

УДК 55.09.43

*А. С. ФЕДОСЕНКО*, канд. техн. наук, доц.

*Ф. Г. ЛОВШЕНКО*, д-р техн. наук, проф.

*А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ*

*И. К. АНДРЕЕВ*

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ СПОСОБАМИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА**

### **Аннотация**

Приведены результаты исследования механически легированных порошков на основе железа и никеля, предназначенных для формирования изделий газотермическим напылением и селективным лазерным сплавлением (СЛС). Установлены фазовый состав, структура и свойства порошков, а также структура и свойства плазменных покрытий и изделий, полученных методом СЛС.

### **Ключевые слова:**

реакционное механическое легирование, аддитивные технологии, механически легированные порошки, фазовый состав, металлические порошки, микроструктура, твердость, жаропрочность.

**Введение.** Современные аддитивные технологии (АТ) позволяют производить уникальные изделия из большинства конструкционных материалов, в том числе из металлов и сплавов. Базой для получения изделий является цифровая модель, воплощение которой в трехмерное изделие реализуется с помощью универсального или специального оборудования, такого как робототехнические комплексы для сварки, установки плазменной, лазерной, аргонодуговой наплавки, оборудование газотермического напыления.

В настоящее время основной объем порошков, применяемых в области АТ, приходится на высоколегированные нержавеющей стали. Среди них наиболее часто применяют сплавы аустенитного класса [1–3], прочность которых зачастую уступает прочности материалов, полученных классическими способами. В то же время перспективным направлением применения аддитивных технологий является производство сложных деталей, способных работать при повышенных температурах в сочетании со значительными механическими нагрузками. В ближайшие 5–7 лет доля таких деталей в самолето-, ракетостроении и энергетике должна превысить 50 % от общего количества. Одна из ключевых характеристик материалов этого класса – высокая жаропрочность.

Перспективным направлением получения трехмерных изделий, отличающихся высокими прочностными характеристиками, является применение в качестве конструкционного материала жаропрочных порошков, получаемых по технологии реакционного механического легирования [4, 5].

**Методика проведения эксперимента.** Основными исходными компонентами для производства механически легированных порошков выступали классические, промышленно выпускаемые порошки ПЖ2М2, ПХ30, ПНК-ОНТ2, ПА4, а также технически чистые порошки хрома, молибдена и оксидов железа, никеля, молибдена. Поставщиком углерода служил порошок белого чугуна ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

С целью повышения твердости, износостойкости и жаропрочности изделий в ряд исследуемых композиций дополнительно вводились алюминий и один из оксидов  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ , выполняющих роль поставщика кислорода. Основным продуктом их взаимодействия являются частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Механическое легирование осуществлялось в механореакторе – энергонапряженной вибромельнице с четырьмя рабочими камерами объемом  $1 \text{ дм}^3$  каждая.

Реализовано два вида аддитивных технологий. Результатом первого вида являлись покрытия, полученные плазменным напылением разработанных порошков. Процесс осуществлялся с использованием дугового плазмотрона. Плазмообразующие газы – воздушно-пропановая смесь. Во втором случае образцы получали методом селективного лазерного сплавления на принтере EP-M250.

Металлографический анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II SBH. Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре «ДРОН-3».

#### **Результаты исследования.**

**Механическое легирование.** Проведенные исследования позволили установить, что оптимальные значения переменных факторов, обеспечивающие возможность получения композиционных порошков с максимальной твердостью, пригодные для использования в области послойного синтеза, составляют: ускорение рабочих тел  $a_n = 135 \dots 145 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ; отношение рабочих тел к шихте  $k = 10 \dots 12$ ; степень заполнения камеры рабочими телами  $\varepsilon = 75 \% \dots 80 \%$ ; время обработки  $\tau = 8 \dots 10 \text{ ч}$ .

Порошки состоят из частиц, основная часть которых имеет размер не более  $80 \text{ мкм}$ , при этом доля, пригодная для реализации процессов послойного синтеза, достигает  $80 \%$  от общей массы. Частицы имеют форму, близкую к сферической.

Условия механосинтеза, включающие многократно повторяющиеся акты дробления частиц и их объединения посредством наваривания друг на друга, способствуют активному протеканию процессов диффузии и взаимодействия между компонентами, что сопровождается формированием материала, гомогенного на субмикроструктурном уровне (рис. 1).

Результатом механохимического взаимодействия между компонентами обрабатываемой шихты являются, как правило, наноразмерные, зачастую рентгеноаморфные, соединения, основные из которых – оксиды, карбиды, интерметаллиды, а также твердые растворы.

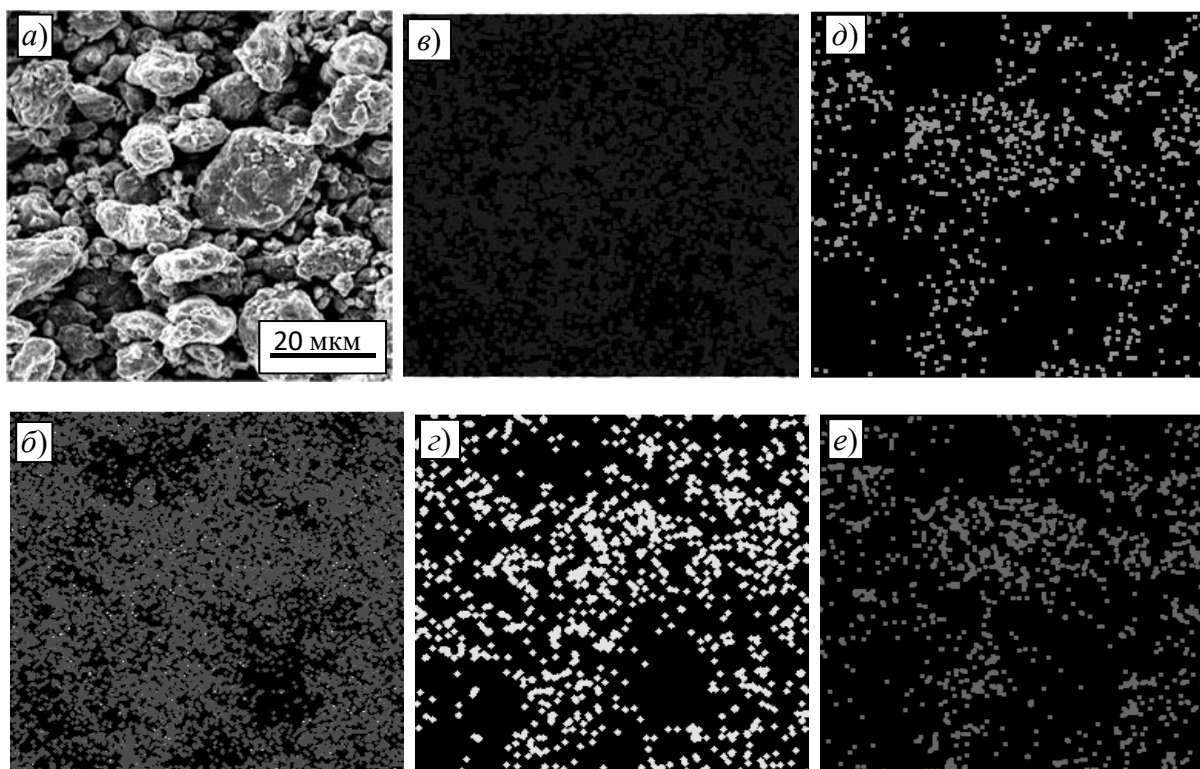


Рис. 1. Топография поверхности частиц порошка 12X18H10–(Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al) (СЭМ) и распределение основных элементов Fe (б), Cr (в), Ni (г), Al (д), O (е) в них: а – топография поверхности частиц; распределение интенсивности рентгеновского излучения

Все полученные материалы отличаются комплексным упрочнением. Решающее значение имеют зернограничный и дисперсный механизмы упрочнения. Синтезированные наноразмерные фазы карбидов и оксидов отличаются высоким значением модуля сдвига и обеспечивают высокую стабильность границ зерен и субзерен. Это определяет высокую твердость и жаропрочность порошков при температурах до  $0,85T_{пл. основы}$  (табл. 1).

Табл. 1. Фазовый состав механически легированных порошков

Обозначение	Фазовый состав		
	равновесный	механически легированных порошков	механически легированных порошков, подвергнутых термообработке ( $T = 0,9T_{пл.}$ )
40X13	<u>Fe<sub>α</sub>(Cr)</u> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	<u>Fe<sub>α</sub></u> , Fe <sub>α</sub> (C), Fe <sub>γ</sub> (C), (Fe, Cr), Fe <sub>2</sub> C	<u>Fe<sub>α</sub></u> , Fe <sub>α</sub> (C), Fe <sub>2</sub> C, FeC, CrC
12X18H10	<u>Fe<sub>γ</sub>(Cr, Ni)</u> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	<u>Fe<sub>γ</sub>(Cr, Ni)</u> , Fe <sub>α</sub> (Ni), Fe <sub>α</sub> (C), (Fe, Cr), FeNi <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> C, Ni	Fe <sub>γ</sub> (Cr, Ni), Fe <sub>3</sub> C
H90Ю10	<u>Ni(Al)</u> , Ni <sub>3</sub> Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	<u>Ni(Al)</u> , Ni <sub>3</sub> Al, NiAl, Al	<u>Ni(Al)</u> , Ni <sub>3</sub> Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
H90Ю10-(Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al)	<u>Ni(Al)</u> , Ni <sub>3</sub> Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	<u>Ni(Al)</u> , Ni <sub>3</sub> Al, NiAl, Al, Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>Ni(Al)</u> , Ni <sub>3</sub> Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

*Примечание* – Подчеркиванием выделены соединения, формирующие основу исследуемых материалов

### Покрyтия, полученные плазменным напылением.

Покрyтия из разработанных механически легированных порошков отличаются микроструктурой, типичной для данного вида материалов, которая состоит из плотно уложенных и сильно деформированных частиц, превращающихся при ударе о поверхность подложки в пластины толщиной до 3 мкм и длиной 20...30 мкм. Формируемые слои сохраняют равномерное на субмикрoкристаллическом уровне распределение всех элементов (рис. 2).

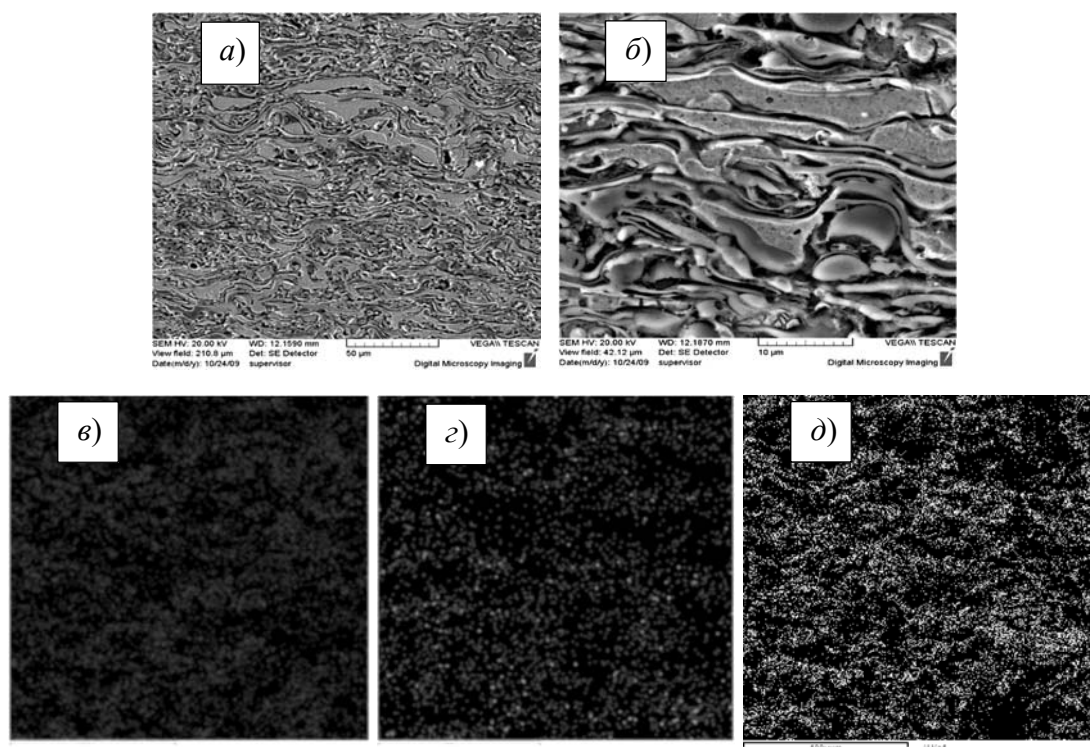


Рис. 2. Микроструктура (а, б) и распределение элементов Ni (в), Al (г), O (д) в покрyтии H90Ю10-ДУ

Формируемые покрyтия имеют фазовый состав и структуру, соответствующие составу и структуре напыляемых механически легированных порошков. Присутствующие в составе матрицы равномерно распределенные ультрадисперсные частицы синтезированных термодинамически стабильных фаз в виде оксидов и карбидов оказывают на кристаллизующийся металл существенный модифицирующий эффект. Являясь центрами кристаллизации, они создают условия для получения микроструктуры с размером зерен менее 300 нм, разделенных на блоки величиной не более 100 нм, по границам которых распределены ультрадисперсные частицы оксидов и карбидов размером не более 30 нм.

В покрyтиях из порошков сталей мартенситного класса основой выступает мартенсит, в покрyтиях из аустенитных сталей – аустенит и небольшое количество мартенсита. Основой никелевых покрyтий служит твердый раствор легирующих элементов в никеле, упрочняющие фазы – ультрадисперсные включения интерметаллидов системы «никель – алюминий» и оксидов алюминия.

Испытания на абразивный износ показали, что покрытия из разработанных порошков по износостойкости до 1,7 раза превосходят покрытия из серийных порошков аналогичного химического состава.

### **Микроструктура и свойства материалов, полученных способом селективного лазерного сплавления (СЛС).**

Разработанные механически легированные порошки, содержащие синтезированные ультрадисперсные частицы термодинамически стабильных упрочняющих фаз, оказывают на микроструктуру образцов, полученных способом СЛС, существенный модифицирующий эффект аналогично слоям, формируемым газотермическим напылением. В данном случае это выражается в существенном снижении среднего размера поперечного сечения зерен материала. Так, образцы из серийного порошка состоят из крупных кристаллов с размером в поперечном сечении до 160 мкм, а образцы, полученные из механически легированных порошков, имеют размер зерна с поперечным сечением не более 40 мкм (рис. 3).

Следует отметить, что в образцах из механически легированных порошков отсутствуют сквозные столбчатые кристаллы, проходящие через все тело образца. Каждое зерно имеет границы раздела с соседними зернами, а угол разориентирования кристаллов относительно друг друга превышает  $5^\circ$ .

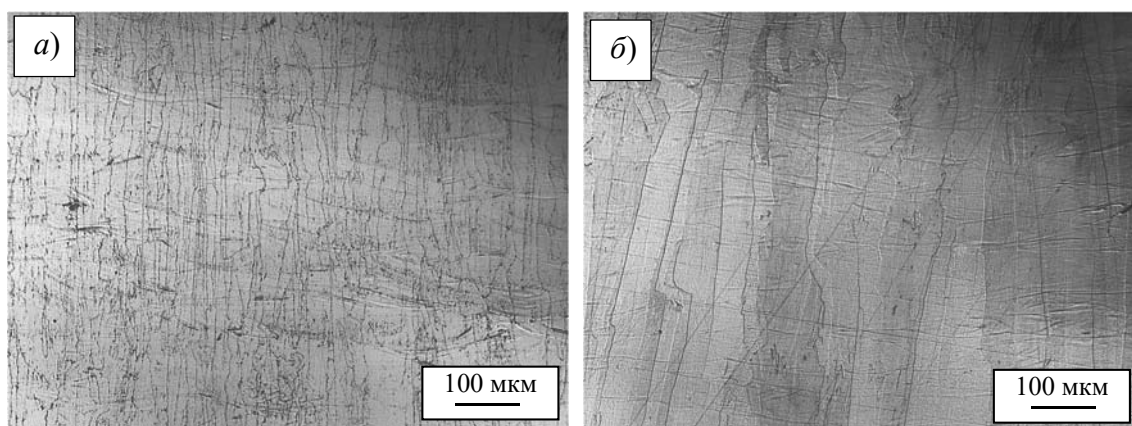


Рис. 3. Микроструктура отожженных образцов, полученных способом селективного лазерного сплавления: *а* – механически легированный порошок; *б* – серийный материал

Стали, полученные способом СЛС с использованием разработанных механически легированных порошков, превосходят образцы сталей из серийно выпускаемого материала близкого химического состава по твердости как в состоянии непосредственно после послойного синтеза, так и после длительного отжига при температурах до  $900^\circ\text{C}$ .

**Заключение.** Представленные результаты являются базой для разработки широкой номенклатуры механически легированных порошков на основе железа и никеля. Также они служат фундаментом для создания порошковых материалов на основе других металлов, таких как алюминий, медь, титан, которые активно используются в современной промышленности, включая область аддитивных технологий.

Разрабатываемые порошки благодаря своим характеристикам способны успешно применяться для создания специальных покрытий и формирования тонкостенных изделий методами газотермического напыления, а также использоваться для изготовления трехмерных объектов способом СЛС, обеспечивая при этом уровень эксплуатационных характеристик выше, чем у изделий, изготовленных из серийных порошков.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Research and Development of Additive Manufactured Bladed Disks [Electronic resource] / J. A. Bayliff [et al.]. – Mode of access: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/250277/250277.pdf>. – Date of access: 29.06.2019.
2. Laser Metal Deposition as Repair Technology for a Gas Turbine Burner Made of Inconel 718 / T. Petrat [et al.] // Physics Procedia. – 2016. – Vol. 83. – P. 761–768.
3. **Madara, S. R.** Review of Recent Developments in 3-D Printing of Turbine Blades / S. R. Madara, Ch. P. Selvan // European Journal of Advances in Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 4 (7). – P. 497–509.
4. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов: монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.- Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
5. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных материалов: монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 420 с.: ил.

Контакты:

5trannik@tut.by (Федосенко Алексей Сергеевич);  
 lovshenko2014@yandex.ru (Ловшенко Федор Григорьевич);  
 capsloock3333@mail.ru (Оленцевич Алексей Сергеевич);  
 Iaa10319@gmail.com (Андреев Илья Константинович).

***A. S. FEDOSENKO, F. G. LOVSHENKO, A. S. OLIENTSEVICH,  
 I. K. ANDREYEU***

#### **PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF MECHANICALLY ALLOYED POWDERS FOR THE FORMATION OF PARTS IN THE FORM OF SHELLS AND PRODUCTION OF PRODUCTS USING ADDITIVE METHODS**

##### **Abstract**

The results of a study of mechanically alloyed powders based on iron and nickel intended for the formation of products by gas-thermal spraying, as well as selective laser melting (SLM), are presented. The phase composition, structure and properties of powders, as well as the structure and properties of plasma coatings and products obtained by the SLS method, have been established.

##### **Keywords:**

reaction mechanical alloying, additive technologies, mechanically alloyed powders, phase composition, metal powders, microstructure, hardness, heat resistance.