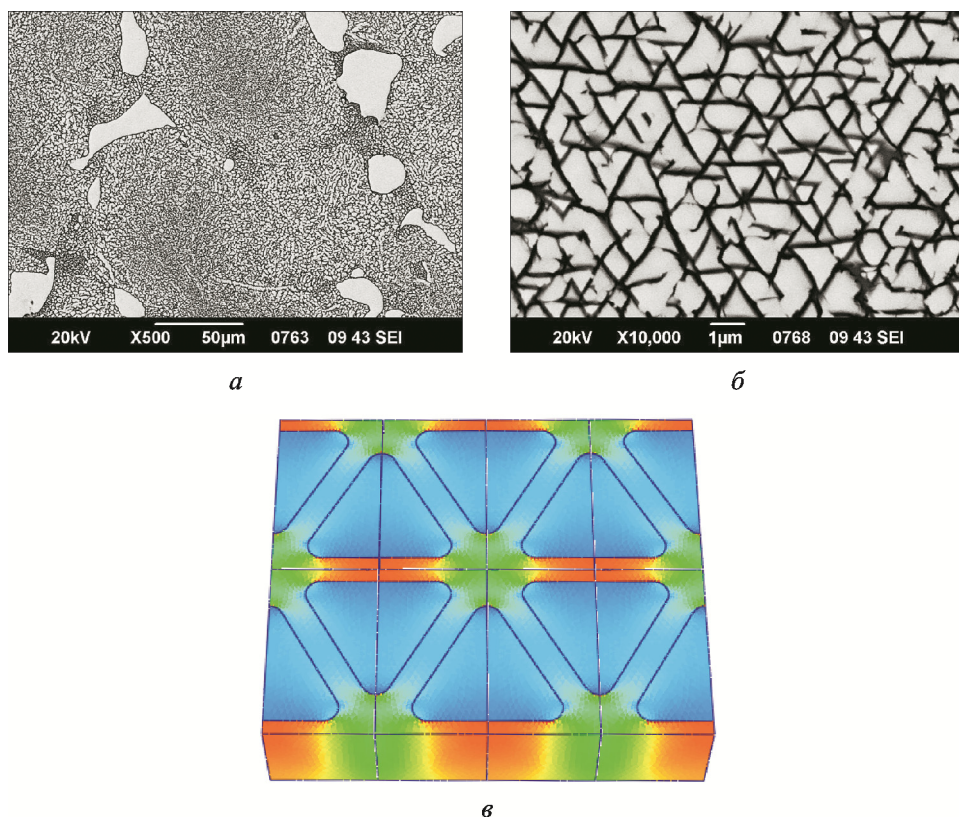


Рис. 3. Микроструктура (а, б) и математическая модель микроструктуры (в) жаропрочного монокристаллического сплава ВКНА-1В с кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$

композиционных материалов на основе алюминидов никеля. В последнее время для решения этих задач проводятся работы по получению упрочненного частицами оксида алюминия композиционного материала со столбчатой структурой на основе сплава марки ВКНА-4У. Способ включает в себя вакуумную индукционную выплавку интерметаллидного матричного сплава, распыление навески прутковой (шихтовой) заготовки на порошок на установке HERMIGA. Далее проводится рассев порошка матричного сплава на фракции, подготовка навески интерметаллидного порошка с размером частиц ≤ 100 мкм и частиц оксида алюминия Al_2O_3 с объемным содержанием $\sim 2,5$ %, перемешивание в атриторе (механическое легирование), компактирование, горячее изостатическое прессование, горячая экструзия, горячая прокатка [19]. При выборе режимов прокатки были проведены предварительные исследования на экспериментальных образцах по определению допустимой разовой степени деформации $\epsilon_{\text{доп}}$ при осадке матричного интерметаллидного сплава ВКНА-4У и компакта из порошка ВКНА-4У, упрочненного частицами Al_2O_3 , при различных температурах (табл. 3).

Осадка образцов из сплава ВКНА-4У (ВИ+ВНК Ø 16 мм) и из прессованного прутка Ø 32 мм (гранулы ВКНА-4У+2,5 % об. Al₂O₃)

| 1050 °С | |
|--------------------------------|---|
| ВИ + ВНК Ø 16 мм | Гранулы ВКНА-4У + 2,5 масс.% Al ₂ O ₃ |
| ε = 10 % — без трещин | ε = 17 % — без трещин |
| ε = 25 % — слабые трещины | ε = 26 % — слабые трещины, видна большая гранула |
| ε = 33 % — грубый скол под 45° | ε = 41 % — небольшие и слабые трещины |
| ε _{доп} ≈ 20...22 % | ε _{доп} ≈ 22...23 % |
| 1100 °С | |
| ε = 14 % — без трещин | ε = 21 % — без трещин |
| ε = 20 % — без трещин | ε = 26 % — слабые трещины |
| ε = 31 % — небольшой скол | ε = 35 % — небольшие и грубые трещины |
| ε _{доп} ≈ 25 % | ε _{доп} ≈ 30 % |
| 1150 °С | |
| ε = 15 % — без трещин | ε = 25 % — без трещин |
| ε = 19 % — без трещин | ε = 25 % — без трещин |
| ε = 32 % — скол | ε = 36% — небольшие трещины |
| ε _{доп} ≈ 25 % | ε _{доп} ≈ 30...32 % |
| 1200 °С | |
| ε = 12 % — без трещин | ε = 25 % — без трещин, но видна большая гранула |
| ε = 15 % — без трещин | ε = 28 % — без трещин |
| ε = 30 % — без трещин | — |
| ε _{доп} ≈ 30...32 % | ε _{доп} ≈ 35 % |

В результате эксперимента установлено, что технологические характеристики по допустимой разовой степени деформации с повышением температуры от 1050 до 1200 °С улучшаются: ε_{доп} повышается от 20...22 % до 32...35 %, причем оксидно-дисперсный композит несколько технологичнее. Изготовленные по выбранной схеме образцы композиционного материала визуально плотные, без видимых несплошностей, что подтвердилось при измерении образцов и расчете плотности (плотность экспериментальных образцов находится в диапазоне 7,79...7,84 г/см³ при пористости менее 3 %) (рис. 4).

Микроструктурные исследования композиционного материала, упрочненного оксидами алюминия, проводили на растровом электронном микроскопе

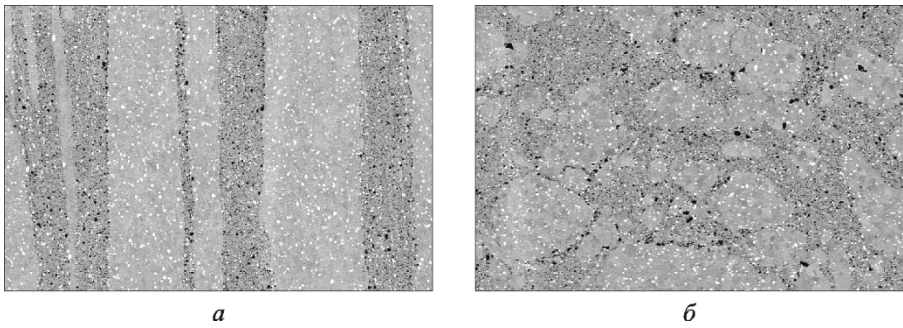


Рис. 4. Микроструктура оксидно-дисперсного композиционного материала с интерметаллидной матрицей после горячей экструзии:
а — продольное сечение; *б* — поперечное сечение

JSM-6490LV на микрошлифах экструдированного прутка в поперечном и продольном сечениях. В продольном направлении структура направленная, в поперечном — равноосная с равномерным распределением оксидных частиц (см. рис. 4). Микрорентгеноспектральный анализ образцов после прокатки показал, что дисперсно-упрочненный композиционный материал сохраняет фазовый состав, присущий матрице — дендриты ($\gamma' + \gamma$)-фазы, межосные пространства — легированная γ' -фаза — и оксидам (рис. 5). Таким образом, перед специалистами, работающими над проблемой создания высокотемпературных сплавов на основе алюминидов никеля и композиционных материалов на их основе, стоят задачи не утратить преимуществ как интерметаллидов, так и оксидов при разработке технологий изготовления полуфабрикатов из этих материалов.

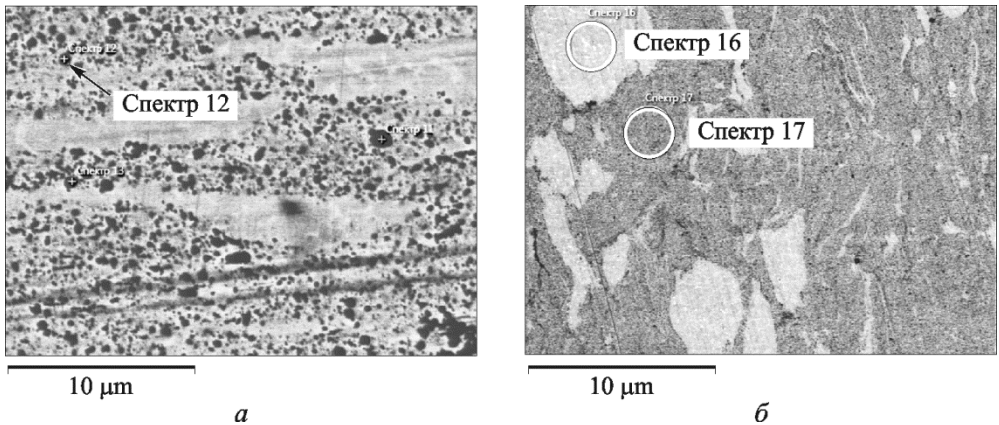


Рис. 5 (начало). Микрорентгеноспектральный анализ фаз композиционного материала на основе интерметаллидного сплава ВКНА-4У:
а — частицы оксида алюминия — спектр 12; *б* — элементный состав оксидных частиц — спектр 12

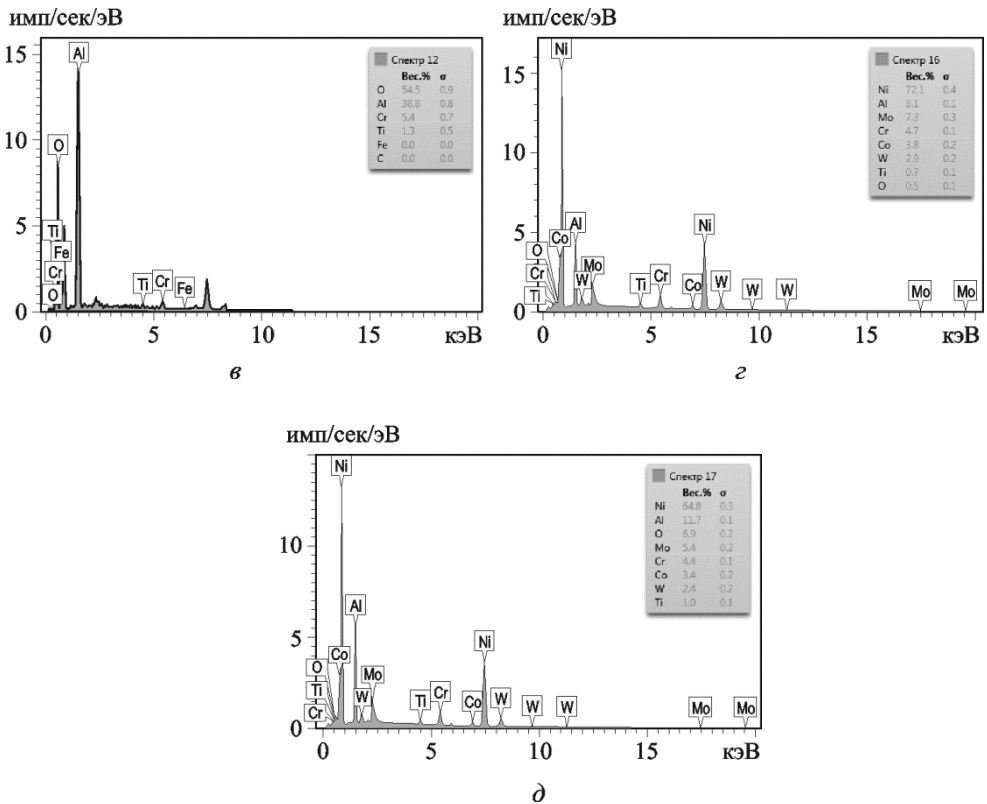


Рис. 5 (окончание). Микрорентгеноспектральный анализ фаз композиционного материала на основе интерметаллидного сплава ВКНА-4У:
 в — фазовый состав интерметаллидного сплава ВКНА-4У — спектры 16, 17; з — легированная γ' -фаза Ni_3Al — спектр 16; д — смесь фаз (γ' + γ) — спектр 17

Заключение. Проведенные исследования позволили установить:

- оптимальные параметры интерметаллидных композиций системы $Ni_3Al-Cr-Mo-W-Ti-Nf$ для равноосного литья: $\bar{E}_c \sim 8,37$ эл/ат, а $\Delta E = (+0,01)$, содержание карбидной фазы $\sim 1,5$ % масс. состава MeC и Mo_2C ;
- для монокристаллических интерметаллидных сплавов, как показали результаты математического моделирования микронапряжений, увеличение содержания γ' -фазы в сплаве приводит к росту прочностных характеристик. При этом тестовые результаты расчетов дают достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными;
- с повышением температуры деформации от 1050 до 1200 °С допустимая разовая степень деформации $\epsilon_{доп}$ при осадке матричного интерметаллидного сплава ВКНА-4У и компакта из порошка ВКНА-4У, упрочненного частицами Al_2O_3 , повышается от 20...22 % до 32...35 %. При этом оксидно-дисперсный композиционный материал несколько технологичнее и сохраняет фазовый состав, присущий матрице и оксидам.

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. С. 3–33.
2. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // *Авиационные материалы и технологии.* 2012. № 5. С. 7–17.
3. *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А.* Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение.* 2011. № SP2. С. 13–19.
4. *Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю.* Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии.* 2012. № 5. С. 57–60.
5. *Исследование малоциклового усталости при комнатной температуре сплава на основе интерметаллида Ni₃Al типа ВКНА-25 / К.Б. Поварова, О.А. Базылева, А.А. Дроздов, Н.А. Аладьев, М.А. Самсонова // *Металлы.* 2012. № 6. С. 70–81.
URL: <http://viam.ru/public/files/2011/2011-205961.pdf>*
6. *Базылева О.А., Горюнов А.В., Загвоздкина Т.Н., Нефёдов Д.Г.* Исследование ликвационной неоднородности сплава ВКНА-4У МОНО и ее влияния на его структуру и свойства // *Металлургия машиностроения.* 2012. № 3. С. 18–21.
URL: <http://viam.ru/public/files/2011/2011-205837.pdf>
7. *Базылева О.А., Бондаренко Ю.А., Тимофеева О.Б., Хвацкий К.К.* Влияние кристаллографической ориентации на структуру и свойства сплава ВКНА-1В // *Металлургия машиностроения.* 2012. № 4. С. 9–13.
URL: <http://viam.ru/public/files/2011/2011-205936.pdf>
8. *Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Колодочкина В.Г., Хвацкий К.К.* Влияние кристаллографической ориентации на структуру и физико-механические свойства интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al // *Авиационные материалы и технологии.* 2013. № 2. С. 3–7.
9. *Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Голынец С.А., Ечин А.Б.* Влияние макро- и микроструктуры монокристаллических заготовок на статическую и динамическую прочность интерметаллидного сплава // *Металлург.* 2013. № 8. С. 82–87.
10. *Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г.* Влияние термической обработки на структуру и жаропрочность ренийсодержащего интерметаллидного сплава на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии.* 2014. № 2. С. 21–26.
11. *Овсепян С.В., Базылева О.А., Летников М.Н., Аргинбаева Э.Г.* Расчет стабильности неразъемного соединения жаропрочных никелевого и интерметаллидного сплавов // *Вопросы материаловедения.* 2014. № 2. С. 155–162.
12. *Базылева О.А., Бондаренко Ю.А., Тимофеева О.Б., Афанасьев-Ходыкин А.Н.* Влияние гомогенизирующего отжига и высокотемпературных нагревов в процессе пайки на структуру и механические свойства сплава на основе интерметаллида никеля // *Материаловедение.* 2014. № 3. С. 15–20.
13. *Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Фесенко Т.В., Колодочкина В.Г.* Исследование влияния ликвационной неоднородности на структуру и долговечность интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Материаловедение.* 2014. № 6. С. 7–12.

14. Лукин В.И., Рыльников В.С., Базылева О.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Технология пайки, термической обработки паяных соединений жаропрочных деформируемого (ЭП975) и литейного монокристаллического интерметаллидного (ВКНА-4У) сплавов // Сварочное производство. 2014. № 6. С. 15–18.
15. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Зайцев Д.В., Фесенко Т.В. Исследование микроструктуры и фазового состава интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al с кристаллографической ориентацией [001] // Металловедение и термическая обработка. 2015. № 3. С. 13–17.
16. Морозова Г.И. Закономерность формирования химического состава γ/γ' -матрицы многокомпонентных никелевых сплавов // Доклады АН СССР. 1991. Т. 320. № 6. С. 1413–1416.
17. Моделирование упругопластических характеристик монокристаллических интерметаллидных сплавов на основе структурного численного анализа / Ю.И. Димитриенко, Е.А. Губарева, С.В. Сборщиков, О.А. Базылева, А.Н. Луценко, Е.И. Орешко // Математическое моделирование и численные методы. 2015. № 2. С. 3–22.
DOI: 10.18698/2309-3684-2015-2-322 URL: <http://mmcm.bmstu.ru/articles/45>
18. Многомасштабное конечно-элементное моделирование трехслойных сотовых композитных конструкций / Ю.И. Димитриенко, Н.Н. Федонюк, Е.А. Губарева, С.В. Сборщиков, А.А. Прозоровский // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 7. С. 243–265. DOI: 10.7463/0714.0717805
URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717805.html>
19. Бурковская Н.П., Ефимочкин И.Ю., Севостьянов Н.В., Родионов А.И. Композиционный материал на основе интерметаллида никеля с дисперсным упрочнением Al₂O₃ // Материаловедение. 2015. № 8. С. 24–29.

Оспенникова Ольга Геннадиевна — канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отделения «Жаропрочные литейные и деформируемые сплавы и стали, защитные покрытия» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Базылева Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» по науке Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Аргинбаева Эльвира Гайсаевна — канд. техн. наук, начальник сектора лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Шестаков Александр Викторович — инженер 2-й категории лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Туренко Елена Юрьевна — инженер 2-й категории лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Пробьба сосылаться на эту статью следующим образом:

Оспенникова О.Г., Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Шестаков А.В., Туренко Е.Ю. Создание интерметаллидных никелевых сплавов и композиционных материалов на их основе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 75–89.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-75-89

CREATION OF INTERMETALLIC NICKEL ALLOYS AND COMPOSITE MATERIALS ON THEIR BASIS

O.G. Ospennikova

lab3@viam.ru

O.A. Bazyleva

E.G. Arginbaeva

A.V. Shestakov

E.Yu. Turenko

All-Russian Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study shows the main directions and results of research into the development of high-temperature alloys based on nickel aluminides, composites based on them and technologies for manufacturing semi-finished products from these materials

Keywords

Nickel aluminide, intermetallic nickel alloy, single crystal, mathematical simulation, composite material, dispersion hardening, mechanical alloying, extrusion, rolling, microstructure

REFERENCES

- [1] 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». *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1, pp. 3–33 (in Russ.).
- [2] Kablov E.N. Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. S, pp. 7–17 (in Russ.).
- [3] Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materials for parts of gas turbine engines under high heat loads. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, no. SP2, pp. 13–19 (in Russ.).
- [4] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Turenko E.Yu. High-temperature casting intermetallic alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. S, pp. 57–60 (in Russ.).
- [5] Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Alad'yev N.A., Samsonova M.A. Research on low-cycle fatigue of intermetallic alloy based on Ni₃Al of VKNA-25 type at room temperature. *Metally*, 2012, no. 6, pp. 70–81 (in Russ.). Available at: <http://viam.ru/public/files/2011/2011-205961.pdf>
- [6] Bazyleva O.A., Goryunov A.V., Zagvozdikina T.N., Nefedov D.G. Evaluation of effect of segregation inhomogeneity in single crystals of BKHA-4Y alloy on its structure and properties. *Metallurgiya mashinostroeniya* [Metallurgy of Machinery Building], 2012, no. 3, pp. 18–21 (in Russ.). Available at: <http://viam.ru/public/files/2011/2011-205837.pdf>
- [7] Bazyleva O.A., Bondarenko Yu.A., Timofeeva O.B., Khvatskiy K.K. Influence of crystallographic orientation on the structure and properties of BKHA-1B alloy. *Metallurgiya mashinostroeniya* [Metallurgy of Machinery Building], 2012, no. 4, pp. 9–13 (in Russ.). Available at: <http://viam.ru/public/files/2011/2011-205936.pdf>

- [8] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Kolodochkina V.G., Khvatskiy K.K. The influence of crystallographic orientation on structure, physical and mechanical properties of intermetallic alloys based on Ni₃Al. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2013, no. 2, pp. 3–7 (in Russ.).
- [9] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Golynets S.A., Echin A.B. Effect of single-crystal billet macro- and microstructure on intermetallic alloy static and dynamic strength. *Metallurgist*, 2013, vol. 57, no. 7, pp. 742–747. DOI: 10.1007/s11015-013-9795-9
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11015-013-9795-9>
- [10] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G. Effect of heat treatment on the structure and heat resistance rhenium containing intermetallic nickel-based alloy. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. 2, pp. 21–26 (in Russ.).
- [11] Ovsepyan S.V., Bazyleva O.A., Letnikov M.N., Arginbaeva E.G. The calculation of permanent joint of nickel superalloy and intermetallic nickel-based alloy stability. *Voprosy materialovedeniya*, 2014, no. 2, pp. 155–162 (in Russ.).
- [12] Bazyleva O.A., Bondarenko Yu.A., Timofeeva O.B., Afanas'yev-Khodykin A.N. Effect of annealing and high-temperature heatings during soldering on structure and mechanical properties of alloy based on nickel aluminide. *Materialovedenie*, 2014, no. 3, pp. 15–20 (in Russ.).
- [13] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Fesenko T.V., Kolodochkina V.G. Influence study of liquation on structure and durability of intermetallic alloys based on nickel. *Materialovedenie*, 2014, no. 6, pp. 7–12 (in Russ.).
- [14] Lukin V.I., Ryl'nikov V.S., Bazyleva O.A., Afanas'yev-Khodykin A.N. Practices of brazing and heat treatment of brazed joints of heat-resistant wrought alloy (EP975) and of casting monocrystalline intermetallide alloy (VKNA-4U). *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, no. 6, pp. 15–18 (in Russ.).
- [15] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Zaytsev D.V., Fesenko T.V. A study of microstructure and phase composition of Ni₃Al-base intermetallic alloy with crystallographic orientation [001]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 57, no. 3, pp. 133–137.
DOI: 10.1007/s11041-015-9850-1
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11041-015-9850-1>
- [16] Morozova G.I. Chemical composition formation law for γ' / γ -groundmass of multicomponent nickel-based alloys. *Doklady AN SSSR*, 1991, vol. 320, no. 6, pp. 1413–1416 (in Russ.).
- [17] Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Sborshchikov S.V., Bazyleva O.A., Lutsenko A.N., Oreshko E.I. Modeling the elastic-plastic characteristics of monocrystalline intermetallic alloys based on microstructural numerical analysis. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody*, 2015, no. 2, pp. 3–22 (in Russ.). DOI: 10.18698/2309-3684-2015-2-322
Available at: <http://mmcm.bmstu.ru/articles/45/>
- [18] Dimitrienko Yu.I., Fedonyuk N.N., Gubareva E.A., Sborshchikov S.V., Prozorovskiy A.A. Multiscale finite-element modeling of sandwich honeycomb composite structures. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU], 2014, no. 7, pp. 243–265 (in Russ.). DOI: 10.7463/0714.0717805
Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717805.html>
- [19] Burkovskaya N.P., Efimochkin I.Yu., Sevost'yanov N.V., Rodionov A.I. Composite material based on Al₂O₃ dispersion-strengthened nickel-aluminide. *Materialovedenie*, 2015, no. 8, pp. 29–24 (in Russ.).

Ospennikova O.G. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Research Department of Heat-Resistant Casting and Deformable Alloys and Steels, Protective Coatings, All-Russian Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bazyleva O.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Head for Research of the Laboratory of High-Temperature Alloys on a Nickel Basis, All-Russian Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Arginbaeva E.G. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Sector of the Laboratory of High-Temperature Alloys on a Nickel Basis, All-Russian Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Shestakov A.V. — 2nd rank engineer of the Laboratory of High-Temperature Alloys on a Nickel Basis, All-Russian Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Turenko E.Yu. — 2nd rank engineer of the Laboratory of High-Temperature Alloys on a Nickel Basis, All-Russian Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ospennikova O.G., Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Shestakov A.V., Turenko E.Yu. Creation of Intermetallic Nickel Alloys and Composite Materials on their Basis. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 3, pp. 75–89. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-75-89



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
В.А. Одинцова, С.В. Ладова, Д.П. Левина

«Оружие и системы вооружения»

В систематизированном виде изложены сведения об оружии и системах вооружения как объектах, обеспечивающих поражение целей с помощью различных боеприпасов. Приведен краткий обзор истории развития вооружения. Даны определения понятий «оружие», «комплекс вооружения», «система вооружения». Рассмотрены состав, структура, основные свойства и боекомплекты комплексов вооружения.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru