

СТРУКТУРА ГИБРИДНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ШЛАКОВ ПОРОШКОВ

И. В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,
П. Е. ЛУЩИК, канд. техн. наук, **А. Д. РУЛЕНКОВ**
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»
Л. П. ДОЛГИЙ, канд. техн. наук, **О. Г. ДЕВОЙНО**, д-р техн. наук,
Г. В. ДОВНАР, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет

Представлены результаты исследования структуры гибридных функционально-градиентных материалов, полученных с использованием порошков, выделенных из литейных алюминиевых шлаков, образующихся при металлургической переработке алюмоматричных кварцсодержащих композиций. Установлено, что в результате лазерной обработки покрытий, полученных газопламенным напылением на поверхность стальной подложки дисперсных материалов, синтезированных при металлургической обработке литейных алюмоматричных композиций, формируется беспористая, мелкодисперсная структура поверхностного покрытия.

***Ключевые слова:** функционально-градиентные материалы, покрытия, структура, лазерная обработка*

STRUCTURE OF HYBRID FUNCTIONAL-GRADIENT MATERIALS OBTAINED USING POWDERS SEPARATED FROM CASTING ALUMINUM SLAGS

I. V. RAFALSKI, Ph. D. in Technical Sciences,
P. E. LUSHCHIK, Ph. D. in Technical Sciences, **A. D. RULENKOV**,
Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”
L. P. DOLGIY, Ph. D. in Technical Sciences **O. G. DEVOINO**, Dr.
of Engineering Sciences **G. V. DOVNAR**, Ph. D. in Technical Sciences
Belarusian National Technical University

The article presents the results of the study of the structure of hybrid functionally graded materials obtained using powders of foundry aluminum slags formed during metallurgical processing of aluminum-matrix quartz-containing

compositions. The laser processing coatings obtained by flame spraying on the surface of a steel substrate of dispersed materials synthesized during metallurgical processing of foundry aluminum-matrix compositions results to pore-free, finely dispersed structure of the surface coating.

Keywords: *functionally graded materials, coatings, structure, laser processing*

Введение. Функционально-градиентные материалы (ФГМ) представляют собой класс материалов, состав, структура и свойства которых постепенно изменяются в заданном направлении [1]. Концепция ФГМ характеризует качественно новый этап в развитии материалов, которые отличаются большим структурно-конструкционным разнообразием и могут включать разнородные материалы с различными физико-механическими свойствами.

В зависимости от назначения при получении ФГМ могут быть использованы металлические, керамические, полимерные материалы, а также их комбинации – гибридные функционально-градиентные материалы (ГФГМ). Обладая требуемым сочетанием свойств, ГФГМ могут быть широко востребованы в различных отраслях промышленности [2].

Существующие технологии изготовления ГФГМ интенсивно развиваются с целью обеспечения требуемого уровня эксплуатационных свойств изделий. Изменения структуры поверхности ГФГМ реализуются в методах лазерной обработки, в которых совмещаются физико-химические процессы плавления и взаимодействия разнородных материалов подложки и слоев поверхностных покрытий, прежде всего, для повышения твердости и износостойкости материалов [3]. При этом материал покрытия может быть предварительно нанесен одним из известных способов, таких как напыление газотермическими или газодинамическими методами, физико-химическим осаждением, либо может быть нанесен в виде клевого порошкового состава на поверхность подложки. Последующая лазерная обработка покрытий приводит к чрезвычайно быстрым процессам расплавления, диффузии материалов покрытий и поверхности подложки в локальной зоне плавления с последующим образованием закалочных структур [1–4].

Перспективы развития способов получения и применения ГФГМ с использованием процессов лазерной обработки керамических и металлических материалов определяются совершенствованием методов формирования поверхностных покрытий, в том числе применением бесклеевых способов предварительного нанесения материалов поверхностных покрытий на детали, поскольку клеевые материалы являются дополнительным источником примесей и газов, способствующих образованию дефектов в формируемых при лазерной обработке структурах, а также использованием дисперсных материалов для поверхностных покрытий, полученных из вторичного сырья и отходов металлургического производства литейных сплавов. Для реализации поставленной задачи были проведены экспериментальные работы по оценке возможности получения ГФГМ с использованием дисперсных материалов с высоким содержанием алюмооксидных фаз, выделенных из литейных алюминиевых шлаков, образующихся при металлургической переработке алюмоматричных кварцсодержащих композиций [5].

Методика исследования. Процесс переработки литейного алюминиевого шлака включал этапы предварительного просеивания для удаления крупных фрагментов металлической фракции и конгломератов (более 3 мм), выщелачивания шлаковых фаз с последующей сушкой, размельчения и механической классификации полученного порошкового материала на основе системы Al_2O_3-Al [6].

Предварительное нанесение подготовленного порошкового материала, выделенного из литейного алюминиевого шлака, на поверхность подложки осуществляли методом газопламенного напыления, при этом первоначальная толщина осажденного материала составляла около 500 мкм. В качестве подложки для экспериментальных образцов использовали пластины из стали 65Г. После нанесения материала газопламенным методом на поверхность подложки полученные покрытия подвергали лазерной обработке. Лазерная обработка поверхности проводилась волоконным иттербиевым лазером YLR-1 мощностью 1 кВт при скорости сканирования 5 мм/с.

Исследование структуры покрытий системы Al_2O_3-Al , полученных с использованием дисперсных материалов, образующихся при металлургической переработке алюмоматричных кварцсодержащих

композиций, проводили с использованием оптической и электронной (СЭМ VEGA II LMU) микроскопии.

Результаты исследований и их обсуждение. На рисунках 1–4 представлены макро- и микроструктуры полученных газопламенных покрытий до и после лазерной обработки.

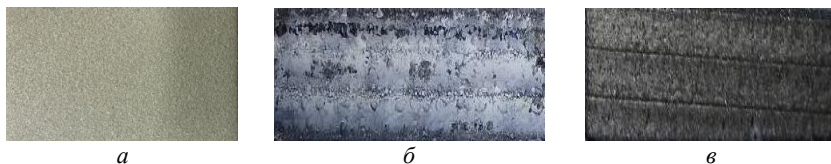


Рисунок 1 – Макроструктура поверхности покрытий на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$, полученного газопламенным напылением дисперсных материалов, синтезированных при металлургической обработке литейных алюмоматричных композиций:

a – до лазерной обработки; *б* – после лазерной обработки при скорости сканирования 100 мм/мин и дистанции до покрытия 135 мм; *в* – после лазерной обработки при скорости сканирования 500 мм/мин и дистанции до покрытия 400 мм

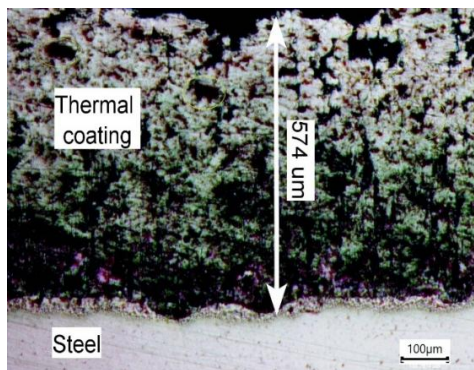


Рисунок 2 – Микроструктура покрытия (поперечный срез) на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$, полученного газопламенным напылением дисперсных материалов, синтезированных при металлургической обработке литейных алюмоматричных композиций

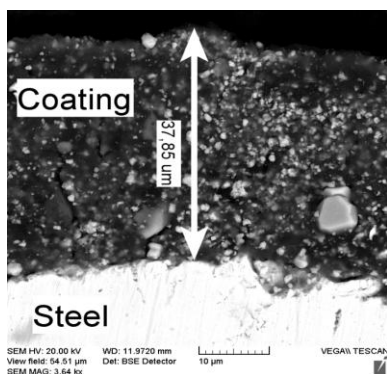
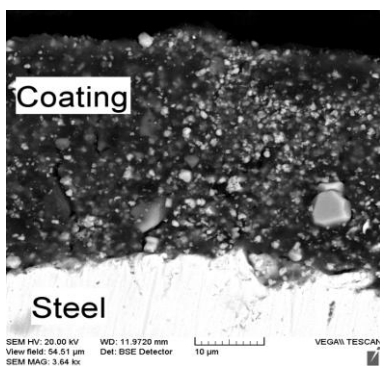


Рисунок 3 – Микроструктура покрытия (поперечный срез) на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$, полученного газопламенным напылением дисперсных материалов, синтезированных при металлургической обработке литейных алюмоматричных композиций, после лазерной обработки (режим обработки: скорость сканирования 100 мм/мин; дистанция до покрытия 135 мм)

Структура покрытия на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$, полученного газопламенным напылением дисперсных материалов, синтезированных при металлургической обработке литейных алюмоматричных композиций, характеризуется достаточно высокой закрытой пористостью (рисунок 2). В среднем толщина покрытия составила 500–600 мкм.

Покрытие после лазерной обработки (скорость сканирования 100 мм/мин; дистанция до покрытия 135 мм, рисунок 3) характеризуется видимым отсутствием пор, со структурой хорошо сплавленных металлических и неметаллических составляющих различной размерности (микронной, субмикронной, наноразмерной), находящейся, в основном, в пределах от 100 нм до 10 мкм, преимущественно неправильной формы (морфологии).

В структуре покрытия после лазерной обработки идентифицируются продольные и поперечные микротрещины (от 1 мкм до 10 мкм). Толщина покрытия после лазерной обработки составила около 38 мкм, что более, чем в 10 раз меньше начальной толщины поверхностного покрытия, полученного газопламенным напылением (рисунок 3).

Изменение параметров лазерной обработки (скорости и дистанции сканирования) приводит к существенному изменению структу-

ры покрытия. На рисунке 4 представлено изображение микроструктуры покрытия, полученного газопламенным напылением после лазерной обработки с использованием следующих параметров: скорость сканирования 500 мм/мин, дистанция до покрытия 400 мм.

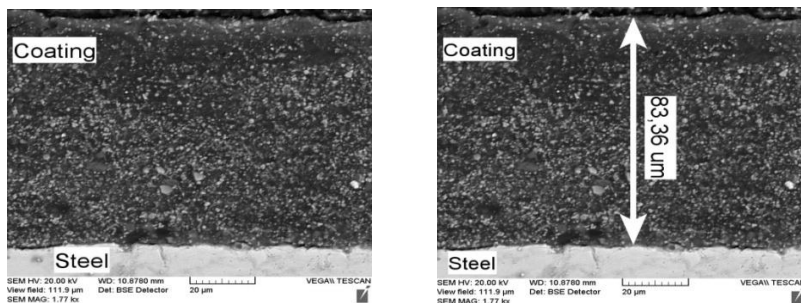


Рисунок 4 – Микроструктура покрытия (поперечный срез) на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$, полученного газопламенным напылением дисперсных материалов, синтезированных при металлургической обработке литейных алюмоматричных композиций, после лазерной обработки (режим обработки: скорость сканирования 500 мм/мин, дистанция до покрытия 400 мм)

Установлено, что полученное покрытие характеризуется однородной структурой с хорошо сплавленными металлическими и неметаллическими частицами, размер которых варьируется от 100 нм до 6–8 мкм, преимущественно глобулярной морфологии и равномерным распределением по сечению покрытия. При этом в структуре покрытия не наблюдается дефектов в виде пор и трещин. Толщина покрытия составила около 80 мкм, что примерно в 7 раз меньше начальной толщины поверхностного покрытия, полученного газопламенным напылением.

Таким образом, экспериментально установлено, что в результате лазерной обработки толщина материала покрытия на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$, полученного газопламенным напылением на поверхность стальной подложки дисперсных материалов, синтезированных при металлургической обработке литейных алюмоматричных композиций, уменьшается в 7–10 раз. При этом отмечается формирование плотной, беспористой мелкодисперсной структуры материала, в отличие от исходной пористой структуры газопламенного покрытия. Максимальные значения твердости полученных после лазерной обработки покрытий составили 680 HV.

Полученные результаты исследований по формированию защитных покрытий с использованием дисперсных материалов на основе системы «оксид алюминия–алюминий», выделенных из шлаков литейного производства алюминиевых сплавов, могут быть использованы при разработке составов и способов получения функционально-градиентных материалов с применением методов высокоэнергетической лазерной обработки.

Список литературы

1. Минько, Д. В. Теория и практика получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2020. – 450 с.

2. Time efficient laser modification of steel surfaces for advanced bonding in hybrid materials / D. Voswinkel [et al.] // Production Engineering. – 2021. – Vol. 15. – P. 263–270.

3. Dutta Majumdar, J. Laser processing of materials / J. Dutta Majumdar, I. Manna // Sadhana. – 2003. – Vol. 28, Parts 3&4. – P. 495–562.

4. Woldetinsay G. Jiru. Laser Surface Alloying of Copper, Manganese, and Magnesium with Pure Aluminum Substrate / Woldetinsay G. Jiru, M. Ravi Sankar, Uday S. Dixit // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25 (3). – P. 1172–1181.

5. Структура и свойства шлаков, образующихся при металлургической переработке алюмоматричных кварцсодержащих композиций / И. В. Рафальский [и др.] // Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 26–34.

6. Процессы переработки солевых шлаков алюминиевого производства для получения порошкового материала с высоким содержанием алюмооксидных фаз / Б. М. Немененок [и др.] // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 88–96.

References

1. Minko, D. V. *Teorija i prakтика poluchenija funkcionalno-gradientnyh materialov impulsnymi elektrofizichesкими metodami* [Theory and practice of obtaining functionally graded materials by pulsed elec-

trophysical methods] / D. V. Minko, K. E. Beljavin, V. K. Sheleg. – Minsk: BNTU Publ., 2020. – 450 p.

2. Time efficient laser modification of steel surfaces for advanced bonding in hybrid materials / D. Voswinkel [et al.] // *Production Engineering*. – 2021. – Vol. 15. – P. 263–270.

3. Dutta Majumdar, J. Laser processing of materials / J. Dutta Majumdar, I. Manna // *Sadhana*. – 2003. – Vol. 28, Parts 3&4. – P. 495–562.

4. Woldetinsay G. Jiru. Laser Surface Alloying of Copper, Manganese, and Magnesium with Pure Aluminum Substrate / Woldetinsay G. Jiru, M. Ravi Sankar, Uday S. Dixit // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – Vol. 25 (3). – P. 1172–1181.

5. *Struktura i svojstva shlakov, obrazujuschijsja pri metallurgicheskoj pererabotke aljumomatricznych kvartcsoderzhaschih kompozitsij* [Structure and properties of slags formed during metallurgical processing of aluminum matrix quartz-containing compositions] / I. V. Rafalski [et al.] // *Metallurgija: Respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU, 2021. – Vyp. 42. – P. 26–34.

6. *Processy pererabotki solevyh shlakov aljuminievogo proizvodstva dlja poluchenija poroshkovogo materiala s vysokom sodержaniem aljumooksidnyh faz* [Processes of salt slag recycling in aluminum production to obtain powder material with a high content of aluminum oxide phases] / B. M. Nemenenok [et al.] // *Litje i metallurgija = Foundry production and metallurgy*. – 2022. – No 4. – P. 88–96.

Поступила 11.11.2024

Received 11.11.2024