

06.5

Структура и свойства сплава на основе алюминида никеля, полученного из механически активированной смеси порошков методом электроискрового спекания

© Л.И. Шевцова¹, М.А. Есиков^{1,2}, Ю.Н. Малютин¹, А.И. Гаврилов³, Н.Ю. Черкасова¹, В.Н. Маликов⁴¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия⁴ Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

E-mail: edeliya2010@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2023 г.

В окончательной редакции 26 августа 2023 г.

Принято к публикации 16 октября 2023 г.

Представлены результаты структурных исследований и оценки прочностных свойств отечественного сплава на основе Ni_3Al марки ВКНА-4У, полученного из исходных компонентов путем механической активации и последующего электроискрового спекания. Спекание материала осуществлялось в диапазоне температур 1100–1200°C. Наиболее высокий уровень прочности при изгибе (1800 МПа) зафиксирован у сплава ВКНА-4У, полученного при нагреве до 1200°C, давлении прессования, равном 40 МПа, времени выдержки 5 мин. Относительная плотность спеченного в таком режиме материала равна ~99%.

Ключевые слова: электроискровое спекание, механическая активация, алюминид никеля, сплав ВКНА-4У, прочностные свойства.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.02.56974.19620

Алюминид никеля (Ni_3Al) широко применяется в качестве основы для создания конструкционных материалов, работающих длительное время при высоких температурах, а также в агрессивных средах, поскольку на его поверхности образуется защитный оксидный слой [1–3]. Благодаря добавлению в Ni_3Al различных легирующих элементов был создан отечественный высокотемпературный конструкционный сплав (ВКНА) с содержанием упорядоченной γ' -фазы (интерметаллид Ni_3Al), достигающим 95%. Высокое содержание γ' -фазы в сплаве обеспечивает термостабильную структуру и жаростойкость до 1250°C, а содержание меньшего количества тугоплавких элементов приводит к снижению плотности в сравнении с никелевыми суперсплавами и повышению удельной жаропрочности [4,5].

В промышленности широко используются отечественные сплавы ВКНА, получаемые методом направленной кристаллизации [4–6]. Однако постоянное повышение требований к разрабатываемым материалам, а также развитие порошковой металлургии позволило применять новые методы для создания и расширения областей использования сплавов с высоким комплексом свойств (в том числе для аддитивных технологий). Повышение эксплуатационных характеристик спеченных из интерметаллида материалов может быть достигнуто за счет измельчения зерна интерметаллида в консолидированном состоянии [7]. Интерес к методу электроискрового спекания (spark plasma sintering, SPS) обусловлен возможностями сохранения структурных характеристик материала, полученных в порошках в спеченном со-

стоянии, за счет сокращения времени воздействия по сравнению с традиционными методами спекания. В настоящее время активно ведутся исследования структуры и свойств сплавов на основе алюминида никеля, получаемых методом электроискрового спекания [8–10]. В данной работе сплав ВКНА-4У был впервые получен путем смешивания исходных компонентов, их механической активации и синтеза *in situ* при спекании методом SPS.

Для получения спеченного сплава ВКНА-4У была подготовлена порошковая смесь, химический состав которой представлен в табл. 1 [6].

Механическая активация (МА) порошковой смеси проводилась с использованием высокоэнергетической планетарной шаровой мельницы „АГО-2“ (Россия) в аргоне со следующими параметрами обработки: отношение массы стальных шаров к массе порошковой смеси составляло 20:1; центробежное ускорение шаров было равно 400 m/s^2 . Активация реагентов осуществлялась в течение 3 min 30 s. В результате такого режима МА были сформированы плотные механокомпозиты пластинчатого строения (рис. 1), которые исследовались

Таблица 1. Химический состав порошковой смеси (в mass%), соответствующей марке сплава ВКНА-4У (отечественный сплав на основе Ni_3Al) [6]

Ni	Al	Cr	Mo	W	Ti	Co	C
74.4	8.5	5.0	5.0	2.2	0.9	4.0	0.02

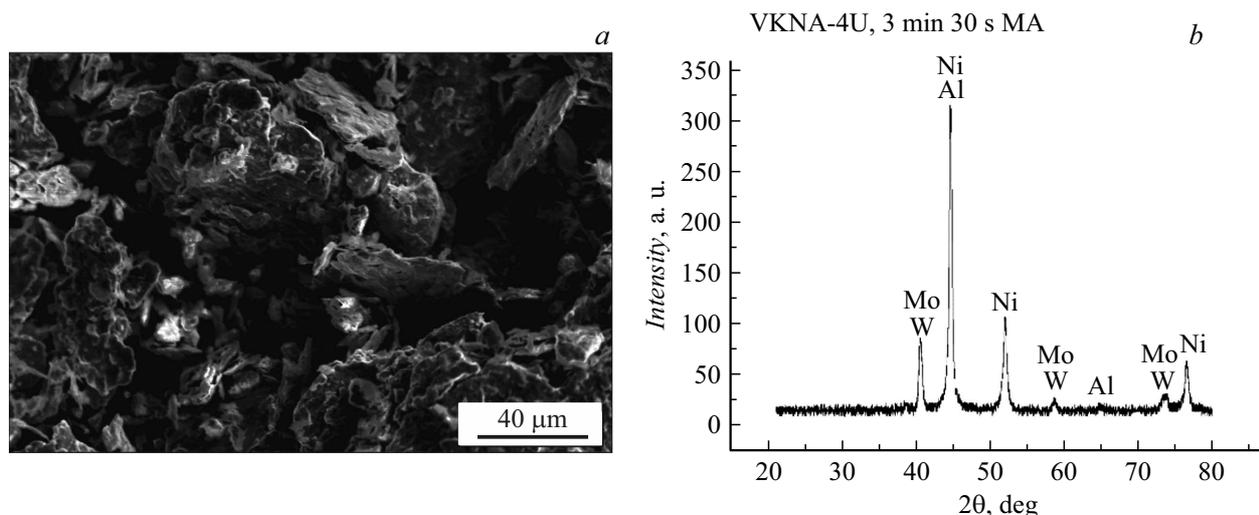


Рис. 1. *a* — внешний вид механокомпозитов, сформированных в результате механоактивации порошковой смеси, соответствующей сплаву ВКНА-4У; *b* — рентгенограмма механокомпозита состава ВКНА-4У.

Таблица 2. Характеристики режимов спекания методом SPS и свойства полученных компактов из сплава на основе алюминиды никеля (ВКНА-4У)

Номер образца	Марка сплава	Температура, °С	Давление, МПа	Время выдержки, min	Скорость нагрева, °С/min	Плотность, g/cm ³	Относительная плотность, % (справ.)	Прочность при изгибе, МПа
1	ВКНА-4У	1100	40	10	70	7.82	98.85	1215
2		1150		5		7.79	98.48	1370
3		1200		7.85		99.27	1800	

методом рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра ARL X'TRA (США).

Электроискровое спекание механокомпозитов состава ВКНА-4У проводилось на установке LABOX-1575 (Sinter Land, Япония). В рабочую камеру установки помещали графитовую пресс-форму со спекаемым материалом. Для защиты пресс-формы от спекаемого материала и обеспечения скольжения пуансонов в матрице применялась графитовая бумага толщиной 0.2 mm. Механическое усилие на пуансоны создавалось встроенным гидравлическим прессом. Нагрев обеспечивался пропусканием непосредственно через пресс-форму постоянного пульсирующего тока с циклом 40 ms вкл.-12 ms выкл. Варьируемыми параметрами являлись температура спекания и время выдержки. Диапазон режимов спекания был определен экспериментальным путем, а также с учетом ранее проведенных исследований [7–9]. В результате спекания были получены заготовки массой 40 g цилиндрической формы с диаметром 30 mm и высотой 8 mm. Плотность полученных образцов определялась методом гидростатического взвешивания. Образцы для испытаний на трехточечный изгиб имели форму прямоугольного параллелепипеда размером 3 × 4 × 28 mm. Прочностные испытания были проведены на установке Instron 3369. Скорость перемещения

траверсы составляла 0.5 mm/min. Режимы спекания и характеристики спекенного сплава ВКНА-4У приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что нагрев до 1200°С способствует увеличению плотности спекенного сплава ВКНА-4У до 99.27%, что в свою очередь положительно сказывается на прочностных характеристиках спекенного материала. Так, сплав ВКНА-4У, полученный спеканием при 1200°С, обладает наиболее высоким уровнем прочности при изгибе, который составляет 1800 МПа. Для монофазного интерметаллида Ni₃Al, полученного при аналогичных условиях спекания, уровень предела прочности при изгибе составляет 790 МПа. Таким образом, введение легирующих элементов позволяет повысить прочность при изгибе порошкового сплава на основе алюминиды никеля более чем в 2 раза. Структура спекенных образцов изучалась с применением растрового электронного микроскопа Carl Zeiss Merlin, оснащенного анализатором INCA X-ACT (Oxfords Instruments) для микрорентгеноспектрального анализа. Следует отметить, что структура материалов, полученных спеканием в различных режимах, наследует пластинчатое строение исходных механокомпозитов (рис. 2, *a*). На рис. 2 в качестве примера представлена структура спекенного при 1100°С материала состава ВКНА-4У.

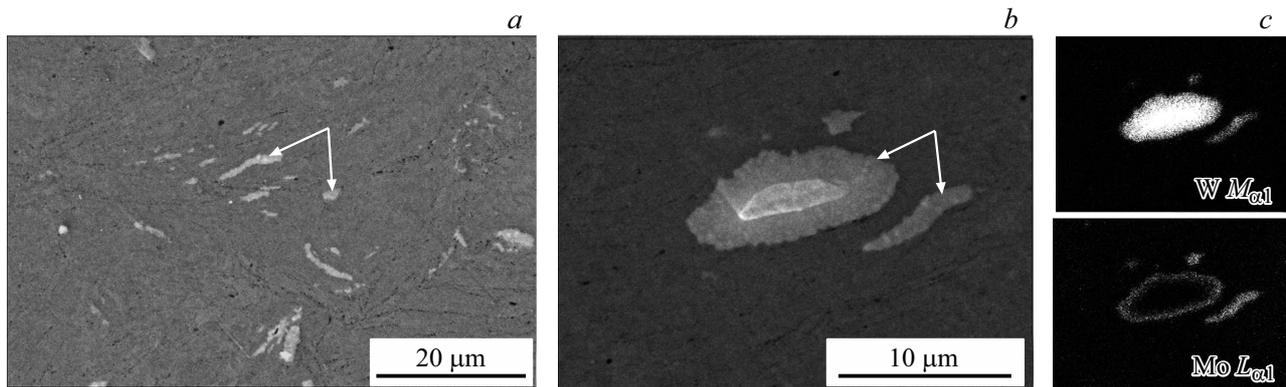


Рис. 2. Микрофотографии структуры спеченного при 1100°C сплава ВКНА-4У (а, б) и карты элементов, зафиксированных в светлой области сплава (с).

В структуре материала зафиксированы светлые области (на рис. 2, а и б указаны стрелками). Карты элементов W и Mo в выбранной области поперечного сечения спеченного сплава представлены на рис. 2, с. Карты подтверждают наличие не взаимодействовавшего вольфрама в центре светлой области и наличие вольфрама и молибдена по ее периферии.

Таким образом, в результате электроискрового спекания механоактивированной в течение 3 min 30 s порошковой композиции, соответствующей по составу сплаву на основе интерметаллида Ni_3Al марки ВКНА-4У, получены образцы с плотностью до 99.27% от справочной плотности указанного сплава. Рекомендуемым режимом спекания с целью получения плотной заготовки из сплава ВКНА-4У с высоким уровнем прочности при изгибе (1800 МПа) при комнатной температуре является нагрев со средней скоростью до 70°C/min при температуре спекания 1200°C с выдержкой, составляющей 5 min, и приложенным одноосным давлением, равным 40 МПа.

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП „Структура, механические и физические свойства материалов“. Электроискровое спекание проведено на оборудовании Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ (научный проект № С23-14).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P. Jozwik, W. Polkowski, Z. Bojar, *Materials*, **8**, 2537 (2015). DOI: 10.3390/ma8052537
- [2] А.А. Дроздов, В.А. Валитов, К.Б. Поварова, О.А. Базылева, Э.В. Галиева, С.В. Овсепян, *Письма о материалах*, **5** (2), 142 (2015). DOI: 10.22226/2410-3535-2015-2-142-146
- [3] Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, *Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: микроструктура, деформационное поведение* (УрО РАН, Екатеринбург, 2002).
- [4] Н.А. Ночовная, О.А. Базылева, Д.Е. Каблов, П.В. Панин, *Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля* (ВИАМ, М., 2018).
- [5] О.А. Базылева, Э.Г. Аргинбаева, Е.Ю. Туренко, *Авиационные материалы и технологии*, № 3, 26 (2013).
- [6] О.Г. Оспенникова, О.А. Базылева, Э.Г. Аргинбаева, А.В. Шестаков, Е.Ю. Туренко, *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, № 3, 75 (2017). DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-75-89
- [7] Л.И. Шевцова, М.А. Корчагин, М.А. Есиков, В.С. Ложкин, А.И. Гаврилов, А.Ю. Ларичкин, *Металлург*, № 11, 56 (2021). DOI: 10.52351/00260827_2021_11_56 [L.I. Shevtsova, M.A. Korchagin, M.A. Esikov, V.S. Lozhkin, A.I. Gavrilov, A.Y. Larichkin, *Metallurgist*, **65** (11-12), 1273 (2022). DOI: 10.1007/s11015-022-01273-7].
- [8] A. Mohammadnejad, A. Bahrami, M. Sajadi, P. Karimi, H.R. Fozveh, M. Yazdan Mehr, *Mater. Today Commun.*, **17**, 161 (2018). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2018.09.002
- [9] L. Shevtsova, V. Mali, A. Bataev, A. Anisimov, D. Dudina, *Mater. Sci. Eng. A*, **773**, 8 (2020). DOI: 10.1016/j.msea.2019.138882
- [10] R. Yamanoglu, W. Bradbury, E. Karakulak, E.A. Olevsky, R.M. German, *Powder Met.*, **57**, 380 (2014). DOI: 10.1179/1743290114Y.00000000088