

## ИСКРОВОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ ЖАРОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.М. Валеева, Н.С. Лучников

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

*Аннотация.* В статье представлены результаты исследования структуры материала НХ16Ю6Ит, консолидированного методом искрового плазменного спекания при  $T=1070$  °С, давлении 30 МПа в течение 5 мин. При указанных параметрах ИПС формируется материал с относительной плотностью 93%. Основными фазами материала являются Ni и Ni<sub>3</sub>Al с микротвердостью  $(262\pm 44)HV_{0.05}$ . Зеренная структура НХ16Ю6Ит характеризуется неоднородностью распределения тугоплавких компонентов, обусловленной исходным состоянием порошка ПВ-НХ16Ю6Ит. Полученный материал может быть использован в технологии ИПС теплозащитных покрытий жаропрочных сплавов.

*Ключевые слова:* искровое плазменное спекание, теплозащитный покрытия, структура, тугоплавкие включения.

В последнее время вызывает интерес получение материалов со сложноорганизованной структурой методом искрового плазменного спекания (ИПС). Особенности ИПС-процесса позволяют получать, например, градиентные материалы за достаточно короткое время в течение одного технологического режима [1-4]. В работе [5] исследователями продемонстрирована возможность получения YSZ (оксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия) внешних слоев на подложке никелевого суперсплава и интерметаллидной Ni-Al связи. Это пример получения многослойного теплозащитного покрытия (ТЗП) для эффективной защиты жаропрочных сплавов. Такие ТЗП позволяют повысить температуры в горячих частях авиационных двигателей. Строение ТЗП (рис. 1) представляется многослойной структурой: 1 слой – это подложка из жаропрочного сплава, 2 слой – подслой (или связующий слой) и 3 слой – внешний керамический слой. В отдельности каждый слой выполняет строго определенную защитную функцию. Подслой, как правило, обеспечивает градиент теплопроводности в ТЗП, снижает термические напряжения при высоких температурах.

Цель работы заключалась в исследовании структуры связующего слоя из материала ПВ-НХ16Ю6Ит после искрового плазменного спекания.

В качестве исходного материала использовали порошок ПВ-НХ16Ю6Ит (АО ПОЛЕМА), элементный состав которого определяли с помощью энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Результаты представлены в табл. 1. Средний размер частиц порошка  $d_{50}=36$  мкм. Морфология частиц порошка соответствует иррегулярной.



Рисунок 1 – Строение ТЗП.

Таблица 1 – Элементный состав порошка ПВ-НХ16Ю6Ит

Марка	Содержание элементов, вес.%					
	Ni	Cr	Al	Co	Fe	Y
ПВ-НХ16Ю6Ит	основа	17.65	5.64	0.24	0.07	0.79

Искровое плазменное спекание порошков проводили на установке Dr. Sinter SPS-1050b (SPS Syntex Inc.) по режиму со следующими параметрами:  $T=1070\text{ }^{\circ}\text{C}$ , изотермическая выдержка 5 мин при нагрузке 30 МПа. На рис. 2 представлены температурно-временные параметры, изменения тока и напряжения, отмечена динамика усадки образца в процессе спекания.

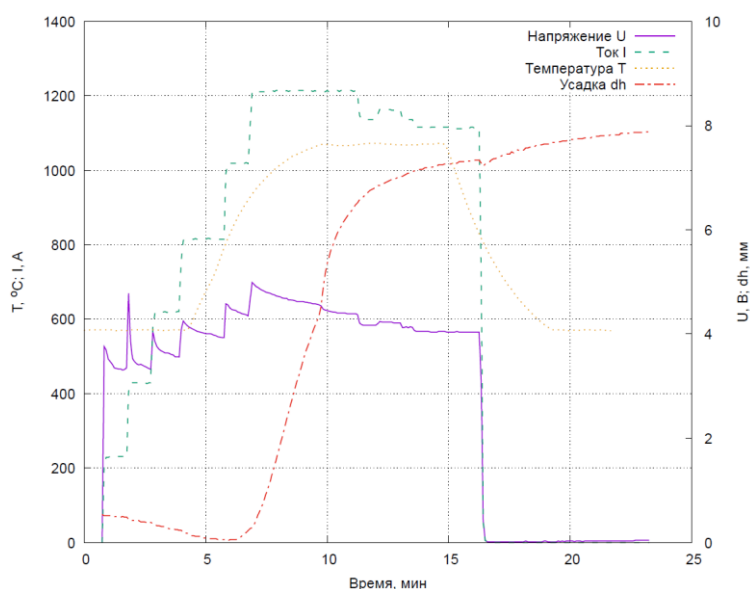


Рисунок 2 – Общие параметры ИПС в зависимости от времени при обработке ПВ-НХ16Ю6Ит

Из анализа параметров следует, что усадка с наибольшей скоростью протекает в интервале температур 860-1070 град.С в течение 4 минут. После ИПС материал обладает относительной плотностью 93%. Микротвердость материала соответствует  $(262\pm 44)\text{HV}_{0.05}$ .

Сканирующая электронная микроскопия показала, что структура спеченных образцов ПВ-НХ16Ю6Ит представлена равноосными зёрнами и локальными включениями обособленных частиц иттрия, хрома, а также поры (рис. 3). Непрореагировавшие частицы хрома и иттрия достаточно грубые, имеют размеры порядка 20-25 и 10-50 мкм соответственно. Из результатов спектрального и рентгенофазового анализа следует, что при консолидации методом ИПС в материале формируется основная никелевая матрица из ГЦК-фазы никеля и интерметаллида  $Ni_3Al$ .

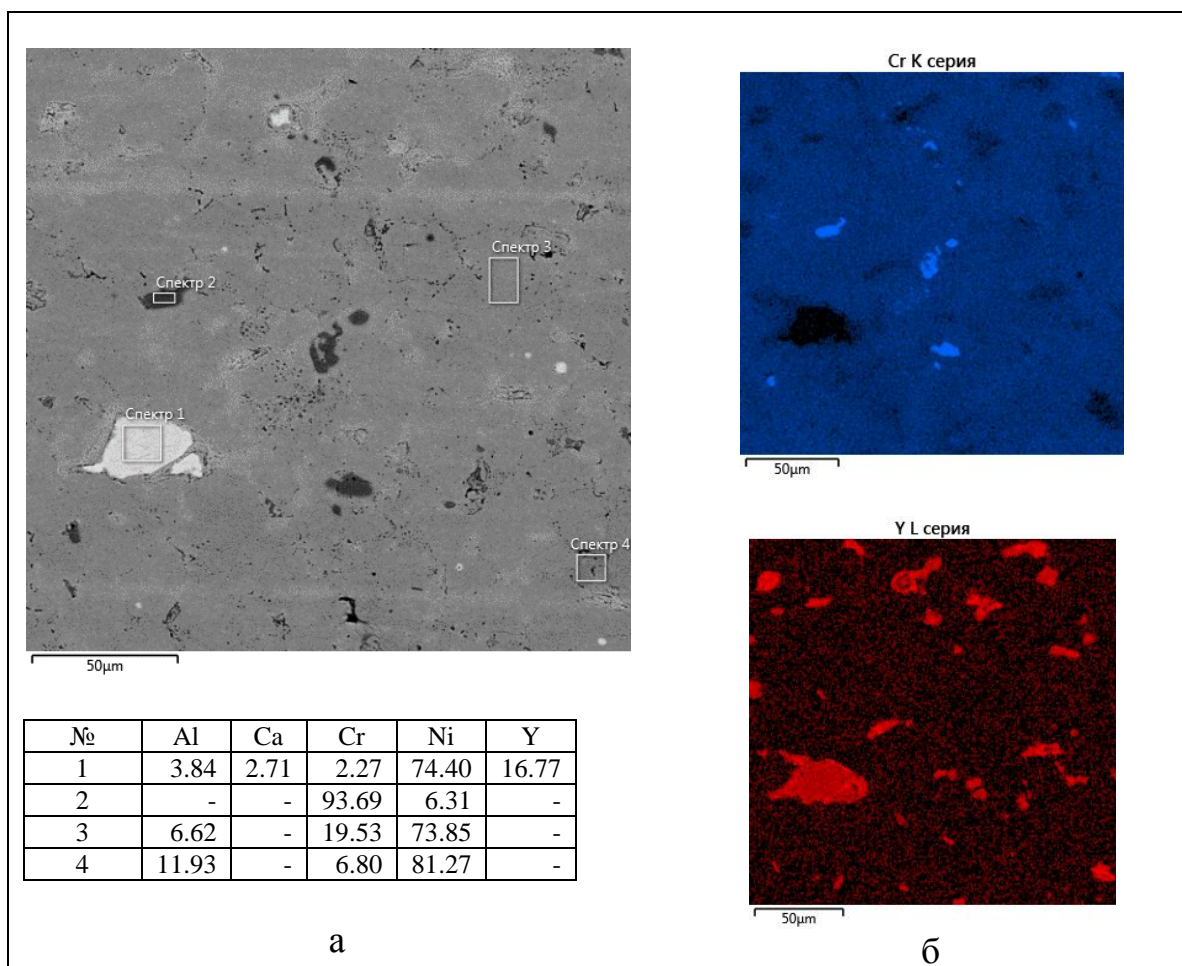


Рисунок 3 – СЭМ изображение образца ПВ-НХ16Ю6Ит (а) и карты распределения хрома и иттрия (б) после ИПС.

Таким образом, ИПС позволяет получить достаточно плотный материал НХ16Ю6Ит, однако в его структуре сохраняются неравномерно распределенные частицы хрома и иттрия. Неравномерность распределения непрореагировавших частиц обусловлена кратковременностью режима ИПС.

#### Библиографический список

1. Cavaliere P., Sadeghi B., Shabani, A., 2019. Spark Plasma Sintering: Process Fundamentals. In *Spark Plasma Sintering of Materials* (pp. 3-20). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-05327-7.

2. Munir Z. A., Quach D. V., Ohyanagi M. Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 94, pp. 1-19, 2011. DOI: [10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x).
3. Bordia R. K., Camacho-Montes H. "Sintering: fundamentals and practice," *Ceramics and Composites Processing Methods*, pp. 1- 42, 2012. DOI: [10.1002/9781118176665.ch1](https://doi.org/10.1002/9781118176665.ch1).
4. Minet K., Saharan A., Loesser A. et al. (2019) Superalloys, powders, process monitoring in additive manufacturing. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* (eds F.Froes, R. Boyer), Elsevier Inc., Pages 163-185 DOI: [10.1016/B978-0-12-814062-8.00009-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00009-1).
5. Song J. et al. Simultaneous synthesis by spark plasma sintering of a thermal barrier coating system with a NiCrAlY bond coat // *Surf. Coat. Technol.* – 2010. – V.205. No.5. P. 1241-1244. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2010.08.064](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.064)