

Композиционный материал на основе интерметаллидного сплава типа ВКНА, армированного оксидами

**О. А. Базылева, И. Ю. Ефимочкин, Э. Г. Аргинбаева,
Р. С. Купцов, М. М. Карашаев**

Представлена технология получения экспериментальных образцов композиционного материала на основе интерметаллидного сплава типа ВКНА системы Ni – Al – Cr – Ti – Mo – W, армированного оксидными частицами с объемной долей наполнителя 2 – 5 об. %. За прототип матрицы был взят отечественный интерметаллидный сплав ВКНА-1В, содержащий 80 – 90 масс. % γ' -фазы. В качестве армирующих частиц были использованы частицы Al_2O_3 , а также сложные оксидные соединения $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$, $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3 \cdot HfO_2$. Порошки сплава ВКНА-1В были получены методом газовой атомизации на установке Hermiga (ФГУП «ВИАМ»). Порошки ВКНА-1В с оксидами исследуемых составов подвергали механическому легированию для формирования композиционной смеси, по своему составу отвечающему конечному композиционному материалу. Из порошковых смесей методом искрового плазменного спекания (ИПС) с дальнейшим горячим изостатическим прессованием (ГИП) были получены экспериментальные образцы композита с различным наполнением армирующими частицами. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) изучена микроструктура экспериментальных образцов. Определено время до разрушения при температуре 900 °С и напряжениях 50, 45 и 35 МПа экспериментальных образцов после ИПС и ИПС совмещенного с ГИП.

Ключевые слова: интерметаллиды, ВКНА, механическое легирование, горячее изостатическое прессование, композиционный материал, армирующие частицы, оксиды.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-10-19-27

Введение

Создание металлических композиционных материалов, армированных неметаллическими частицами оксидов, боридов и нитридов [1 – 3], — одно из направлений современного материаловедения, способствующее дальнейшему улучшению механических характеристик новых материалов как при комнатной, так и при повышенных температурах. Известно, что главное отличие дисперсно-упрочненных композиционных материалов от традиционных жаропрочных сплавов состоит в том, что упрочняющие фазы — это практически нерастворимые в матрице соединения, всегда ей некогерентные и исключительно медленно укрупняющиеся в объеме этих матриц. Если подобные фазы ввести в матричный материал и равномерно

распределить их по всему объему, то такие композиционные материалы будут оказывать высокое сопротивление ползучести, вплоть до $0,75 - 0,95 T_{пл}$, когда упрочняющий эффект от интерметаллидных и других растворимых упрочняющих фаз уже не наблюдается в силу дисперсионного механизма, характерного для гетерофазных сплавов. В дисперсно-упрочненных композиционных материалах эффект упрочнения достигается в основном за счет выполнения ряда требований, предъявляемых к композиту — это количество, размер и характер распределения вводимых армирующих частиц, обеспечивающих упрочняющий эффект в конечном композите [4 – 7].

Таким образом, в настоящее время, ставится задача создания новых высокотемпературных композиционных материалов (ВКМ), армирован-

ных тугоплавкими частицами, некогерентными с матрицей, обеспечивающими высокие показатели предела прочности при комнатной температуре, а также высокое сопротивление ползучести при высоких температурах [8, 9].

Интерметаллидные никелевые сплавы серии ВКНА-1В являются в своем роде уникальными и не имеют полных мировых аналогов, в связи с этим считаем, что композиционные материалы исследованных составов также не имеют аналогов.

Цель настоящей работы — получение экспериментальных образцов композиционных материалов марки ВКМ с матрицей на основе интерметаллидного сплава ВКНА-1В, армированного частицами оксидов в количестве 2 – 5 об. %.

Материалы и методики исследования

Для изготовления исследуемых композиций была использована технология порошковой металлургии, которая предусматривала следующие технологические этапы:

1. Изготовление вакуумной индукционной выплавкой матричного интерметаллидного сплава состава, масс. %: Al — 8,2 – 8,8; Cr — 4,5 – 5,5; W — 4,4 – 4,8; Mo — 3,2 – 3,8; Ti — 1,0 – 1,6; Hf — 0,4 – 0,8; Ni — остальное [10];

2. Получение гранул матричного сплава ВКНА-1В методом газовой атомизации на установке Hermiga (ФГУП “ВИАМ”) [11, 12];

3. Приготовление композиционной смеси, соответствующей составу конечного КМ методом механического легирования гранул сплава ВКНА-1В оксидными частицами разного химического состава в количестве 2 – 5 об. %, размером 70 – 150 нм, и последующая сфероидизация [13, 14];

4. Изготовление модельных компактных заготовок методом искрового плазменного спекания (ИПС) [15, 16];

5. Горячее изостатическое прессование полученных консолидированных заготовок на основе ВКМ для протекания диффузионных процессов, благоприятно влияющих на конечную структуру и устранения дефектов типа пор [17].

В работе использованы следующее оборудование и методы исследования:

— сканирующий электронный микроскоп Verios 460 XHL;

— растровая электронная микроскопия на установке JEM-200-CX;

— испытания на длительную прочность с определением времени до разрушения (критерий Ларсена-Миллера) на установке ZST2/3 ВИЭТ.

Результаты исследований и их обсуждение

Для получения гранул сплава ВКНА-1В в условиях ФГУП “ВИАМ” был использован метод газовой атомизации. В этом методе, струя расплавленного металла ВКНА-1В, истекающая из отверстия промежуточной ёмкости, подвергалась распылению на отдельные капли (гранулы) при помощи газового потока высокого давления (Ar). Затем была применена аэродинамическая классификация и рассев на виброгрохоте для выделения гранул определенной фракции. СЭМ-изображения гранул сплава ВКНА-1В после процесса атомизации, аэродинамической классификации и рассева по фракциям представлены на рис. 1.

После изготовления гранул нужного гранулометрического состава, их подвергали процессу механического легирования в специальных установках-атриторах. Целью механического легирования являлось получение конечной композиционной смеси гранул с равномерно распределенными во всем её объеме армирующими частицами, соответствующей составу конечного продукта. В качестве армирующих частиц были использованы оксид алюминия Al_2O_3 , а также сложные оксиды следующих составов: $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$, $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3 \cdot HfO_2$.

Структурообразование композиционных гранул, состоящих из матрицы-сплава ВКНА-1В и армирующих частиц вышеуказанных составов заключается в следующем: на начальной стадии процесса механического легирования образуются слоистые композиционные гранулы, состоящие из исходных компонентов. Дальнейшая стадия многократной деформации на границах раздела обрабатываемых гранул способствует вскрытию новых ювенильных поверхностей, а также приводит к дальнейшему утонению формирующихся при обработке слоев структурных составляющих, их измельчению и более равномерному распределению армирующих компонентов во всем объеме обрабатываемой смеси.

Таким образом, были получены композиционные составы ВКМ с различной объемной долей армирующих частиц. Для консолидирования композиционного порошка применяли метод искрового плазменного спекания (ИПС), который заключается в пропускании через спекаемый материал мощных импульсов постоянного тока, что способствует активации поверхности порошка. Вследствие образования искровой плазмы на границе раздела матрица – армирующий компонент, а также в пустотах типа пор, формируется монолит

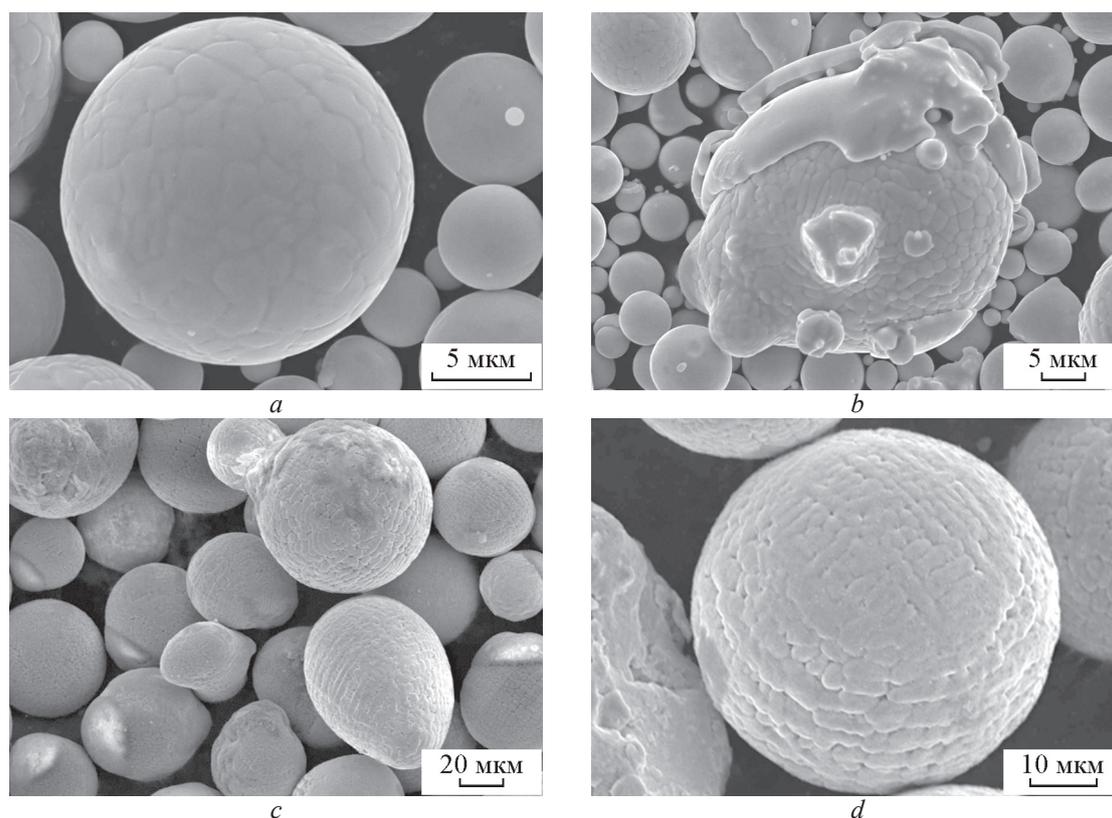


Рис. 1. Микроструктура гранул ВКНА-1В (W) после атомизации: *a* — дендритная структура поверхности бездефектной гранулы; *b* — дефекты и структура на поверхности гранул; *c, d* — структура сфероидизированных гранул фракции 40 – 75 мкм.

Fig. 1. Microstructure of VKNA-1V granules after atomization: *a* — dendritic surface structure of defect-free granule; *b* — defects and structure on the surface of the granules; *c, d* — structure of spheroidized granules fractions 40 – 75 microns.

КМ. Кратковременные выдержки при температурах спекания подавляют рост зерна и способствуют получению равновесного состояния прессуемого материала, в частности, композиционного материала на основе интерметаллидной матрицы, упрочнённой простыми и сложными оксидами (рис. 2).

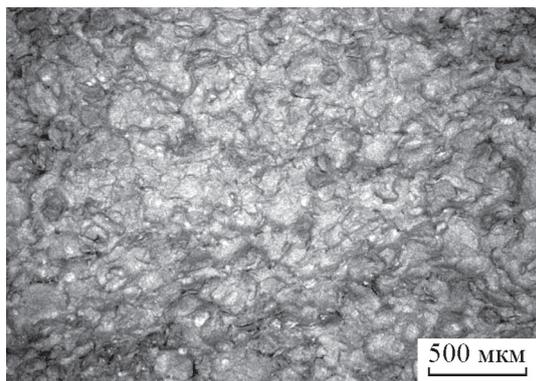
Для получения монолитного материала, композиционные гранулы помещали в цилиндрическую графитовую матрицу между двумя графитовыми пуансонами, к которым прикладывали электрическое напряжение и механическое давление. Композиционные гранулы подвергали искровому спеканию в вакууме при остаточном давлении 30 МПа с постепенным увеличением давления прессования на поверхности спекаемого материала, а также величины напряжения и силы тока. При прохождении электрического тока через пуансоны и матрицу происходил нагрев и одновременно одноосное прессование образца. Температуру в процессе спекания повышали ступенчато, время выдержки

при максимальной температуре спекания составило 3 – 6 мин. Далее осуществляли постепенное охлаждение материала до комнатной температуры. На рис. 3 представлена схема метода ИПС для получения композиционного материала ВКМ.

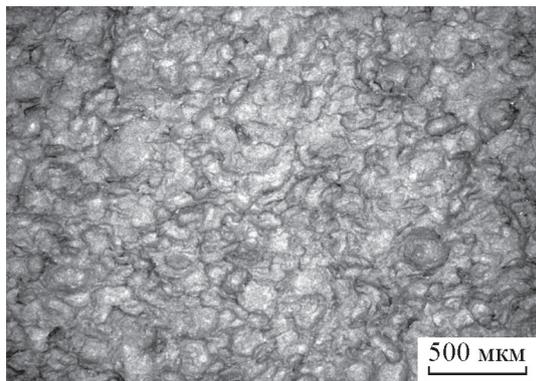
После получения консолидированных заготовок КМ марки ВКМ, их подвергали горячему изостатическому прессованию (ГИП) для прохождения диффузионных процессов и устранения пористости.

Для достижения поставленной технической задачи ГИП проводили в две ступени с последующим охлаждением. Первую ступень проводили при температуре T_S — 100 – 110 °С, затем экспериментальные заготовки нагревали до температуры T_L — 100 – 110 °С.

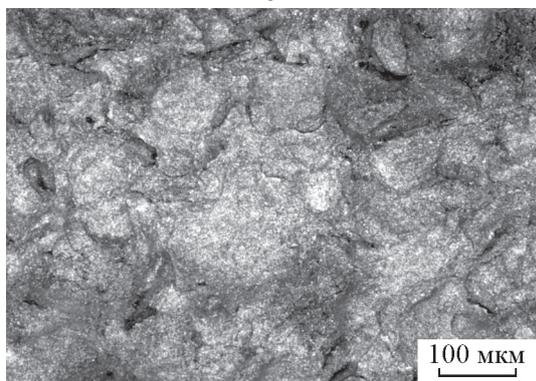
Исследования микроструктуры дисперсно-упрочнённой интерметаллидной композиции, полученной только методом ИПС, и методами ИПС и ГИП, показали, что выбранные режимы искрового



a



b



c

Рис. 2. Структура композиции, полученной ИПС методом, на основе интерметаллидной матрицы ВКНА-1В, упрочнённой: а — 5 об. % оксида алюминия Al_2O_3 ; б — 5 об. % сложного оксида $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$; с — 5 об. % сложного оксида $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3 \cdot HfO_2$.

Fig. 2. Structure of the composition obtained by the SPS method based on intermetallic matrix VKNA-1V hardened by: a — 5 % of Al_2O_3 ; b — 5 % of $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$; c — 5 % of $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3 \cdot HfO_2$.

плазменного спекания не позволяют получать бездефектную структуру, образцы МКМ имеют микропоры и микротрещины.

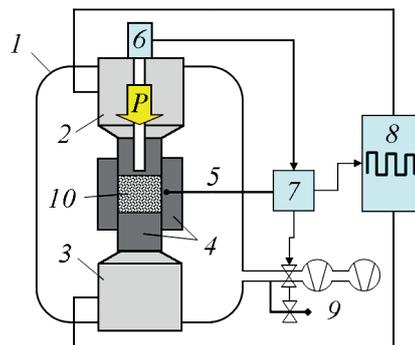


Рис. 3. Схема установки ИПС: 1 — рабочая камера; 2 — верхний (подвижный) пуансон; 3 — нижний пуансон; 4 — графитовая оснастка; 5 — термопара; 6 — пирометр; 7 — контроллер системы; 8 — генератор импульсов постоянного тока; 9 — модули создания печной атмосферы; 10 — спекаемый материал.

Fig. 3. SPS installation scheme: 1 — work chamber; 2 — top (movable) punch; 3 — lower punch; 4 — graphite tooling; 5 — thermocouple; 6 — pyrometer; 7 — system controller; 8 — DC pulse generator; 9 — furnace atmosphere modules; 10 — sintering material.

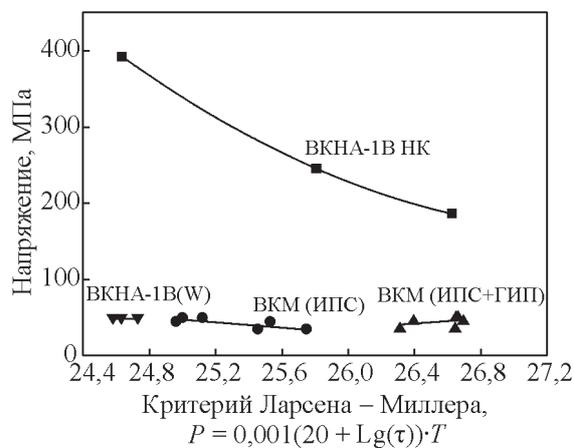


Рис. 4. Сравнительные показатели времени до разрушения литейного интерметаллидного сплава ВКНА-1В и гранульных интерметаллидных композиций, полученных различными методами.

Fig. 4. Comparative time up to failure of casting intermetallic alloy VKNA-1V and granular compositions based on intermetallic matrix obtained by various methods.

Для устранения несплошностей и снижения объёмной доли микропористости проводили баротермическую обработку образцов композиционно-

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из композиционного материала марки ВКМ при температуре 900 °С и напряжениях 35, 45, 50 МПа

Table 1

The mechanical test results of samples of composite material VKM ($T = 900\text{ °C}$, $\sigma = 35, 45, 50\text{ МПа}$).

Состав МКМ и интерметаллидной матрицы	Технология получения образцов	Время до разрушения, ч		
		900 °С, 50 МПа	900 °С, 45 МПа	900 °С, 35 МПа
ВКНА-1В(W) + 2 % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2$	Атомайзер + атритор + ИПС	26; 20,5	58; 19	50; 89
	Атомайзер + атритор + ИПС + ГИП	538; 525	572; 318	270; 520
ВКНА-1В(W)	Атомайзер + ИПС	10; 12; 9	—	—

го материала в газостате по режимам, отработанным для интерметаллидных сплавов на основе никеля. Влияние двух режимов изготовления компактных заготовок металлического композиционного материала на основе легированного соединения Ni_3Al определяли по времени до разрушения при тем-

пературе 900 °С и напряжениях 35; 45 и 50 МПа (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что с введением дополнительной операции газостатирования для одного и то же состава компакта металлокерамического композиционного материала образцы показывают время до

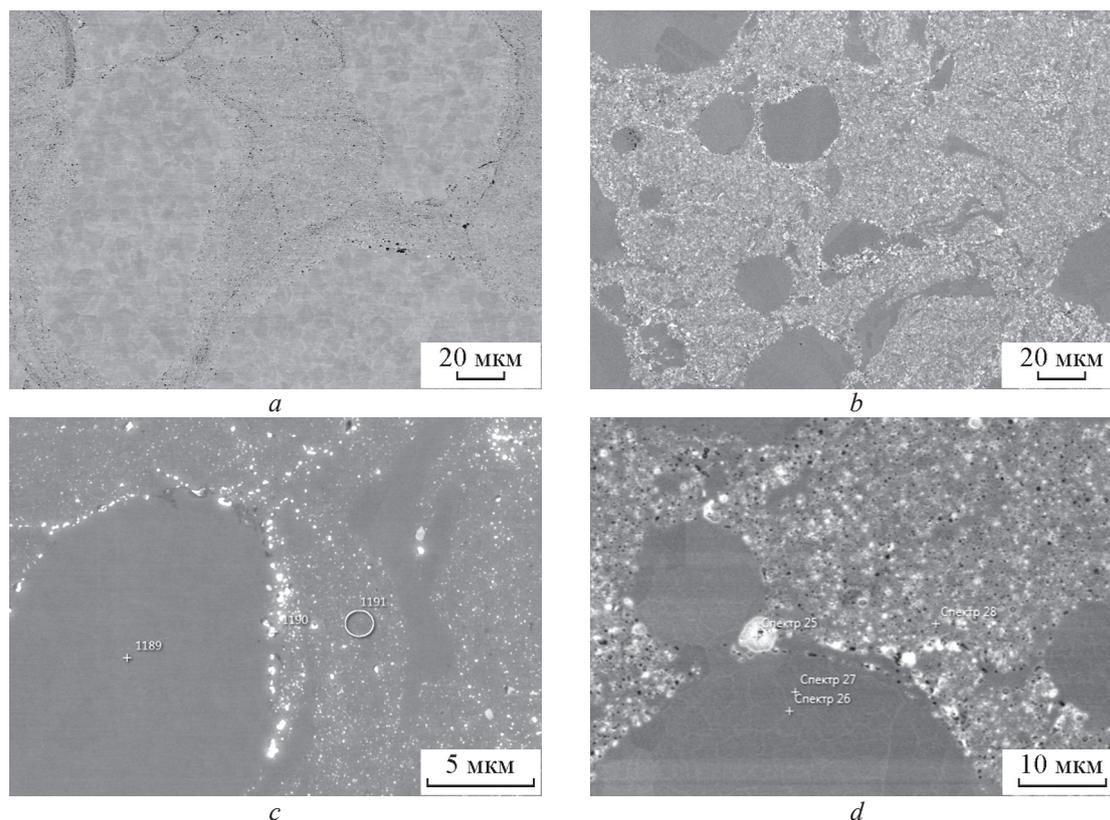


Рис. 5. СЭМ-изображения микроструктура образцов исследуемого композиционного материала: *a, c* — после ИПС; *b, d* — после ИПС и ГИП; *a, b* — интерметаллидная матрица, упрочнённая 2 об. % сложного оксида $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2$; *c, d* — упрочнённая 5 об. % армирующего компонента $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2$.

Fig. 5. Microstructure of composite material samples: *a, c* — after SPS; *b, d* — after SPS and HIP; *a, b* — intermetallic matrix hardened by 2 % complex oxide $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2$; *c, d* — hardened by 5 % reinforcing component $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2$.

разрушения в 10 – 20 раз большее, чем без использования газостата, но тем не менее, его значения остаются низкими, по отношению к значениям интерметаллидного сплава матричного состава, полученного методом направленной кристаллизации (рис. 4). При сравнении показателя времени до разрушения (при 900 °С, 50 МПа) образцов, полученных из матричного интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al по гранульной технологии, то есть распылением на атомайзере на гранулы с последующим компактированием и спеканием методом ИПС, и на образцах, изготовленных по этой же технологической схеме из композиционных гранул, то есть обогащенных оксидами, видим, что матричный материал показал худшее время— 10, 12 и 9 ч, соответственно. Вероятно, это связано с наличием микротрещин и микропор в консолидированном методом ИПС матричном материале, поскольку отсутствуют упрочняющие дисперсные частицы. В то же время, недостаточная проработка границ между матрицей и дисперсными частицами, а также неравномерное распределение частиц оксидов, основное их количество располагается на поверхности гранул (рис. 5), в композиционном материале не приводят к требуемому уровню свойств. При проведении баротермической обработки консолидированных заготовок ВКМ, армированных сложными оксидами $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3 \cdot HfO_2$, происходит “залечивание” микропор и микротрещин (рис. 5b, 5d), что характеризуется значительным повышением прочности по времени до разрушения образцов.

Однако для использования дисперсно-упрочнённого композиционного материала на основе интерметаллидной матрицы в качестве конструкционного сплава показатели длительной прочности при 900 °С (по времени до разрушения) низкие, по сравнению с матричным материалом и требуется доработка технологической схемы изготовления, термической/баротермической обработки МКМ.

Выводы

Представлена технология получения экспериментальных образцов композиционного материала на основе интерметаллидного соединения типа Ni_3Al , армированного оксидными частицами в количестве 2 – 5 об. %. За прототип матрицы был взят отечественный интерметаллидный сплав ВКНА-1В, содержащий 80 – 90 масс. % γ' -фазы. В качестве армирующих частиц были использованы частицы Al_2O_3 , а также сложные оксидные соединения $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$, $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3 \cdot HfO_2$.

Изучена микроструктура экспериментальных образцов. Определен уровень показателей длительной прочности при температуре испытаний 900 °С (по времени до разрушения) экспериментальных образцов. Показано, что для получения монолитного композиционного материала, армированного сложными оксидами, проведения газостатирования недостаточно, требуется доработка технологического процесса изготовления материала марки ВКМ.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 7.3 “Интерметаллидные никелевые сплавы и композиционные материалы на их основе” и 12: “Металломатричные и полиматричные композиционные материалы” (“Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года”) [1, 2].

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. 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, № S, с. 7 – 17.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14. Крылья Родины, 2019, № 7 – 8, с. 54 – 58.
4. Бурковская Н.П., Ефимочкин И.Ю., Базылева О.А. и др. Исследование структурных особенностей, прочностных свойств и жаростойкости дисперсно-упрочнённого композиционного материала на основе интерметаллида никеля. Материаловедение, 2016, № 3, с. 8 – 15.
5. Родионов А.И., Большакова А.Н., Ефимочкин И.Ю. Исследование влияния природы и концентрации оксидных армирующих наполнителей на прочностные характеристики сплава ВКНА-4У. Перспективные материалы, 2017, № 12, с. 18–25
6. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов. Авиационные материалы и технологии, 2018, № 2 (51), с. 3 – 8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8
7. Гращенков Д.В., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Высокотемпературные металломатричные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений. Авиационные материалы и технологии, 2017, № S, с. 318 – 328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318–328

8. Большакова А.Н., Ефимочкин И.Ю., Мурашева В.В. Механически легированные дисперсно-упрочнённые композиционные материалы. Конструкции из композиционных материалов, 2015, № 1 (137), с. 36 – 40.
9. Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Ефимочкин И.Ю., Щеглова Т.М. Монокристаллические волокна оксида алюминия для высокотемпературных (до 1400 °С) композиционных материалов. Технология машиностроения, 2014, № 10, с. 5 – 9.
10. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Купцов Р.С., Ефимочкин И.Ю. Металлокерамический композиционный материал на основе интерметаллидной матрицы и способ его получения. Патент РФ № 2686831, 2018110148; заявл. 22.03.2018; опубл. 30.04.2019. Бюл. № 13.
11. Evgenov A.G., Afanas'ev-Khodykin A.N., Nerysh S.V., Rogalev A.M. Metallurgical aspects of production of solder powders for vacuum diffusion brazing. Metallurgist, 2014, v. 57, no. 11 – 12, p. 1120 – 1125.
12. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Неруш С.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Щербakov А.И., Роголев А.М. Способ получения металлического порошка. Патент РФ 2492028, №2012127429/02; заявл. 02.07.2012; опубл. 10.09.2013 Бюл. № 25
13. Котляров В.И., Бешкарев В.Т., Карцев В.Е., Иванов В.В., Гасанов А.А., Южакова Е.А., Самохин А.В., Фадеев А.А., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Третьяков Е.В. Получение сферических порошков для аддитивных технологий на основе металлов IV группы. Физика и химия обработки материалов, 2016, № 2, с. 63 – 70.
14. Цветков Ю.В., Самохин А.В., Фадеев А.А., Алексеев Н.В., Котляров В.И. Сфероидизация металлических порошков в термической плазме электродугового разряда. Технология легких сплавов, 2016, № 2, с. 19 – 24.
15. Гращенков Д.В., Евдокимов С.А., Жестков Б.Е., Солнцев С.Ст., Шгапов В.В. Исследование термического воздействия потока воздушной плазмы на высокотемпературный керамический композиционный материал. Авиационные материалы и технологии, 2017, № 2 (47), с. 31 – 40. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-31-40
16. Гращенков Д.В. Перспективы применения искрового плазменного спекания для создания высокотемпературных композиционных материалов. В сборнике: Высокотемпературные керамические композиционные материалы. II научно-техническая конференция, ВИАМ, 2016, с. 5, <https://conf.viam.ru/conf/200/proceedings>
17. Оспенникова О.Г., Калицев В.А., Евгенов А.Г., Базылева О.А. Совмещение процессов ГИП и термической обработки поликристаллических отливок из сплава на основе Ni₃Al. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия: Машиностроение, 2011, SP2, с. 88 – 97.

References

1. Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP “VIAM” GNC RF po realizacii “Strategicheskikh napravleniy razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda” [Innovative developments of FSUE “VIAM” for implementation of “Strategic directions of development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030 year”]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2015, no. 1, pp. 3 – 33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030 year]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2012, no. S, pp. 7 – 17.
3. Kablov E.N. VIAM: materialy novogo pokoleniya dlya PD-14 [VIAM: materials of new generation for PD-14]. *Kryl'ya Rodiny — Wings of the motherland*, 2019, no. 7 – 8, pp. 54 – 58.
4. Burkovskaya N.P., Efimochkin I.Yu., Bazyleva O.A. et al. Issledovanie strukturnykh osobennostey, prochnostnykh svoystv i zharostoykosti dispersno-uprochnennogo kompozitsionnogo materiala naosnove intermetallida nikelya [Study of structure features, strength properties and heat resistance of dispersion hardened composite based on nickel intermetallic]. *Materialovedenie — Material Science*, 2016, no. 3, pp. 8 – 15.
5. Rodionov A.I., Bolshakova A.N., Efimochkin I.Yu. Issledovanie vliyaniya prirody i koncentracii oksidnykh armiruyushikh napolniteley na prochnostnye kharakteristiki splava VKNA-4U [Study of the influence of nature and concentration of oxide reinforcing filler on strength properties the VKNA-4U alloy]. *Perspektivnye Materialy — Advanced Materials (in Russ)*, 2017, no. 12, pp. 18 – 25.
6. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problemy sozdaniya i perspektivy ispolzovaniya zharoprochnykh vysokoentropiynykh spлавov [Problems of creating and prospects of use heat-resistance highly entropic material]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2018, no. 2 (51), pp. 3 – 8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
7. Grashenkov D.V., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Vysokotemperaturnye metallomatrchnye kompozitsionnye materialy, armirovannye chastitcami i voloknami tugoplavkikh soedineniy [High-temperature composites with metal matrix reinforced by particles and fibers of refractory compounds]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. S, pp. 318 – 328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318-328.

8. Bolshakova A.N., Efimochkin I.Yu., Murasheva V.V. Mekanicheski legirovannye dispersno-uprochnennye kompozitsionnye materialy [Mechanically alloyed dispersion hardened compositions]. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov — Composite Materials Constructions*, 2015, no. 1 (137), pp. 36 – 40.
9. Shetanov B.V., Grashenkov D.V., Efimochkin I.Yu., Sheglova T.M. Monokristallicheskie volocna oksida aluminiya dlya vysokotemperaturnykh (do 1400 °C) kompozitsionnykh materialov [Single-crystal alumina oxide fibers for high-temperatures (up to 1400 °C) composite materials]. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Engineering technology*, 2014, no. 10, pp. 5 – 9.
10. Efimochkin I.Yu., Kuptsov R.S., Arginbayeva E.G., Bazyleva O.A., Grashchenkov D.V., Kablov Ye.N. *Metallokeramichesky kompozitsionny material na osnove intermetallidnoy matritsy i sposob ego polucheniya* [Cermets composite material based on intermetallic matrix and method for producing it]. Patent RF 0002686831, declared 22.03.2018, publ. 30.04.2019.
11. Evgenov A.G., Afanas'ev-Khodykin A.N., Nerysh S.V., Rogalev A.M. Metallurgical aspects of production of solder powders for vacuum diffusion brazing. *Metallurgist*, 2014, vol. 57, no. 11 – 12, pp. 1120 – 1125.
12. Rogalev A.M., Shcherbakov A.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Nerush S.V., Yevgenov A.G., Kablov Ye.N. *Sposob polucheniya metallicheskogo poroshka* [Method for producing metal powder. Patent RF 2492028, declared 02.07.2012, published 10.09.2013.
13. Kotlyarov V.I., Beshkarev V.T., Kartcev V.E., Ivanov V.V., Gasanov A.A., Yuzhakova E.A., Samokhin A.V., Fadeev A.A., Alekseev N.V., Sinayskiy M.A., Tretyakov E.V. Poluchenie sfericheskikh poroshkov dly aadditivnykh tekhnologii na osnove metallov IV gruppy [Production of spherical powders for additive technologies based on metal of IV group]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment* (in Russ), 2016, no. 2, pp. 63-70.
14. Tsvetkov Yu.V., Samokhin A.V., Fadeev A.A., Alekseev N.V., Kotlyarov V.I. Sferoidizatsiya metallicheskih poroshkov v termicheskoy plazme elektrodugovogo razryada [Spheroidization of metal powders in thermal plasma of an electric arc discharge]. *Tekhnologiya legkikh splavov — Light alloys technology*, 2016, no. 2, pp. 19 – 24.
15. Grashenkov D.V., Evdokimov S.A., Zhestkov B.E., Solntcev S.S., Shtapov V.V. Issledovanie termokhimicheskogo vozdeystviya potoka vozdushnoy plazmy na vysokotemperaturniy keramicheskiy kompozitsionny material [Study of thermochemical effects of air plasma flow for high-temperature ceramic composite material]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. 2 (47), pp. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-31-40.
16. Grashenkov D.V. *Perspektivy primeneniya iskrovogo plazmennogo spekaniya dlya sozdaniya vysokotemperaturnykh kompozitsionnykh materialov* [Prospects for the use of spark plasma sintering for creating high-temperature composite materials]. *Vysokotemperaturnye keramicheskiye kompozitsionnye materialy. II nauchno-tekhnicheskaya konferenciya* [High-temperature ceramic composite materials. II scientific and technical conference], 2016, p. 5.
17. Ospennikova O.G., Kalitcev V.A., Evgenov A.G., Bazyleva O.A. Sovmechenie processov GIP i termicheskoy obrabotki polikristallicheskih otlivok iz splava na osnove Ni₃Al [Combination of processes HIP and heat treatment for polycrystalline castings from the alloy based on Ni₃Al]. *Vestnik MGTU im. Baumana, ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2011, SP 2, pp. 88 – 97.

Статья поступила в редакцию — 11.12.2019 г.
после доработки — 26.05.2020 г.
принята к публикации — 27.05.2020 г.

Базылева Ольга Анатольевна — Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ, 105005, Москва, ул. Радио, 17), кандидат технических наук, заместитель начальника лаборатории по науке, специалист в области интерметаллидных сплавов на основе Ni₃Al. E-mail: intermetallidbaz@gmail.com.

Аргинбаева Эльвира Гайсаевна — Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ, 105005, Москва, ул. Радио, 17), кандидат технических наук, начальник сектора, специалист в области интерметаллидных сплавов на основе Ni₃Al. E-mail: elargin@mail.ru.

Ефимочкин Иван Юрьевич — Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ, 105005, Москва, ул. Радио, 17), заместитель начальника лаборатории, специалист в области высокотемпературных композиционных материалов с металлической матрицей.

Купцов Роман Сергеевич — Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ, 105005, Москва, ул. Радио, 17), инженер 2 категории, специалист в области высокотемпературных композиционных материалов с металлической матрицей.

Карашаев Мухамед Муаедович — Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ, 105005, Москва, ул. Радио, 17), кандидат технических наук, ведущий инженер, специалист в области высокотемпературных композиционных материалов с металлической матрицей. E-mail: lab3@viam.ru.

Composite material based on intermetallic alloy VKNA type reinforced with oxide particles

O. A. Bazyleva, I. Yu. Efimochkin, E. G. Arginbaeva, R. S. Kuptsov, M. M. Karashaev

The technology of obtaining of composite material experimental samples based on VKNA type an intermetallic alloy reinforced with oxide particles in an amount of 2 – 5 vol. % is presented. An intermetallic VKNA-1V alloy containing the 80 – 90 mas. % of γ -phase was used as the matrix prototype. Al_2O_3 particles, as well as complex oxides $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$, $Al_2O_3 \cdot Y_2O_3 \cdot HfO_2$, were used as reinforcing particles. Granules of VKNA-1V alloy were obtained by gas atomization at the Hermiga Gas Atomiser. Subsequently, these granules were subjected to mechanical alloying with the aim of introducing particles of the above mentioned oxides compositions to form a composite mixture corresponding in composition to the aimed composite material. Experimental composite material samples with different reinforcing particles contents were obtained from powder mixtures by spark plasma sintering (SPS) with further hot isostatic pressing (HIP). To study the microstructure of experimental samples the method of scanning electron microscopy was used. Time to failure of experimental samples sintered by spark plasma combined with HIP was determined at a temperature of 900 °C and stress of 50 MPa; 45 MPa and 35 MPa. It is shown that to determine the application areas of the developed composition, the hot isostatic pressing operation is necessary, but not sufficient.

Keywords: intermetallic compounds, VKNA, mechanical alloying, hot isostatic pressing, composite material, reinforcing particles, oxides.

Bazyleva Olga — All-Russian scientific research institute of aviation materials (FSUE VIAM, Moscow, 105005, Radio st., 17), PhD (Eng), deputy head of laboratory Ni-based superalloys, specialist in the field of intermetallic alloys based on Ni₃Al. E-mail: intermetallidbaz@gmail.com.

Arginbaeva Elvira — All-Russian scientific research institute of aviation materials (FSUE VIAM, Moscow, 105005, Radio st., 17), PhD (Eng), head of sector of laboratory Ni-based superalloys, specialist in the field of intermetallic alloys based on Ni₃Al. E-mail: elargin@mail.ru.

Efimochkin Ivan — All-Russian scientific research institute of aviation materials (FSUE VIAM, Moscow, 105005, Radio st., 17), deputy head of laboratory Metal composite materials, specialist in the field of high-temperature composite materials with metal matrix.

Kuptsov Roman — All-Russian scientific research institute of aviation materials (FSUE VIAM, Moscow, 105005, Radio st., 17), engineer of laboratory Metal composite materials, specialist in the field of high-temperature composite materials with metal matrix.

Karashaev Mukhamed — All-Russian scientific research institute of aviation materials (FSUE VIAM, Moscow, 105005, Radio st., 17), PhD (Eng), lead engineer, specialist in the field of high-temperature composite materials with metal matrix.