

УДК 669.245

Д. А. Немолочнов*

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

* *drakon13chik@mail.ru*,

Научный руководитель – доцент, канд. техн. наук *Л. И. Шевцова*

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА СИСТЕМЫ Ni–Al, ПОЛУЧЕННОГО SPS- СПЕКАНИЕМ ПОРОШКА ТИПА ВКНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ НАГРЕВА

По результатам структурных исследований и оценки прочностных свойств установлено, что скорость нагрева играет важную роль в формировании структуры и свойств материалов на основе алюминида никеля, полученных по SPS-технологии. Уменьшение скорости нагрева с 200 до 50 °C/мин обеспечивает получение материалов с относительной плотностью до 76 %. Максимальное значение предела прочности при изгибе достигает 390 МПа.

Ключевые слова: интерметаллид, искровое плазменное спекание, механические свойства, алюминид никеля.

A. D. Nemolochnov

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN ALLOY BASED ON THE INTERMETALLIC COMPOUND OF THE NI–AL SYSTEM OBTAINED BY SPS OF THE BKNA-TYPE POWDER AT DIFFERENT HEATING RATES

The results of structural research and evaluation of strength properties are established that heating rate play an important role in the formation of the structure and properties of materials based on nickel aluminide, obtained by SPS-technology. Reducing the heating rate from 200 to 50 °C/min ensures the production of materials with a relative density of up to 76 %. The maximum value of the ultimate bending strength is 390 MPa.

Keywords: intermetallic, spark plasma sintering, mechanical properties, nickel aluminide.

Повышение комплекса механических свойств разрабатываемых материалов является одной из актуальных проблем в современном материаловедении. Для исследований был выбран сплав на основе алюминида никеля, с целью выявления влияния скорости нагрева на структуру и механические свойства материалов, полученных спеканием с использованием технологии искрового плазменного спекания (SPS). Из-за

особенностей связи атомов в кристаллической решетке интерметаллиды системы никель-алюминий имеют высокие показатели жаростойкости и жаропрочности, относительно низкую плотность (до $7,53 \text{ г/см}^3$) по сравнению с никелевыми сплавами. В то же время алюминиды никеля обладают такими недостатками, как низкий уровень пластичности и трещиностойкости в области пониженных температур. Не смотря на указанные недостатки сплавы на основе алюминидов никеля широко применяются в современном авиа-, ракето- и автомобилестроении [1–3].

Для изготовления заготовок использовался метод искрового плазменного спекания (SPS), который относится к одним из передовых и эффективных методов получения малодефектных материалов на основе интерметаллидов. Применение данного метода позволяет сократить время выдержки материала в нагретом состоянии, что благоприятно сказывается на свойствах готового образца. Суть процесса заключается в одновременном пропускании импульсов постоянного тока и приложении к образцу одноосновного давления. Спекание порошка проводилось на установке SPS10-4 (Япония) [4–9].

Испытания проводились на образцах, полученных спеканием порошка марки ПН75Ю23В (сплав типа ВКНА), разработанного Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ) [10–12]. Средний размер частиц составляет 20 мкм, их форма близка к сферической. Химический состав порошка представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав порошка марки ПН75Ю23В

Химический состав, %									
Ni	Al	Cr	W	Co	Mo	Ti	Fe	Ca	C
осн.	22,7	2,93	1,16	0,8	0,79	0,32	0,15	0,08	0,07

Для проведения SPS-спекания порошок засыпался в пресс-форму, внутренний диаметр которой составил 40 мм. Режимы спекания порошка марки ПН75Ю23В представлены в табл. 2. В результате спекания были получены образцы цилиндрической формы высотой около 6 мм.

Таблица 2

Режимы спекания порошка марки ПН75Ю23В

№ режима	Температура нагрева, °С	Давление прессования, МПа	Скорость нагрева, °С/мин	Время выдержки, мин	Сила тока, кА
1	1100	50	50	100	2
2			100		
3			200		

Установлено, что фазовый состав материалов, спеченных при различных скоростях нагрева, абсолютно идентичен. Основной фазой в исследуемых образцах является интерметаллид NiAl, в тоже время в материале зафиксированы пики W.

Структура спечённых материалов была исследована с использованием оптического микроскопа Axio Observer Alm (рис. 1). В результате спекания порошка марки ПН75Ю23В при указанных режимах были получены образцы, максимальная плотность составляет $5,74 \text{ г/см}^3$, что составляет 76 % от плотности алюминида никеля. Микроструктура спечённых материалов однородна и в продольном, и в поперечном сечениях. В структуре материала такие виды дефектов, как крупные поры или трещины, не обнаружены. Максимальная пористость (20,4 %) соответствует материалу, полученному спеканием при 200 °C/мин . Зависимости плотности и пористости спеченных образцов от скорости нагрева представлены в табл. 3.

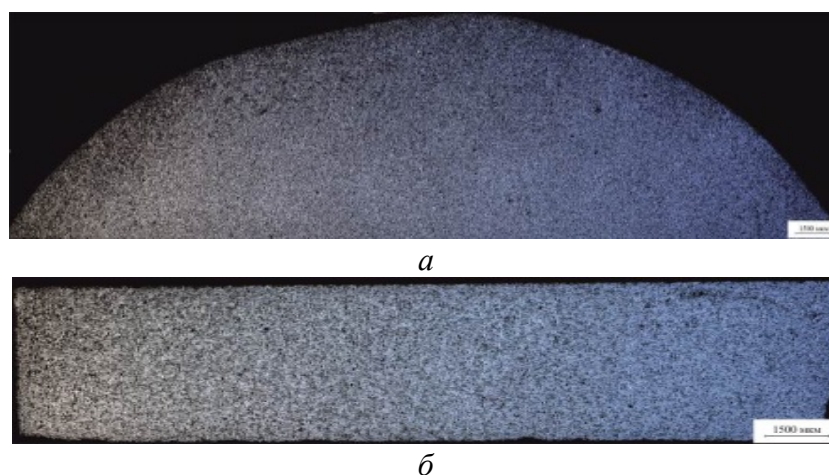


Рис. 1. Панорамные снимки структуры образцов, полученных SPS-спеканием порошка марки ПН75Ю23В при 100 °C/мин (*a* – продольное сечение; *б* – поперечное сечение)

Таблица 3

Плотность и пористость образцов, полученных спеканием порошка ПН75Ю23В при разных скоростях нагрева

Скорость нагрева, °C/мин	Плотность, г/см^3	Относительная плотность, %	Пористость, %
50	5,74	76	10,8
100	5,71	76	11,8
200	5,09	67	20,4

Из табл. 3 следует, что при снижении скорости нагрева плотность материалов возрастает до $5,74 \text{ г/см}^3$ из-за изменения формы частиц и увеличения контакта между ними. Анализ дюрOMETрических исследований

свидетельствует о том, что при различных скоростях нагрева микротвердость образцов, полученных SPS-спеканием, находится в диапазоне от 3400 до 3650 МПа.

Испытания на трехточечный изгиб проводились на образцах размерами 3x4x30 мм. По результатам проведенных испытаний можно сказать, что при снижении скорости нагрева до 50 °С/мин предел прочности спеченных материалов увеличивается. Максимальное значение предела прочности при изгибе таких образцов составило 390 МПа. Образцы, полученные SPS-спеканием порошка ПН75Ю23В при 200 °С/мин, обладают наименьшей прочностью при изгибе (310 МПа). Низкие значения прочности обусловлены тем, что при высокой скорости нагрева формируются участки с закрытой пористостью. Анализ снимков изломов (рис. 2) свидетельствует о том, что во всех образцах доминирует интеркристаллитное разрушение.

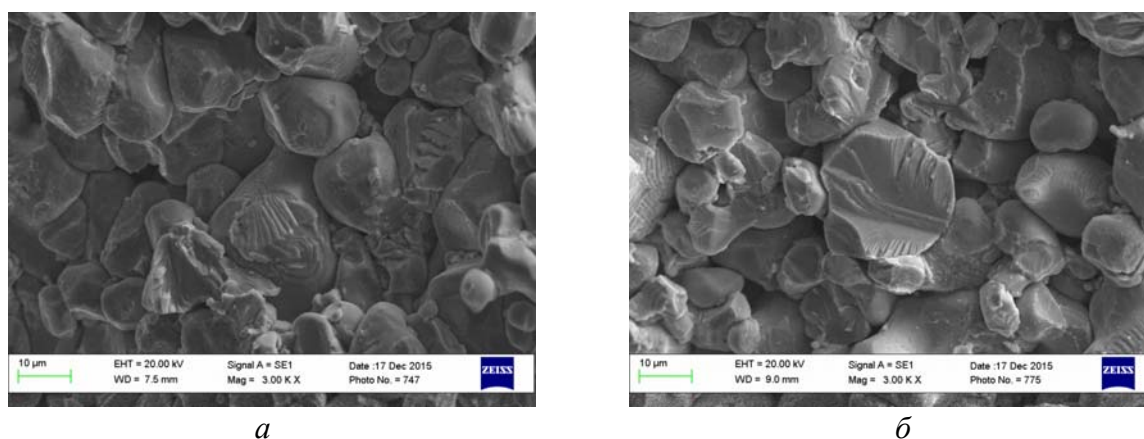


Рис. 2. Изломы образцов, спечённых при различных скоростях нагрева:
a – 50 °С/мин; *б* – 200 °С/мин

В результате исследований установлено, что скорость нагрева играет важную роль в получении плотных объемных материалов из сплава ВКНА методом SPS. Повышение комплекса механических свойств материалов, полученных искровым плазменным спеканием, напрямую зависит от режимов спекания. Снижение скорости нагрева до 50 °С/мин позволило получить материал с относительной плотностью 76 % и значением предела прочности при изгибе, равным 390 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова., О. А. Базылева // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. «Машиностроение». Metallurgy, 2011. № SP2. С 13–19.

2. Шевцова Л. И. Структура и механические свойства интерметаллида Ni_3Al , полученного по технологии искрового плазменного спекания механически активированной порошковой смеси «Ni–Al» / Л. И. Шевцова, Т. С. Самейцева, Д. Д. Мункуева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2014. № 3. С. 13–19.
3. Структура и механические свойства быстрозакаленного интерметаллида Ni_3Al / Ю. В. Мильман [и др.] // *Электронная микроскопия и прочность материалов: сб. научн. тр. К. : ИПМ НАН Украины*, 2013. № 19. С. 78–85.
4. Spark Plasma Sintering of Metals and Metal Matrix / N. Saheb [et al.] // *Nanocomposites: A Review, Journal of Nanomaterials*. 2012. P. 1–13.
5. Kwon Spark Plasma Sintering of Nanoscale (Ni+Al) Powder Mixture / J. S. Kim [et al.] // *Solid State Phenomena*. 2007. P. 35–38.
6. Liu D. Spark Plasma Sintering of Nanostructured Aluminum: Influence of Tooling Material on Microstructure / D. Liu, Y. Xiong, Y. Li // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. P. 1908–1916.
7. Структура и свойства материалов из алюминидов никеля, полученных с использованием различных технологий / Е. Е. Корниенко [и др.] // *Перспективные материалы*. 2017. № 3. С. 49–58.
8. Shevtsova L. Boron-modified Ni_3Al intermetallic compound formed by spark plasma sintering of mechanically activated Ni and Al powders / L. Shevtsova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 124. № 1.
9. Tokita M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology / M. Tokita // *Journal of the Society of Power Technology*, 1993. V. 30. № 11. P. 790–804.
10. Fabrication of the Ni_3Al -based alloy formed by spark plasma sintering of VKNA powders / L. Shevtsova [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 124. № 1. P. 1–6.
11. Герасимов В. В. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава / В. В. Герасимов, Н. В. Петрушин, Е. М. Висик // *Труды ВИАМ*. 2015. № 3. С. 1–20.
12. Литейные сплавы на основе Ni_3Al и способ их выплавки / О. А. Базылева [и др.] // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. № 1. С. 29–35.