

УДК 666.3.017 : 666.3 – 184.4 : 539.422.53 : 669.245

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-30-37

Получение и исследование металлокерамических композитов системы Ni–Al–O с малой добавкой наночастиц MgAl_2O_4

© 2019 г. Л.Е. Агуреев, В.И. Костиков, И.Н. Лаптев, А.И. Канушкин, Ж.В. Еремеева, А.В. Иванов, А.А. Ашмарин, Е.А. Высотина, Б.С. Иванов

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 21.08.19 г., доработана 16.09.19 г., подписана в печать 18.09.19 г.

Приводятся результаты получения и исследования структуры и свойств керметов на основе порошков оксида алюминия и никель-алюминиевого сплава с добавкой 0,1 мас.% наночастиц алюмомагниевого шпинели, спеченных электроискровым методом на установке FCT-HP D 25 в среде аргона при температуре $t = 1470^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Представлены результаты ТГ- и ДСК-анализа шихты $\text{NiAl-65Al}_2\text{O}_3$ при температурах до 1300°C . Установлено, что шпинель MgAl_2O_4 в виде отдельных наночастиц (60 нм) или агрегатов (менее 700 нм) присутствует по границам зерен композита. Для описания механизмов деградации прочностных свойств разрабатываемых материалов были проведены исследования внутреннего трения при $t = 20\div 900^\circ\text{C}$ и высокотемпературный рентгенофазовый анализ при $t = 700, 800$ и 900°C . Показано влияние наночастиц на внутреннее трение композита в интервале $\Delta t = 20\div 900^\circ\text{C}$ в системе $\text{NiAl-65Al}_2\text{O}_3\text{-}0,1\text{MgAl}_2\text{O}_4$. Обсуждены возможные механизмы деградации прочностных свойств керметов при повышении температуры. Выдвинуто предположение о том, что появление при высоких температурах экстремумов на кривых внутреннего трения может быть вызвано смещением границ фаз интерметаллидов и оксидной составляющей из-за разных коэффициентов термического расширения (КТР). Обнаружено положительное влияние добавок наночастиц шпинели на кратковременную жаропрочность керметов при $t = 750^\circ\text{C}$. Исследование кратковременной жаропрочности при $t = 750^\circ\text{C}$ показало, что образец с наночастицами более стабилен, чем немодифицированный образец, что, согласно теории Образцова–Лурье–Белова и ряду проведенных на металлических матрицах исследований, можно связать с влиянием сформировавшихся межфазных зон упрочнения вокруг наночастиц.

Ключевые слова: кермет, никель-алюминий, оксид алюминия, шпинель, внутреннее трение, высокотемпературный рентгенофазовый анализ, жаропрочность.

Агуреев Л.Е. – канд. техн. наук, науч. сотр. отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» (125438, г. Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: trynano@gmail.com.

Костиков В.И. – докт. техн. наук, проф. кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМиФП), НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4).

Лаптев И.Н. – инженер отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». E-mail: rvah@mail.ru.

Канушкин А.И. – инженер отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». E-mail: kanushkin.andrey@icloud.com.

Еремеева Ж.В. – докт. техн. наук, доцент кафедры ПМиФП, НИТУ «МИСиС». E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Иванов А.В. – инженер отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».

Ашмарин А.А. – канд. техн. наук, инженер отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». E-mail: ashmarin_artem@list.ru.

Высотина Е.А. – инженер отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».

Иванов Б.С. – инженер отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». E-mail: ibs@live.ru.

Для цитирования: Агуреев Л.Е., Костиков В.И., Лаптев И.Н., Канушкин А.И., Еремеева Ж.В., Иванов А.В., Ашмарин А.А., Высотина Е.А., Иванов Б.С. Получение и исследование металлокерамических композитов системы Ni–Al–O с малой добавкой наночастиц MgAl_2O_4 . Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2019. No. 4. С. 30–37. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-30-37.

Agureev L.E., Kostikov V.I., Laptev I.N., Kanushkin A.I., Eremeeva Zh.V., Ivanov A.V., Ashmarin A.A., Vysotina E.A., Ivanov B.S.

Preparation and study of Ni–Al–O system cermet composites with a small addition of MgAl_2O_4 nanoparticles

The paper presents the results of obtaining and studying the structure and properties of cermets based on powders of aluminum oxide and nickel-aluminum alloy doped with 0.1 wt.% of aluminum-magnesium spinel nanoparticles sintered by the electrospark method on the FCT-HP D 25 unit in argon at $t = 1470^\circ\text{C}$ for 30 min. The results of the $\text{NiAl-65Al}_2\text{O}_3$ charge TG and DSC analysis at

up to 1300 °C are presented. It is found that MgAl_2O_4 spinel in the form of individual nanoparticles (60 nm) or aggregates (less than 700 nm) are present along the grain boundaries of the composite. Internal friction studies at $t = 20\div 900$ °C and high-temperature X-ray phase analysis at $t = 700, 800$ and 900 °C were carried out to describe strength properties degradation mechanisms of the developed materials. The effect of nanoparticles on the internal friction of the composite within $\Delta t = 20\div 900$ °C in the $\text{NiAl}-65\text{Al}_2\text{O}_3-0.1\text{MgAl}_2\text{O}_4$ system is shown. Potential mechanisms for cermet strength properties degradation with increasing temperature are discussed. It is suggested that the appearance of extrema on internal friction curves at high temperatures can be caused by shifted phase boundaries of intermetallic compounds and the oxide component due to different coefficients of thermal expansion (CTE). A positive effect of doping with spinel nanoparticles on the short-term heat resistance of cermets at $t = 750$ °C is found. The study of short-term heat resistance at $t = 750$ °C showed that the sample with nanoparticles is more stable than the unmodified sample, which can be associated with the influence of interfacial hardening zones formed around nanoparticles according to the Obratzsov-Lurie-Belov theory and a number of studies carried out on metal matrices.

Keywords: cermet, nickel-aluminum, alumina, spinel, internal friction, high-temperature X-ray phase analysis, high temperature strength.

Agureev L.E. – Cand. Sci. (Tech.), scientific researcher of the Nanotechnology Department, State Research Center «Keldysh Center» (125438, Russia, Moscow, Onezhskaya str., 8). E-mail: trynano@gmail.com.

Kostikov V.I. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of powder metallurgy and functional coatings (PM&FC) of National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4).

Laptev I.N. – engineer of the Nanotechnology Department, State Research Center «Keldysh Center». E-mail: rvah@mail.ru.

Kanushkin A.I. – engineer of the Nanotechnology Department, State Research Center «Keldysh Center». Email: kanushkin.andrey@icloud.com.

Eremeeva Zh.V. – Dr. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of PM&FC of NUST «MISIS». E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Ivanov A.V. – engineer of the Nanotechnology Department, State Research Center «Keldysh Center».

Ashmarin A.A. – Cand. Sci. (Tech.), engineer of the Nanotechnology Department, State Research Center «Keldysh Center». E-mail: ashmarin_artem@list.ru.

Vysotina E.A. – engineer of the Nanotechnology Department, State Research Center «Keldysh Center».

Ivanov B.S. – engineer of the Nanotechnology Department, State Research Center «Keldysh Center». E-mail: ibs@live.ru.

Citation: Agureev L.E., Kostikov V.I., Laptev I.N., Kanushkin A.I., Eremeeva Zh.V., Ivanov A.V., Ashmarin A.A., Vysotina E.A., Ivanov B.S. Preparation and study of Ni–Al–O system cermet composites with a small addition of MgAl_2O_4 nanoparticles. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2019. No. 4. P. 30–37 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-30-37.

Введение

Металлокерамические материалы на основе никеля с добавлением различных тугоплавких оксидов обладают высокими прочностными и антикоррозионными свойствами при повышенных температурах [1–5]. Они могут использоваться для изготовления конструкций энергетических установок, работающих на расплавленных солях [6–9]. Такие материалы обладают необходимой пластичностью, обеспечиваемой металлическими составляющими. Кроме того, ряд исследований показал, что ввод в металл малых добавок тугоплавких наночастиц способствует существенному повышению его механических свойств [10–12]. Согласно целой плеяде работ [13–19], посвященных исследованию влияния на металлы или керамику наночастиц тугоплавких соединений, находящихся на границе зерен матрицы, они оказывают следующие воздействия:

— измельчают зерно, не давая расти и перемещаться границам, увеличивая предел текучести

и разрушающее напряжение, сохраняя расстояние между собой и стабилизируя приобретенную структуру на стадии холодного прессования. Являются препятствием для движения фронта дислокаций, так как сохраняют некогерентность на границе зерен [13, 15–17];

— способствуют упрочнению по механизму двойных границ зерен [16, 18];

— тормозят ползучесть по границам зерен, вдавливаясь в матрицу и поворачиваясь при распространении трещины [15, 19];

— ограничивают зарождение и способствуют аннигиляции вакансий, повышая сопротивление ползучести по границам зерен [14];

— препятствуют диффузии молекул окислителя, адсорбируя его на своей поверхности [13].

В данной работе были получены образцы металлокерамики на основе никель-алюминиевого сплава и оксида алюминия с малой добавкой алумомагнетитовой шпинели.

Цель работы — получение образцов керметов системы $\text{NiAl}-65\text{Al}_2\text{O}_3$ с добавкой наночастиц алюмомагнетитовой шпинели, исследование их структуры, особенностей фазообразования и физико-механических свойств в широком интервале температур.

Материалы и методы исследования

Для изготовления образцов керметов различного состава (см. таблицу) применяли следующие порошки: ПВ-Н70Ю30 (20–63 мкм, Ni — 69 %, Al — 30,5 %, АО «Полема», г. Тула), оксид алюминия ЧДА (20 мкм, 97 %, Донецкий завод химических реактивов), нанопорошок шпинели (10 нм, $100 \text{ м}^2/\text{г}$, > 99 %, РХТУ, г. Москва). Для смешения использовали планетарную центробежную мельницу «Активатор-2 SL» (ООО «Завод химического машиностроения», р.п. Дорогино, Новосибирская обл.) со стальными стаканами и шарами диаметром 5 мм и соотношением порошок : шары = 1 : 3, скорость вращения диска 700 об/мин. Ввод наночастиц шпинели в количестве 0,1 мас.% проводили в изопропиловом спирте с добавлением 0,1 мас.% олеиновой кислоты под воздействием ультразвука и непрерывного перемешивания лопастной мешалкой. Прессование и спекание осуществляли электроискровым методом на установке FCT-HP D 25 (FCT Systeme GmbH, Германия) в среде аргона при температуре 1470°C в течение 30 мин и давлении прессования 50 МПа. Образцы получали в виде цилиндров с параметрами $\varnothing 30 \times 3$ мм. Предел прочности определяли при комнатной и повышенной (750°C) температурах методом трехточечного изгиба на универсальной испытательной машине «TestSystems-ВакЭто» (ГНЦ ФГУП Центр Келдыша, г. Москва). Модуль упругости и внутреннее трение оценивали с помощью ультразвуковой установки «Муза» при $t = 20$ и 750°C . Микроструктуру изучали на сканирующем электронном микроскопе «FEI Quanta 600 FEG» (FEI, Нидерланды). Термогравиметрический анализ и дифференциальную калориметрию порошка шихты проводили при температу-

рах $20-1300^\circ\text{C}$ на термоанализаторе «STA 449 F1 Jupiter» (NETZSCH, Германия) с блоком «QMS 403 Aeolos» для масс-спектрометрических измерений. Рентгеноструктурный анализ осуществляли на установке «Empyrean» (PANalytical, Нидерланды) с высокотемпературной приставкой.

Результаты и их обсуждение

Спрессованную шихту составов $\text{NiAl}-65\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{NiAl}-65\text{Al}_2\text{O}_3-0,1\text{MgAl}_2\text{O}_4$ подвергли ТГ- и ДСК-анализу до $t = 1300^\circ\text{C}$ (рис. 1), результаты которых подтвердили ее стабильность на всем температурном промежутке (кривые для шихт обоих составов идентичны). Незначительное изменение массы до 600°C связано с испарением влаги, выгоранием растворителя (изопропиловый спирт) и ПАВ.

На рис. 2 представлена микроструктура смеси порошков NiAl и Al_2O_3 , полученной в планетарной мельнице. Зерна имеют различный размер, в основном менее 15 мкм, а также субмикронные масштабы (менее 1 мкм).

Рис. 3 иллюстрирует микроструктуру образца $\text{NiAl}-65\text{Al}_2\text{O}_3-0,1\text{MgAl}_2\text{O}_4$. Зерна (менее 10 мкм) или конгломераты зерен (20–200 мкм) никелевого сплава расположены по границам зерен матрицы из оксида алюминия, размер которых находится в пределах 10–50 мкм. Шпинель MgAl_2O_4 в виде отдельных наночастиц (60 нм) или агрегатов (менее 700 нм) присутствует по границам зерен композита.

Для описания механизмов деградации прочностных свойств разрабатываемых материалов были проведены исследования внутреннего тре-

Состав образцов, мас. %

Образец	NiAl	Al_2O_3	MgAl_2O_4
1	35,0	65	0
2	34,9	65	0,1

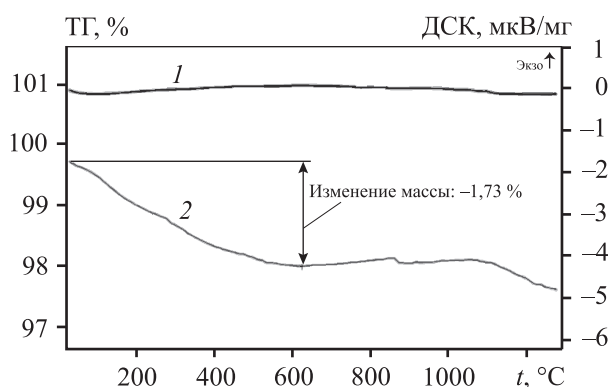


Рис. 1. Результаты термических анализов образцов керметов
1 — ДСК, 2 — ТГ

ния при $t = 20\div 900$ °С и высокотемпературный рентгенофазовый анализ при $t = 700, 800$ и 900 °С, результаты которых представлены на рис. 4 и 5.

До температуры 700 °С структуры фаз становятся более совершенными, о чем свидетельствуют узкие четкие рефлексы на рентгенограммах до 800 °С,

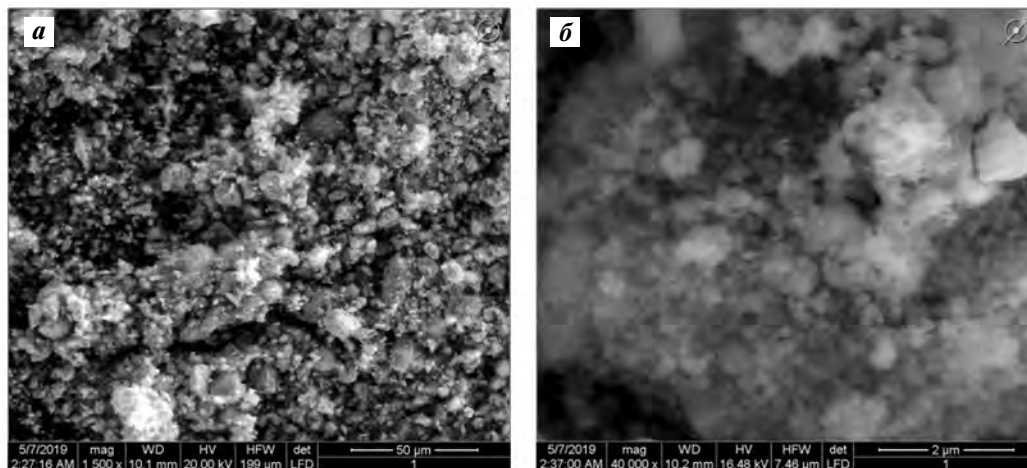


Рис. 2. Смесь порошков NiAl и Al_2O_3 после обработки в планетарной мельнице при увеличениях $1500\times$ (а) и $40\,000\times$ (б)

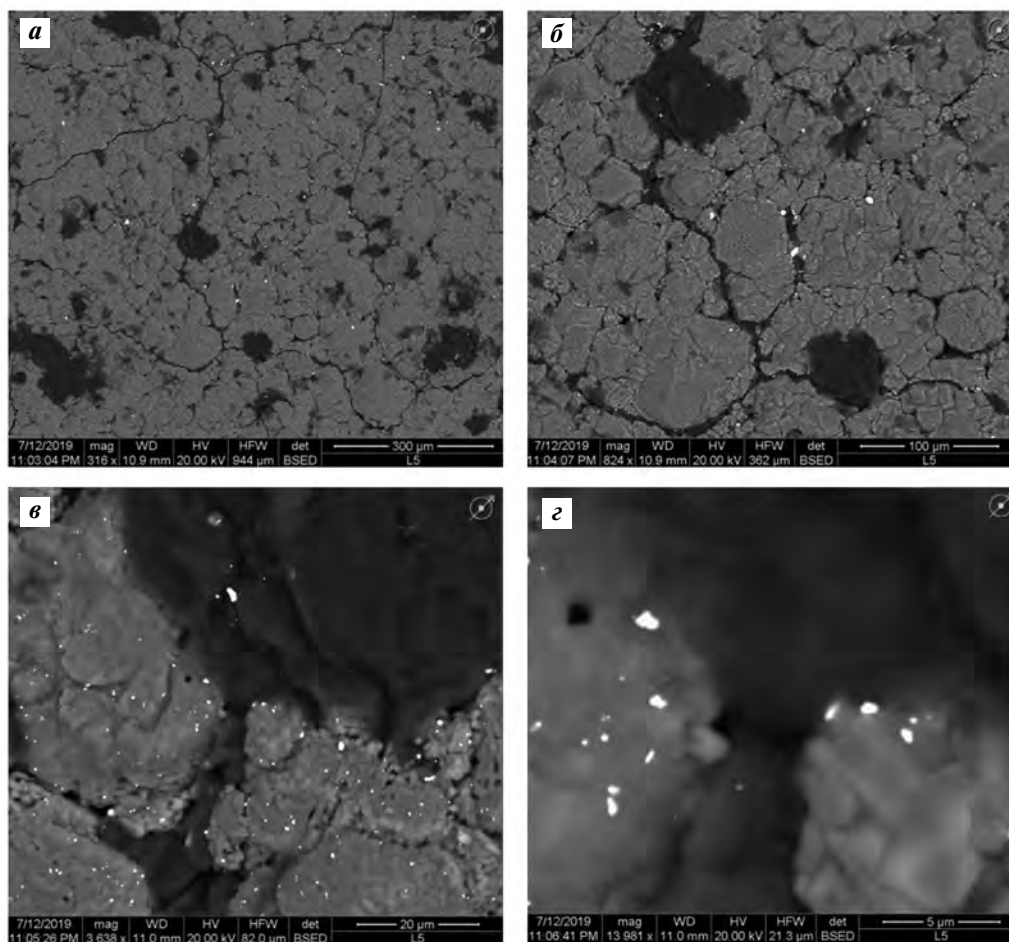


Рис. 3. СЭМ-изображения микроструктуры образца $\text{NiAl}-65\text{Al}_2\text{O}_3-0.1\text{MgAl}_2\text{O}_4$
Увеличение: а – $316\times$, б – $824\times$, в – $3638\times$, з – $13981\times$

идет процесс рекристаллизации и роста зерен, оксид алюминия присутствует в виде аморфной составляющей. Затем происходит выделение но-

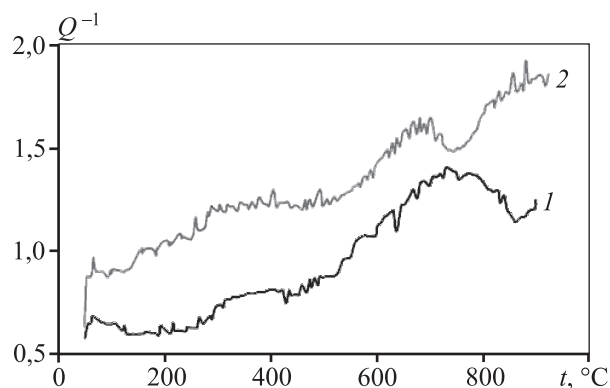


Рис. 4. Внутреннее трение образцов NiAl–65Al₂O₃ (1) и NiAl–65Al₂O₃–0,1MgAl₂O₄ (2)

Резонансная частота 194–205 Гц (1) и 158–165 Гц (2)

вых фаз, например NiO, Ni₃Al, а также различных модификаций оксида алюминия [20]. Постоянное демпфирование на кривой зависимости внутреннего трения от температуры наблюдается у образца без наночастиц до 300 °C, а у образца с наночастицами — при $t = 300\div550$ °C. Затухание начинается для обоих образцов в районе 700 °C и завершается для образца с наночастицами при 800 °C, а без наночастиц — при 870 °C. Затухание, наступающее при $t = 700\div750$ °C, скорее всего, связано с выпадением фаз Ni₃Al и Ni₂Al₃ и возможным движением границы раздела, связывающей их с матрицей, вызванным упругим смещением или дополнительным растворением Al в Ni [21, 22]. Особенно оно заметно для образца без наночастиц, что подтверждается проведенным высокотемпературным рентгеновским анализом. В интервале $t = 800\div900$ °C возникает фаза γ -Al₂O₃, которая представляет собой искаженную шпинельную структуру

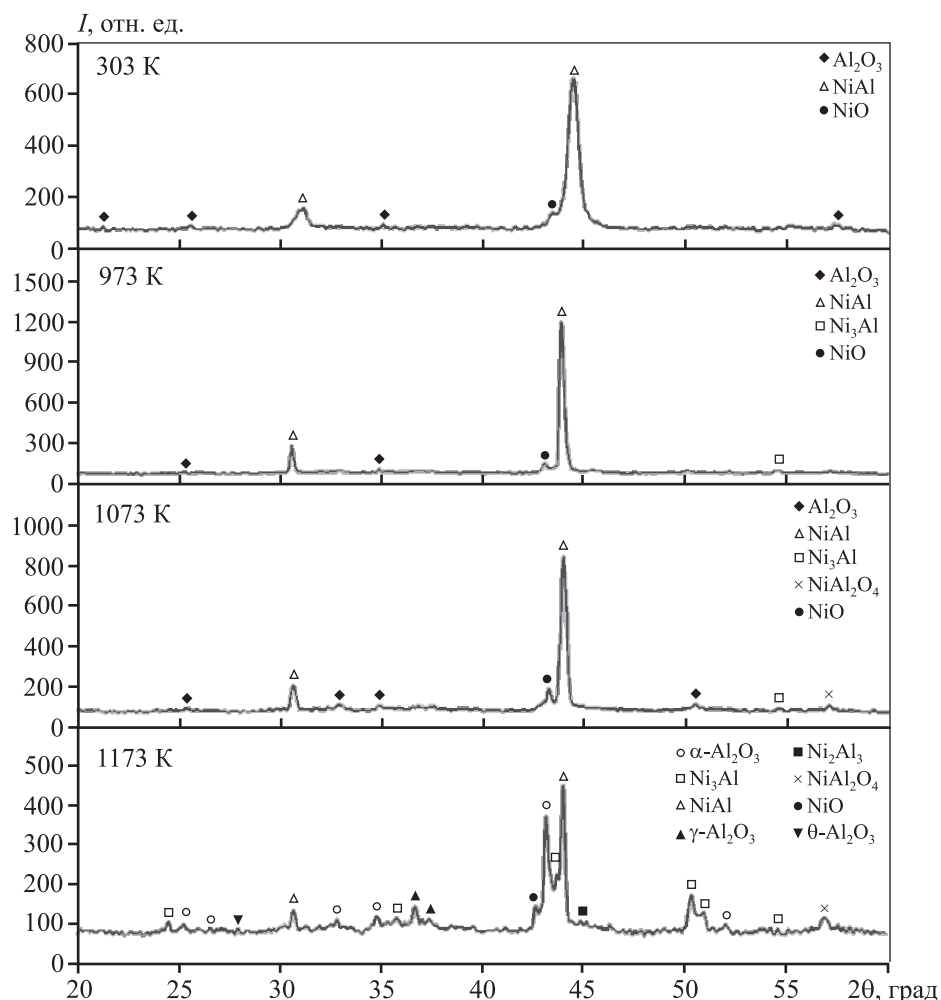


Рис. 5. Результаты высокотемпературного рентгеновского исследования образца, модифицированного наночастицами

[23, 24], образуется шпинель NiAl_2O_4 , формируются фазы Ni_2Al_3 и $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ [25–27].

Кроме того, появление при высоких температурах экстремумов на кривых внутреннего трения может быть вызвано смещением границ фаз интерметаллидов и оксидной составляющей из-за разных коэффициентов термического расширения ($\text{КТР} = (7\div 9) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ для Al_2O_3 [28], $\text{КТР} = (8\div 15) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ для системы Ni-Al [29]).

Исследование кратковременной жаропрочности (рис. 6) при $t = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ показало, что образец с наночастицами более стабилен, чем немодифицированный образец, что, согласно теории Образ-

цова—Лурье—Белова [30, 31] и результатам ряда проведенных на металлических матрицах исследований [32, 33], можно связать с влиянием сформировавшихся межфазных зон упрочнения вокруг наночастиц (рис. 7) [34].

Предел прочности при изгибе материала без шпинели при $t = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ существенно ниже (на 42 %), чем при комнатной температуре. Композит с добавками наночастиц алюмомагниевого шпинели потерял в прочности лишь 13 % при $t = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, что говорит о положительном влиянии наноконпонента.

Выводы

1. Методом электроискрового спекания получены образцы керметов $\text{NiAl-65Al}_2\text{O}_3$ и $\text{NiAl-65Al}_2\text{O}_3\text{-0,1MgAl}_2\text{O}_4$. Установлено, что наночастицы алюмомагниевого шпинели располагаются по границам зерен отдельно или в виде агрегатов.

2. В результате исследования внутреннего трения и фазового состава композитов при температурах до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ описаны возможные механизмы разупрочнения керметов в процессе термообработки.

3. При изучении кратковременной жаропрочности при $t = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ отмечено, что ввод наночастиц в кермет способствует его упрочнению.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-03-00350 А «Разработка методов повышения прочностных и функциональных свойств керметных материалов на основе никеля».

Литература/References

1. Karayannis V.G., Moutsatsou A.K. Synthesis and characterization of nickel-alumina composites from recycled nickel powder. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2012. Vol. 2012. P. 1–9. DOI: dx.doi.org/10.1155/2012/395612.
2. Mileiko S.T. Oxide-fibre/Ni-based matrix composites—III: a creep model and analysis of experimental data. *Compos. Sci. Technol.* 2002. Vol. 62. P. 195–204. DOI: dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00162-2.
3. Sánchez-Herencia A.J., Hernández N., Moreno R. Fracture behaviour of pressureless sintered nickel-reinforced alumina composites. *Key Eng. Mater.* 2005. Vol. 290. P. 324–327.
4. Burkovskaya N.P., Yefimochkin I.Yu., Sevostyanov N.V., Rodionov A.I. A composite material based on Al_2O_3 dispersion strengthened nickel aluminide. *Inorg. Mater: Appl. Res.* 2016. Vol. 7. No. 1. P. 91–96. DOI: dx.doi.org/10.1134/S2075113316010044.

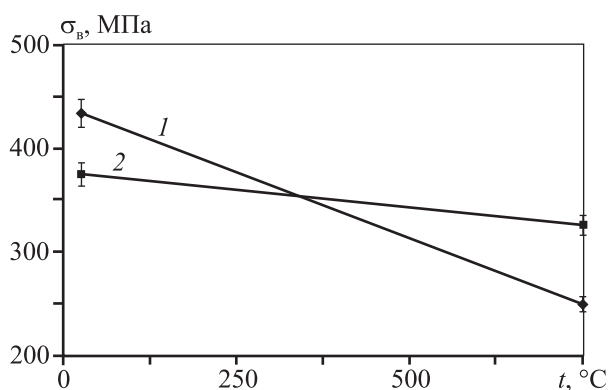


Рис. 6. Зависимость предела прочности керметов от температуры и состава

1 – $\text{NiAl-65Al}_2\text{O}_3$, 2 – $\text{NiAl-65Al}_2\text{O}_3\text{-0,1MgAl}_2\text{O}_4$

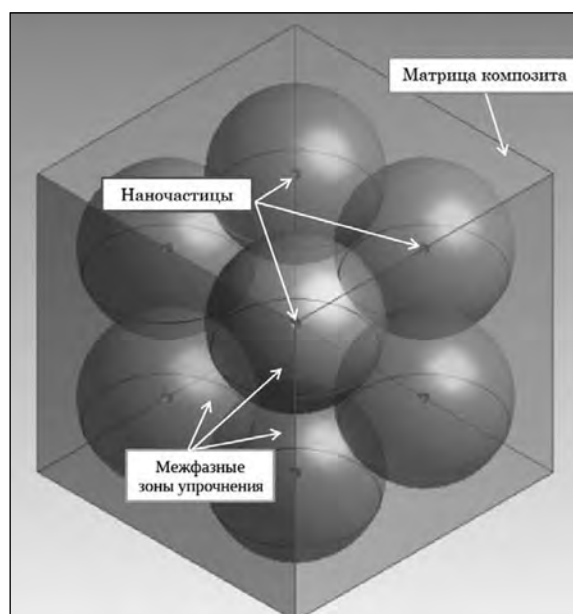


Рис. 7. Схема равномерного распределения твердых наночастиц и межфазных зон упрочнения в матрице [34]

5. Pham H.V., Maruoka D., Nanko M. Influences of Al₂O₃ grain size on high-temperature oxidation of nano-Ni/Al₂O₃ composites. *J. Asian Ceram. Soc.* 2016. Vol. 4. No. 1. P. 120—123. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.jascer.2016.01.003.
6. Emme E.M., Dryden H.L. Aeronautics and astronautics: An american chronology of science and technology in the exploration of space, 1915—1960. Washington DC: Literary Licensing, LLC, 2012. P. 49—63.
7. Bettis E.S., Cottrell W.B., Mann E.R., Meem J.L., Whiteman G.D. The aircraft reactor experiment-operation. *Nucl. Sci. Eng.* 1957. Vol. 2. P. 841—853.
8. Ignatiev V., Zakirov R., Grebenkine K. Molten salts as possible fuel fluids for TRU fuelled systems: ISTC #1606 Approach. In: *Actinide and fission product partitioning and transmutation: 6th Information Exchange Meeting* (Madrid, Spain, 11—13 Dec. 2000). 2000. P. 841—851.
9. Ignatiev V., Surenkov A., Abalin S., Gnidoi I., Kulakov A., Uglov V. Nickel based alloys compatibility with fuel salts for molten salt reactor with thorium and uranium support. In: *Structural materials for innovative nuclear systems (SMINS-3): Workshop Proc.* (United States, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, 7—10 Oct. 2013). Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2013. P. 71—80.
10. Айзенко́льб Ф. Успехи порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1969.
Aizenkol'b F. Advances in powder metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1969 (In Russ.).
11. Агуреев Л.Е., Иванов Б.С., Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Агеев Е.В., Лантев И.Н., Савушкина С.В., Рудштейн Р.И., Бармин А.А., Канушкин А.И., Ашмарин А.А. Разработка алюмокомпозитов, легированных микропорошками меди или магния, с малыми добавками оксидных наночастиц. *Изв. Юго-Западного гос. ун-та. Сер.: Техника и технологии.* 2016. Т. 20. No. 3. С. 9—20.
Agureev L.E., Ivanov B.S., Kostikov V.I., Eremeeva Zh.V., Ageev E.V., Laptev I.N., Savushkina S.V., Rudshtein R.I., Barmin A.A., Kanushkin A.I., Ashmarin A.A. Development of aluminum composites alloyed with micropowders of copper or magnesium, with small additives of oxide nanoparticles. *Izvestiya Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnika i tekhnologii.* 2016. Vol. 20. No. 3. P. 9—20 (In Russ.).
12. Агуреев Л.Е., Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Ашмарин А.А., Рудштейн Р.И. Разработка алюмокомпозитов с малыми добавками наночастиц керамик. *Металлург.* 2016. No. 4. С. 92—99.
Agureev L.E., Kostikov V.I., Eremeeva Zh.V., Ashmarin A.A., Rudshtein R.I. Development of aluminum composites with small additions of ceramic nanoparticles. *Metallurgist.* 2016. Vol. 60. No. 3—4. P. 447—455. DOI: dx.doi.org/10.1007/s11015-016-0312-9.
13. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения. М.: Физматлит, 2004.
Chuvil'deev V.N. Nonequilibrium grain boundaries in metals. Theory and applications. Moscow: Fizmatlit, 2004 (In Russ.).
14. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. М.: Металлургия, 1986.
Taira S., Otani R. Theory of high temperature strength of materials. Moscow: Metallurgiya, 1986 (In Russ.).
15. Ohji T., Hirano T., Nakahira A., Niihara K. Particle/Matrix interface and its role in creep inhibition in alumina-silicon carbide nanocomposites. *J. Am. Ceram. Soc.* 1996. No. 79. P. 33—45. DOI: dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb07877.x.
16. Григорович В.К., Шефтель Е.Н. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов. М.: Наука, 1980.
Grigorovich V.K., Sheftel' E.N. Dispersion hardening of refractory metals. Moscow: Nauka, 1980 (In Russ.).
17. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
Gottsttain G. Physicochemical fundamentals of materials science. Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii, 2009 (In Russ.).
18. Thompson A.W. Substructure strengthening mechanisms. *Met. Trans.* 1977. 8A. No. 6. P. 833—842. DOI: dx.doi.org/10.1007/BF02661564.
19. Фирстов С.А., Луговской Ю.Ф. Особенности влияния микроструктуры на прочность композиционных материалов при статическом и циклическом нагружении. *Электрон. микроскопия и прочность материалов.* 2008. No. 15. С. 83—88.
Firstov S.A., Lugovskoi Yu.F. Features of the influence of the microstructure on the strength of composite materials under static and cyclic loading. *Elektronnaya mikroskopiya i prochnost' materialov.* 2008. No. 15. P. 83—88 (In Russ.).
20. Shved O.V., Mudry S.I., Kulyk Yu.O. High-temperature X-ray diffraction studies of Al—Ni—Hf ternary alloys. *Phys. Chem. Solid State.* 2017. Vol. 18. No. 3. P. 324—327. DOI: dx.doi.org/10.15330/pcss.18.3.324-327.
21. Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhäuser H., Sinning H.-R. Internal friction in metallic materials: A Handbook. N.Y.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. DOI: dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68758-0.
22. Schaller R., Benoit W. Internal friction associated with precipitation in Al—Ag alloys. In: *Proc. 3-rd Europ. Conf. on IFUAS* (University of Manchester, England, 18—20 July 1980). Manchester: Pergamon, 1980. P. 311—316.

23. Cava S., Tebcherani S.M., Souza L.A., Pianaro S.A., Paskocimas C.A., Longo E., Varela J.A. Structural characterization of phase transition of Al_2O_3 nanopowders obtained by polymeric precursor method. *Mater. Chem. Phys.* 2007. Vol. 103. P. 394–399. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.02.046.
24. Gutierrez G., Taga A., Johansson B. Thermal structure determination of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. *Phys. Rev. B.* 2001. Vol. 65. P. 101–105. DOI: dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.65.012101.
25. Blas L., Dutournie P., Dorge S., Josien L., Kehrli D., Lambert A. Thermal stability study of NiAl_2O_4 binders for chemical looping combustion application. *Fuel.* 2016. Vol. 182. P. 50–56. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.080.
26. Zygmuntowicz J., Wiecińska P., Miazga A., Konopka K. Characterization of composites containing NiAl_2O_4 spinel phase from $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiO}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ systems. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. Vol. 125. No. 3. P. 1079–1086. DOI: dx.doi.org/10.1007/s10973-017-6232-5.
27. Nguyen K.N., Dang K.C. Synthesis, characterization and catalytic activity of CoAl_2O_4 and NiAl_2O_4 spinel — type oxides for NO_x selective reduction. *Adv. in Tech. of Mat. and Mat. Proc. J. (ATM).* 2004. Vol. 6. No. 2. P. 336–343. DOI: dx.doi.org/10.2240/azojomo0129.
28. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: Справочник. М.: НПО Информ ТЭИ, 1992.
Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ja., Malinin L.A., Calkov V.N. Thermophysical properties of components of combustible systems. Moscow: NPO Inform TEI, 1992 (In Russ.).
29. Косицын С.В., Косицына И.И. Фазовые и структурные превращения в сплавах на основе моноалюминиды никеля. *Успехи физики металлов.* 2008. Т. 9. No. 2. С. 195–258.
Kositsyn S.V., Kositsyna I.I. Phase and structural transformations in alloys based on nickel monoaluminide. *Uspekhi fiziki metallov.* 2008. Vol. 9. No. 2. P. 195–258. DOI: dx.doi.org/10.15407/ufm.09.02.195 (In Russ.).
30. Образцов И.Ф., Лурье С.А., Белов П.А., Волков-Богородский Д.Б., Яновский Ю.Г., Кочемасова Е.И., Дудченко А.А., Потупчик Е.М., Шумова Н.П. Основы теории межфазного слоя. *Механика композ. материалов и конструкций.* 2004. Т. 10. No. 4. С. 596–612.
Obraztsov I.F., Lur'e S.A., Belov P.A., Volkov-Bogorodskii D.B., Yanovskii Yu.G., Kochemasova E.I., Dudchenko A.A., Potupchik E.M., Shumova N.P. Fundamentals of the theory of an interphase layer. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktssii.* 2004. Vol. 10. No. 4. P. 596–612 (In Russ.).
31. Lurie S., Belov P., Solyaev Yu., Aifantis E.C. On one class of applied gradient models with simplified boundary problems. *Mater. Phys. Mech.* 2017. No. 32 (3). P. 353–369.
32. Агуреев Л.Е., Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Бармин А.А., Ризаханов Р.Н., Иванов Б.С., Ашмарин А.А., Лаптев И.Н., Рудштейн Р.И. Порошковые алюмокомпозиционные системы Al-Cu с микродобавками оксидных наночастиц. *Перспект. материалы.* 2016. No. 5. С. 18–24.
Agureev L.E., Kostikov V.I., Ereemeeva Zh.V., Barmin A.A., Rizakhanov R.N., Ivanov B.S., Ashmarin A.A., Laptev I.N., Rudshstein R.I. Powder aluminum composites of Al-Cu system with micro-additions of oxide nanoparticles. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2016. Vol. 7. No. 6. P. 507–510. DOI: dx.doi.org/10.1134/S2075113316050026.
33. Костиков В.И., Агуреев Л.Е., Еремеева Ж.В. Разработка упрочненных наночастицами алюмокомпозиционных для ракетно-космической техники. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2014. No. 1. С. 35–38.
Kostikov V.I., Agureev L.E., Ereemeeva Zh.V. Development of nanoparticle-reinforced alumocomposites for rocket-space engineering. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. No. 56 (3). P. 325–328. DOI: dx.doi.org/10.3103/S1067821215030104.
34. Lurie S., Volkov-Bogorodskiy D., Solyaev Y., Rizakhanov R., Agureev L. Multiscale modelling of aluminium-based metal-matrix composites with oxide nanoinclusions. *Comput. Mater. Sci.* 2016. Vol. 116. P. 62–73. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.12.034.