

УДК 669.2.017:620.18; 669.2.017:620.17

### СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ $Al_2O_3$ -Al, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

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

*Представлены результаты исследования микротвердости в зависимости от параметров лазерной обработки газотермических покрытий на основе системы  $Al_2O_3$ -Al, полученных с использованием дисперсных материалов, синтезированных металлургической обработкой литейных алюмоматричных композиций. Выполнен сравнительный анализ триботехнических свойств покрытий, полученных высокоэнергетическими методами (газопламенным напылением, плазменным напылением, газопламенным напылением с последующей лазерной обработкой покрытия) с использованием синтезированных металлургической обработкой литейных алюмоматричных композиций дисперсных материалов.*

**Ключевые слова:** дисперсный материал, система  $Al_2O_3$ -Al, литейные алюмоматричные композиции, газотермическое покрытие, лазерная обработка, триботехнические свойства

### PROPERTIES OF $Al_2O_3$ -Al COATINGS OF DISPERSED MATERIALS SYNTHESIZED BY PROCESSING OF CASTING ALUMINUM-MATRIX COMPOSITIONS

**A. D. RULENKOV, I. V. RAFALSKI**, Ph. D. in Technical Sciences,  
**P. E. LUSHCHIK**, Ph. D. in Technical Sciences  
Science and Technology Park of BNTU "Polytechnic"  
**O. G. DEVOINO**, D-r of Engineering Sciences  
Belarusian National Technical University

*The results of the research of microhardness depending on the parameters of laser processing of thermal  $Al_2O_3$ -Al coatings produced by dispersed materials synthesized by*

*metallurgical processing of cast aluminum matrix compositions are presented. A comparative analysis of the tribological properties of coatings produced by high-energy methods (gas-flame spraying, plasma spraying, gas-flame spraying with subsequent laser processing of the coating) using dispersed materials synthesized by metallurgical processing of cast aluminum matrix compositions is performed.*

**Keywords:** *dispersed material, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al system, cast aluminum matrix compositions, gas-thermal coating, laser processing, tribological properties*

**Введение.** В настоящее время остро стоит вопрос экологической безопасности, связанный с утилизацией шлаковых отходов литейного производства алюминия, так как данные материалы являются отходами 4 класса опасности. Большинство используемых в промышленности классических технологий переработки направлены на максимальное извлечение металлического алюминия, при этом возможность комплексной переработки литейных отходов недостаточно исследована. Это приводит к загрязнению окружающей среды и потерям при этом большей части ценных составляющих литейных шлаков (таких как оксид алюминия и извлекаемая солевая часть).

Научные публикации, посвященные эффективным комплексным технологиям переработки шлаковых отходов алюминия, берут свое начало еще в 50-е года прошлого века, но должного развития в настоящее время не получили из-за ряда причин, основной из которых является низкий экономический эффект от реализации составляющих переработки. Вместе с тем дальше и ближе зарубежье, следуя тенденциям «зеленой» экономики, все чаще предпочитает при выплавке алюминиевых сплавов использовать в качестве шихтового материала вторичный алюминий, применяя при этом комплексные безотходные технологии. Широкое распространение получила технология безотходного производства вторичных сплавов алюминия, описанная в работе [1]. Эта технология предполагает отделение крупных и мелких металлических королек алюминия с целью переплава, а солевая составляющая возвращается в производственный цикл плавки вторичных алюминиевых сплавов после обогащения. Измельченная оксидная составляющая литейного шлака может быть использована как в качестве основы портландцемента различных марок, так и при производстве экзотермических смесей, используемых в том числе в литейном производстве. Таким

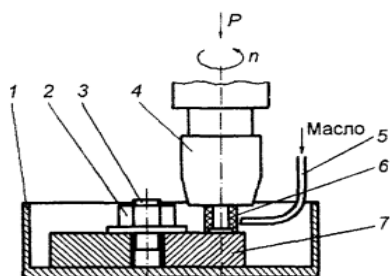
образом исключаются затраты на утилизацию экологически небезопасных отходов.

По данным автора работы [2] в последнее время литейный шлак алюминия все чаще используется в различных сферах промышленности, например, как коагулянт для очистки воды, в качестве разделительных смесей, как раскислительная смесь в сталеплавильном производстве и т. д. Оксидная составляющая литейного алюминиевого шлака представляет особый интерес как исходное сырье для производства конгломерированных дисперсных порошковых материалов с высоким содержанием алюмооксидных фаз для термического напыления [3].

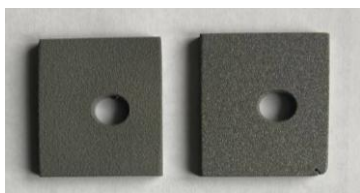
Технологические режимы переработки, представленные в работе [4], открывают возможности для собственного производства дисперсных порошковых материалов с высоким содержанием алюмооксидных фаз, для замены импортных аналогов композиционных материалов системы  $Al_2O_3-Al$  и для дополнительной разгрузки сельскохозяйственных площадей, занятых отвальными литейными шлаками, накопленными за десятилетия работы литейного производства. Новый экологически чистый материал представляет собой металлокерамический конгломерат системы  $Al_2O_3-Al$  с минимальным содержанием солей (до 0,5 % масс.) и возможностью его модифицирования. При напылении различными методами этого материала образуются субмикронные и наноструктурные составляющие, оказывающие положительное влияние на эксплуатационные свойства покрытий [5, 6]. В настоящей статье представлены результаты исследования трибологических свойств, сформированных газопламенным и плазменным методами покрытий системы  $Al_2O_3-Al$  после высокоэнергетической лазерной обработки.

**Методика исследования.** Исследование влияния параметров лазерной обработки газотермических покрытий на основе системы  $Al_2O_3-Al$ , полученных с использованием дисперсных материалов, синтезированных металлургической обработкой литейных алюмоматричных композиций, проводили методом полнофакторного эксперимента (ПФЭ) с последующим статистическим анализом показателей, влияющих на микротвердость покрытия. Твердость покрытий оценивали методом Виккерса (HV).

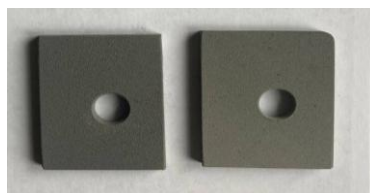
Трибологические испытания покрытий осуществлялись по методике, описанной в работе [7], которая предполагает проведение испытаний в условиях распределенного контакта на специальной установке, выполненной на базе вертикально-сверлильного станка (рисунок 1).



*a*



*б*



*в*

Рисунок 1 – Принципиальная схема трибологических испытаний в условиях распределенного контакта (*a*), по данным работы [7]) и общий вид экспериментальных образцов с плазменным (*б*) и газоплазменным (*в*) покрытиями, полученными с использованием порошков, синтезированных из литейных алюмоматричных кварцсодержащих композиций

В патроне станка закреплялось контртело 6, рабочая часть которого выполнена в виде трубки из твердого сплава ВК6 с толщиной стенки 1,5 мм, средним диаметром 16 мм. Частота вращения шпинделя составляла 2300 об/мин, обеспечивая линейную скорость трения на уровне 115 м/мин. Закрепленный экспериментальный образец 7 в ванне 1 для сбора масла представлял собой прямоугольную пластину с отверстием в центре (рисунок 1, *б* и *в*).

Образец был закреплен при помощи шпильки 3 и гайки 2. Подача смазки в зону трения была организована капельным способом посредством трубки 5.

Нагрузка на контртело в ходе испытаний обеспечивалась комплектом грузов (1,6; 3,2; 4,8 МПа). Триботехнические характеристики полученного упрочненного покрытия оценивали по величине удельного линейного износа,  $I_{уд}$ , которая рассчитывается с учетом глубины канавки износа, измеренной посредством профилометра MarSurf PS по формуле:

$$I_{\text{уд}} = \frac{H}{ndt' \pi 10^{-3}}, \quad (1)$$

где  $H$  – средняя глубина канавки износа по результатам трех измерений, мм;  $n$  – частота вращения твердотельной втулки (2300 мин<sup>-1</sup>), мин<sup>-1</sup>;  $d$  – средний диаметр втулки, мм;  $t'$  – среднее время изнашивания, мин.

Лазерная обработка включала в себя высокоэнергетическую обработку образцов с оплавлением поверхностного слоя со стороны газотермического покрытия, глубина оплавленного слоя составила 0,4–0,5 мм. Обработка проводилась волоконным иттербиевым лазером YLR-1.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты кодированных значений параметров лазерной обработки и измерений твердости покрытия образцов (рисунок 2) представлены в таблице 1.

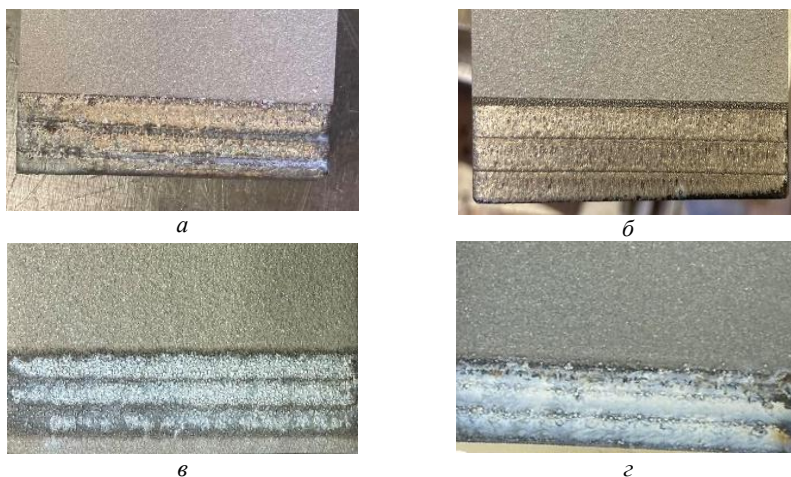


Рисунок 2 – Общий вид образцов с газопламенным покрытием, полученным с использованием материалов, синтезированных из литейных алюмоматричных кварцосодержащих композиций после высокоэнергетической лазерной обработки:

$a$  – скорость сканирования 500 мм/мин.; дистанция 400 мм;  $b$  – скорость сканирования 100 мм/мин; дистанция 400 мм;  $v$  – скорость сканирования 500 мм/мин; дистанция 135 мм;  $z$  – скорость сканирования 100 мм/мин; дистанция 135 мм

Таблица 1 – Матрица плана  $2^2$  и результаты измерения твердости

N	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$\bar{y}_i$	$S_i^2$
1	-	-	+	448,8	518,7	432,6	350,5	448,1	439,74	3600,35
2	-	+	-	594,5	425,4	503,7	537,4	584,4	529,08	4700,75
3	+	-	-	508,2	525,6	556,5	556,5	490,0	527,36	866,06
4	+	+	+	486,5	556,5	619,4	536,0	503,7	542,82	2779,05

В таблице 1 приняты следующие обозначения:  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$  – твердость (HV) параллельных опытов;  $X_1, X_2$  – кодированные уровни скорости сканирования ( $v_{\text{скан}}$ , мм/мин) и дистанции ( $D$ , мм) до оплаваемого слоя, соответственно ( $X_1 = -1$ ; 100 мм/мин;  $X_1 = 1$ ; 500 мм/мин;  $X_2 = -1$ ; 135 мм;  $X_2 = 1$ ; 400 мм). Значение дисперсии воспроизводимости выходного параметра для каждого  $i$ -го опыта определяли по формуле:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}, \quad (2)$$

где  $m = 5$  – количество опытов;  $\bar{y}_i$  – среднее значение в  $i$ -ой строке.

Далее проводили проверку однородности дисперсий опытов по  $G$ -критерию:

$$G_{\text{крит}} = \frac{\max(S_i^2)}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{4700,75}{11946,2} = 0,39. \quad (3)$$

Степени свободы  $f_1, f_2$  соответственно равны 4 и 4. Таким образом, при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  табличное значение  $G$ -критерия  $G_{\text{табл.}} = 0,6287$ . Следовательно, дисперсии можно считать однородными. Так как дисперсии однородны, дисперсию воспроизводимости выходного параметра  $S_y^2$  можно определить как среднее арифметическое полученных дисперсий для каждого  $i$ -го

опыта. Таким образом,  $S_y^2 = 2986,55$ . Далее проведен расчет коэффициентов уравнения регрессии, исходя из свойств матрицы планирования ПФЭ:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N}; \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^N X_1 \bar{y}_i}{N}; \quad (5)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_2 \bar{y}_i}{N}; \quad (6)$$

$$a_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N X_1 X_2 \bar{y}_i}{N}. \quad (7)$$

Таким образом, регрессионная модель зависимости твердости покрытия от параметров лазерной обработки примет следующий вид:

$$y = 510,5 + 26,09X_1 + 26,95X_2 - 17,72X_1X_2.$$

Проверку значимости коэффициентов уравнения определяли путем сравнения абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом.

Доверительный интервал коэффициентов регрессии определяли, используя значение среднеквадратического отклонения  $S\{a_i\}$ :

$$\Delta a_i = \pm t_s S\{a_i\}, \quad (9)$$

где  $t_s$  – табличное значение критерия Стьюдента при принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f = (m - 1)N =$

$= (5 - 1) \cdot 4 = 16$ , для которого определялась дисперсия воспроизводимости выходного параметра.

Поскольку  $S_i \{a_i\} = \sqrt{149,33} = 12,22$ , а критическое значение  $t$ -критерия  $t_{0,05; 16} = 2,12$ , доверительный интервал для коэффициентов регрессии составил:

$$\Delta a_i = 2,12 \cdot 12,22 = \pm 25,905.$$

Таким образом, статистически значимыми коэффициентами являются  $a_1 = 26,09$  и  $a_2 = 26,95$ . Математическая модель твердости после удаления незначимого фактора имеет следующий вид:

$$y = 510,5 + 26,09X_1 + 26,95X_2.$$

Проверку адекватности модели осуществляли по  $F$ -критерию:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} < F_{крит}. \quad (10)$$

В формуле (10) дисперсия адекватности  $S_{ад}^2$  составила:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N - (k + 1)} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_{расч}) = 1255,99, \quad (11)$$

где  $k$  – число выходных параметров.

Расчетное значение критерия Фишера:

$$F_p = \frac{1255,99}{2986,55} = 0,42 < 4,49.$$

Условие адекватности математической модели (10) выполняется. Зависимость твердости покрытия после лазерной обработки (в натуральном масштабе) имеет вид:

$$y = 417 + 0,13025X_1 + 0,2034X_2.$$

На рисунке 3 представлены результаты триботехнических испытаний образцов с газопламенным и плазменным покрытиями на основе системы  $Al_2O_3-Al$ , полученными с использованием материа-



лов, синтезированных в процессе металлургической обработки литейных алюмоматричных композиций.

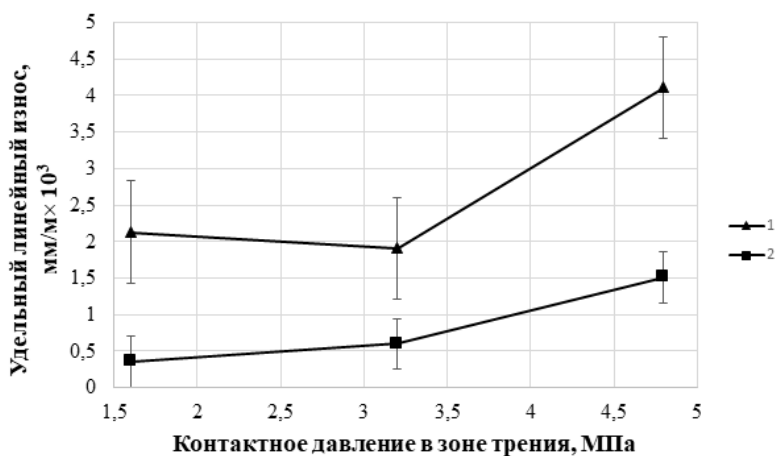


Рисунок 3 – График зависимости удельного линейного износа от контактного давления газопламенного (1) и плазменного (2) покрытий на основе системы  $Al_2O_3-Al$ , полученного с использованием синтезированных металлургической обработкой алюмоматричных композиций

Выполнен сравнительный анализ эксплуатационных (триботехнических) свойств покрытий, полученных высокоэнергетическими методами (газопламенным напылением, плазменным напылением, газопламенным напылением с последующей лазерной обработкой покрытия) (таблица 2).

Результаты сравнительной оценки полученных данных показали, что для сопоставимых режимов испытаний величина удельного линейного износа покрытий после лазерной обработки является минимальной. При этом износостойкость покрытий, полученных газопламенным напылением с последующей лазерной обработкой, увеличилась в 3,6 раза по сравнению с покрытиями без лазерной обработки.

Таблица 2 – Результаты триботехнических испытаний покрытий, полученных из порошков, синтезированных при металлургической обработке алюмоматричных кварцосодержащих композиций (фракция порошкового материала 60–80 мкм, контактное давление в зоне трения 1,6 МПа)

Способ получения покрытия	Среднее время изнашивания, мин	Средняя глубина канавки износа, мм	Удельный линейный износ, мм/м
Газопламенное напыление	1	0,112	0,00213
Плазменное напыление	0,5	0,0473	0,000602
Газопламенное напыление и лазерная обработка	1,5	0,0923	0,00059

### Список литературы

1. **Schmitz, C.** Handbook of Aluminium Recycling: Mechanical Preparation, Metallurgical Processing, Heat Treatment / C. Schmitz. – Berlin; Vulkan-Verlag. Press, 2014. – 556 p.

2. **Применение** алюминиевых шлаков и продуктов их переработки в металлургическом производстве / Л. В. Трибушевский [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 4. – С. 42–49.

3. **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.

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

5. **Рафальский, И. В.** Плазменное напыление композиционных покрытий на основе системы  $Al_2O_3-Al$  / И. В. Рафальский, А. Д. Руленков, О. Г. Девойно // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 88–93.

**6. Лазерное** осаждение сплавов на основе алюминия и магния для ремонта и восстановления поверхности деталей / Б. М. Немененко [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 2. – С. 117–124.

**7. Трибологические** характеристики композиционных покрытий, сформированных лазерной наплавкой порошков никелевого самофлюсующегося сплава и бронзы / Е. Э. Фельдштейн [и др.] // *Трение и износ*, 2016. – Том 37, № 5. – С. 588–596.

## References

**1. Schmitz, C.** Handbook of Aluminum Recycling Mechanical Preparation, Metallurgical Processing, Heat Treatment / C. Schmitz. – Berlin; Vulkan-Verlag. Press, 2014. – 556 p.

**2. *Primenenie* aluminievych shlakov i produktov ih pererabotki v metallurgicheskom proizvodstve** [Application of aluminum slags and their processing products in metallurgical production] / L.V. Tribushevskij [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2021. – No. 4. – P. 42–49.

**3. *Processy pererabotki solevykh shlakov aljuminievogo proizvodstva dlja poluchenija poroshkovogo materiala s vysokim sodержaniem aljumoosidnykh faz*** [Processes for processing salt slags from aluminum production to obtain powder material with a high content of aluminum oxide phases] / B.M. Nemenenok [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2022. – No. 4. – P. 88–96.

**4. *Struktura i svojstva shlakov, obrazujushhishja pri metallurgicheskoj pererabotke aljumomatrichnykh kvarcsoderzhashhih kompozicij*** [Structure and properties of slags formed during metallurgical processing of aluminum matrix quartz-containing compositions] / I. V. Rafalskij [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhdedomstvennyj sbornik nauchnykh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ., 2021. – Vyp. 42. – P. 26–34.

**5. Rafalski, I. V.** *Plazmennoe napylenie kompozicionnykh pokrytij na osnove sistemy  $Al_2O_3-Al$*  [Plasma spraying of composite coatings based on the  $Al_2O_3-Al$  system] / I. V. Rafalskij, A. D. Rulenkov, O. G. Devojno // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2023. – No. 4. – P. 88–93.

**6. *Lazernoe osazhdenie splavov na osnove aljuminija i magnija dlja remonta i vosstanovlenija poverhnosti detalej*** [Laser Deposition of Alu-

minum and Magnesium Based Alloys for Repair and Surface Restoration of Parts] / B. M. Nemenenok [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2024. – No 2. – P. 117–124.

**7. Tribologicheskie** *harakteristiki kompozicionnyh pokrytij, sformirovannyh lazernoj naplavkoj poroshkov nikelvogo samofljusujushhegosja splava i bronzy* [Tribological characteristics of composite coatings formed by laser cladding of nickel self-fluxing alloy and bronze powders] / E. E. Feldshtejn [et al.] // *Trenie i iznos = Friction and wear*. – 2016. – Vol. 37, No 5. – P. 588–596.

*Поступила 10.10.2024*  
*Received 10.10.2024*