

PULSED MULTI-STAGE ELECTRON BEAM PROCESSING AS A METHOD FOR MODIFYING DETAILS MADE OF HYPEREUTECTIC SILUMIN

*Maria Evgenevna Rygina ^{1a}, Yurii Fedorovich Ivanov ¹, Alexander Nikolaevich Prudnikov ²,
Elizaveta Alekseevna Petrikova ¹, Pavel Vladimirovich Moskvina ¹,
Maria Stanislavovna Petyukevich ³, Maxim Sergeevich Torba ¹*

¹ Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademicheskoy Ave., 634055, Tomsk, Russia

² Siberian State Industrial University, 42 Kirov St., 654007, Novokuznetsk, Russia

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

^a ryginame@opec.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

Hypereutectic silumin is a lightweight, corrosion-resistant, inexpensive alloy with a low coefficient of thermal expansion. This material is a promising material for the production of parts for the mechanical engineering and aerospace industries. The primary silicon crystals present in the structure reduce plasticity and make it impossible to use this alloy without additional alloying with expensive additives. The paper proposes a method for modifying the surface layer of hypereutectic silumin using a pulsed electron beam of submillisecond duration (SOLO, HCEI SB RAS) in a single vacuum cycle with multiple treatments with a stepwise decrease in the energy density of the electron beam according to the scheme (50+30+15+10) J/cm² (0.3 s⁻¹, 150 μs, 3 imp., 0.02 Pa). The use of the stepwise processing mode allows, by gradually reducing the volume of the melt bath, to significantly (by 4.5 times, relative to the samples processed in the mode of 50 J/cm², 0.3 s⁻¹, 150 μs, 3 imp., 0.02 Pa) reduce the level of roughness (Ra) of the irradiated surface of the sample with a modified layer thickness of up to 160 μm. The friction coefficient of step-modified samples decreased by 13%, the wear parameter – by 4.4 times relative to silumin in the initial state. The use of the proposed modification mode will increase the service life of products made of hypereutectic silumin.

KEYWORDS

Hypereutectic silumin; pulsed electron beam; multi-stage processing; roughness; tribological properties.

ИМПУЛЬСНАЯ МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ОБРАБОТКА КАК МЕТОД МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА

*Мария Евгеньевна Рыгина ^{1a}, Юрий Федорович Иванов ¹, Александр Николаевич Прудников ²,
Елизавета Алексеевна Петрикова ¹, Павел Владимирович Москвин ¹,
Мария Станиславовна Петюкевич ³, Максим Сергеевич Торба ¹*

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3

² Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

^a ryginame@opec.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Заэвтектический силумин – легкий, коррозионностойкий, дешевый сплав, обладающий низким коэффициентом термического расширения и являющийся перспективным материалом для изготовления деталей машиностроительного и аэрокосмического сектора промышленности. Присутствующие в структуре первичные кристаллы кремния снижают пластичность и делают невозможным применение данного сплава без дополнительного легирования дорогостоящими присадками. В работе предложен способ модификации поверхностного слоя заэвтектического силумина импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия («СОЛО», ИСЭ СО РАН) в едином вакуумном цикле многократной обработкой при ступенчатом снижении плотности энергии пучка электронов по схеме (50+30+15+10) Дж/см² (0,3 с⁻¹, 150 мкс, 3 имп., 0,02 Па). Использование ступенчатого режима обработки позволяет, постепенно уменьшая объем ванны расплава, существенно (в 4,5 раза, относительно образцов, обработанных в режиме 50 Дж/см², 0,3 с⁻¹, 150 мкс, 3 имп., 0,02 Па) снизить уровень шероховатости (Ra) облучаемой поверхности образца при толщине модифицированного слоя до 160 мкм. Коэффициент трения ступенчато модифицированных образцов снизился на 13%, параметр износа – в 4,4 раза относительно силумина в исходном состоянии. Использование предлагаемого режима модификации позволит увеличить срок эксплуатации изделий, изготовленных из заэвтектического силумина.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Силумин заэвтектического состава; импульсный электронный пучок; многоступенчатая обработка; шероховатость; трибологические свойства.

Введение

Заэвтектические силумины являются перспективным материалом для изготовления подшипников качения и деталей поршневой группы двигателей внутреннего сгорания благодаря комплексу свойств: высокая коррозионная стойкость, малый вес, хладостойкость, низкий коэффициент теплового расширения, который обратно пропорционально зависит от содержания кремния в составе сплава. Наличие первичных кристаллов кремния, количество которых растет по мере увеличения концентрации кремния в сплаве, приводит к охрупчиванию материала; дополнительно к этому наличие пор при

традиционных методах изготовления сплава, делают проблематичным промышленное применение данного материала в литом состоянии [1].

Использование концентрированных потоков энергии позволяет формировать в поверхностном слое структуру с высокими механическими и трибологическими характеристиками [2–6]. За счет сверхвысоких скоростей нагревания (до 10⁹ К/с) и охлаждения (10⁴–10⁹ К/с) обработка поверхности металлических материалов импульсным электронным пучком позволяет осуществлять переплав поверхностного слоя с созданием субмикро- наноразмерных структур [7–10].

За счет сил поверхностного натяжения в ванне расплава происходит снижение шероховатости поверхности модифицирования, что является экономически целесообразным, не требуя использования дорогостоящих присадок и осуществления дополнительной механической обработки. Отметим, что допуски посадки для внутренних отверстий деталей размером (1–500) мм, (кавалитет h7–h9) находятся в диапазоне до 120 мкм, для квалитета h9 данная технология может применяться до интервала размеров 30–50 мм [11].

Предварительные эксперименты по обработке поверхности образцов заэвтектического силумина импульсным электронным пучком указывают на перспективность данного способа модификации структуры и свойств материала: выявлено кратное увеличение твердости и износостойкости, а также снижение коэффициента трения [7, 8]. В работах [12–15] показано, что облучение сопровождается снижением предела прочности силумина. Выявленные изменения механических и трибологических характеристик обусловлены структурными изменениями поверхностного слоя материала. Установлено [16], что при воздействии импульсного электронного пучка на силумин, в поверхностном слое образцов формируется структура высокоскоростной ячеистой (столбчатой) кристаллизации с размером ячеек 0,2–0,5 мкм, зависящим от режима облучения. Основной проблемой при использовании импульсного электронного пучка остается нарушение геометрии изделий вследствие формирования высокоразвитого рельефа. В работе предложен режим модификации, позволяющий существенно минимизировать искажение поверхности образцов силумина, подвергаемых импульсной обработке электронным пучком.

Целью настоящей работы является анализ результатов, полученных при изучении структуры, механических и трибологических свойств, уровня шероховатости образцов заэвтектического силумина, облученных импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия.

1. Материал и методика

В качестве материала исследования был выбран сплав алюминий–кремний (АК 20). Сплав готовили в лабораторной электрической печи сопротивления шахтного типа с карбидокремниевыми нагревателями в окрашенном тигле из нержавеющей стали. В качестве шихты использовали технически чистые алюминий А7, соответствующий ГОСТ 11069-2001 [17], и кремний Кр0 (ГОСТ 2169-69 [18]). Образцы, вырезанные из слитка электроискровым методом, подвергаемые облучению, имели прямоугольную форму с размерами 15×15×5 мм.

Модификация поверхности образцов производилась с использованием вакуумной электронно-пучковой установки «СОЛО» (ИСЭ СО РАН), в основе которой лежит электронный источник с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы [19]. Ступенчатое облучение поверхности образцов (табл. 1, режим 1) проводили в едином вакуумном цикле по схеме $E_s(50) \rightarrow E_s(30) \rightarrow E_s(18) \rightarrow E_s(9)$ (в скобках указана плотность энергии пучка электронов). Количество импульсов воздействия на каждой ступени равно 3. Временной интервал между ступенями обработки составлял 15 секунд. Таким образом, поверхность образца была суммарно обработана 12 импульсами. Температура поверхности облучения образца в зависимости от плотности энергии пучка электронов составила $2117,5\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 1309,0\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 799\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 259\text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

В режимах 2–8 каждая группа образцов облучалась при фиксированной величине плотности энергии пучка электронов, равной (E_s , Дж/см²) 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, соответственно. Для каждого режима облучения количество импульсов составляло 3, частота и длительность импульса, давление остаточной атмосфера (аргон) в рабочей камере установки (аналогично ступенчатой обработке) – 0,3 с⁻¹, 150 мкс, 0,02 Па.

Таблица 1. Режимы модификации поверхности заэвтектического силумина**Table 1.** Modes of surface modification of hypereutectic silumin

Режим модификации / Modification mode	Энергия ускоренных электронов, кэВ / Energy of accelerated electrons, keV	Плотность энергии пучка электронов, Дж/см ² / Electron beam energy density, J/cm ²	Частота следования импульсов, с ⁻¹ / Pulse repetition frequency, s ⁻¹	Длительность воздействия импульса, мкс / Pulse duration, μ s	Количество импульсов / Number of pulses
1	18	50–30–18–9	0,3	150	3+3+3+3
2–8		от 15 до 70			3

Исследование структуры силумина в исходном состоянии и после облучения осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000), оптической (Микровизор металлографический μ Vizo-MET-221) и сканирующей электронной (прибор SEM 515 Philips) микроскопии. Параметр износа и коэффициент трения определяли на трибометре TRIBOtechnic (условие сухого трения при комнатной температуре, контртело – шарик ШХ15 диаметром 6 мм, диаметр трека 2 мм, скорость вращения образца 2,5 см/с, нагрузка на индентор 4 Н, количество оборотов 8000). Шероховатость поверхности образцов определяли на профилометре TRIBOtechnic в соответствии с ГОСТ 2789-73 [20]. Измерение твердости

осуществляли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,2 Н.

2. Результаты и обсуждение

Облучение образцов заэвтектического силумина импульсным электронным пучком в режиме 1 сопровождается формированием модифицированного слоя, толщина которого достигает 160 мкм (рис. 1). Излом образца демонстрирует многослойную структуру поверхностного слоя (рис. 1, б). Это обусловлено особенностью ступенчатой обработки силумина в условиях снижения плотности энергии пучка электронов на каждом этапе облучения. В результате облучения в поверхностном слое формируется столбчатая структура при толщине столбиков (300–500) нм.

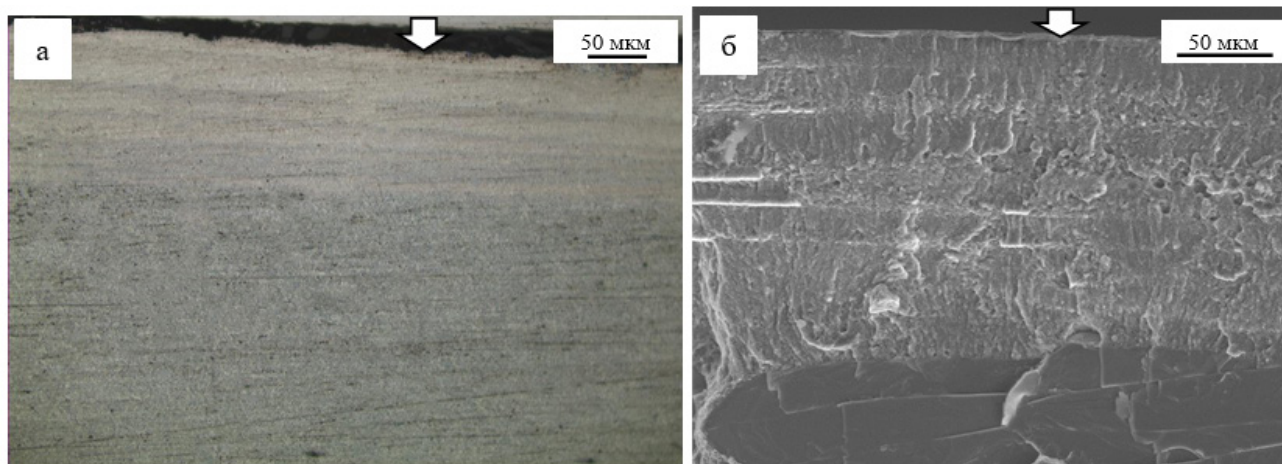


Рис. 1. Структура поперечного шлифа (а) и излома (б) заэвтектического силумина, модифицированного в режиме 1: а – оптическая микроскопия травленого шлифа; б – сканирующая электронная микроскопия излома. Стрелкой указана поверхность облучения

Fig. 1. Structure of a transverse section (a) and a fracture (b) of hypereutectic silumin modified in mode 1: a – optical microscopy of an etched section; б – scanning electron microscopy of a fracture. The arrow indicates the irradiation surface

При облучении силумина импульсным электронным пучком в режимах 2–8 толщина модифицированного слоя увеличивается от 40 мкм до 130 мкм в соответствии с увеличением плотности энергии пучка электронов. В модифицированном слое формируется столбчатая субмикро- наноразмерная структура, многослойность модифицированного объема не выявляется [13, 16].

В табл. 2 приведены параметры шероховатости поверхности образцов в зависимости от режима облучения. Изображения структуры поверхности облученных образцов заэвтектического силумина приведены на рис. 2. Выполненные исследования показали, что увеличение плотности энергии пучка электронов в режимах обработки 2–8 сопровождается немонотонным изме-

нением параметров шероховатости, достигая максимальных значений Ra и Rz при $E_s = 20$ Дж/см². Режим обработки 15 Дж/см², 150 мкс, 0,3 с⁻¹, 3 имп. приводит дополнительно к растрескиванию поверхности образца (рис. 2, а, микротрещины указаны стрелками). Ступенчатая обработка характеризуется существенно более низким уровнем шероховатости поверхности образца (табл. 2), что отражается и на состоянии поверхности модифицирования (рис. 2, д).

Профили поверхности образцов заэвтектического силумина, обработанных импульсным электронным пучком, представленные на рис. 3, наглядно демонстрируют изменение шероховатости материала, подвергнутого различным режимам облучения (рис. 2).

Таблица 2. Характеристики шероховатости поверхности образцов заэвтектического силумина

Table 2. Surface roughness characteristics of hypereutectic silumin samples

Режим модификации / Modification mode	Ra, мкм / Ra, μm	Rz, мкм / Rz, μm
1	0,09	0,47
15 Дж/см ² (режим 2) / 15 J/cm ² (mode 2)	2,57	13,02
20 Дж/см ² (режим 3) / 20 J/cm ² (mode 3)	5,38	35,45
30 Дж/см ² (режим 4) / 30 J/cm ² (mode 4)	0,66	2,81
40 Дж/см ² (режим 5) / 40 J/cm ² (mode 5)	0,29	1,62
50 Дж/см ² (режим 6) / 50 J/cm ² (mode 6)	0,40	1,67
60 Дж/см ² (режим 7) / 60 J/cm ² (mode 7)	0,28	1,14
70 Дж/см ² (режим 8) / 70 J/cm ² (mode 8)	0,95	5,08

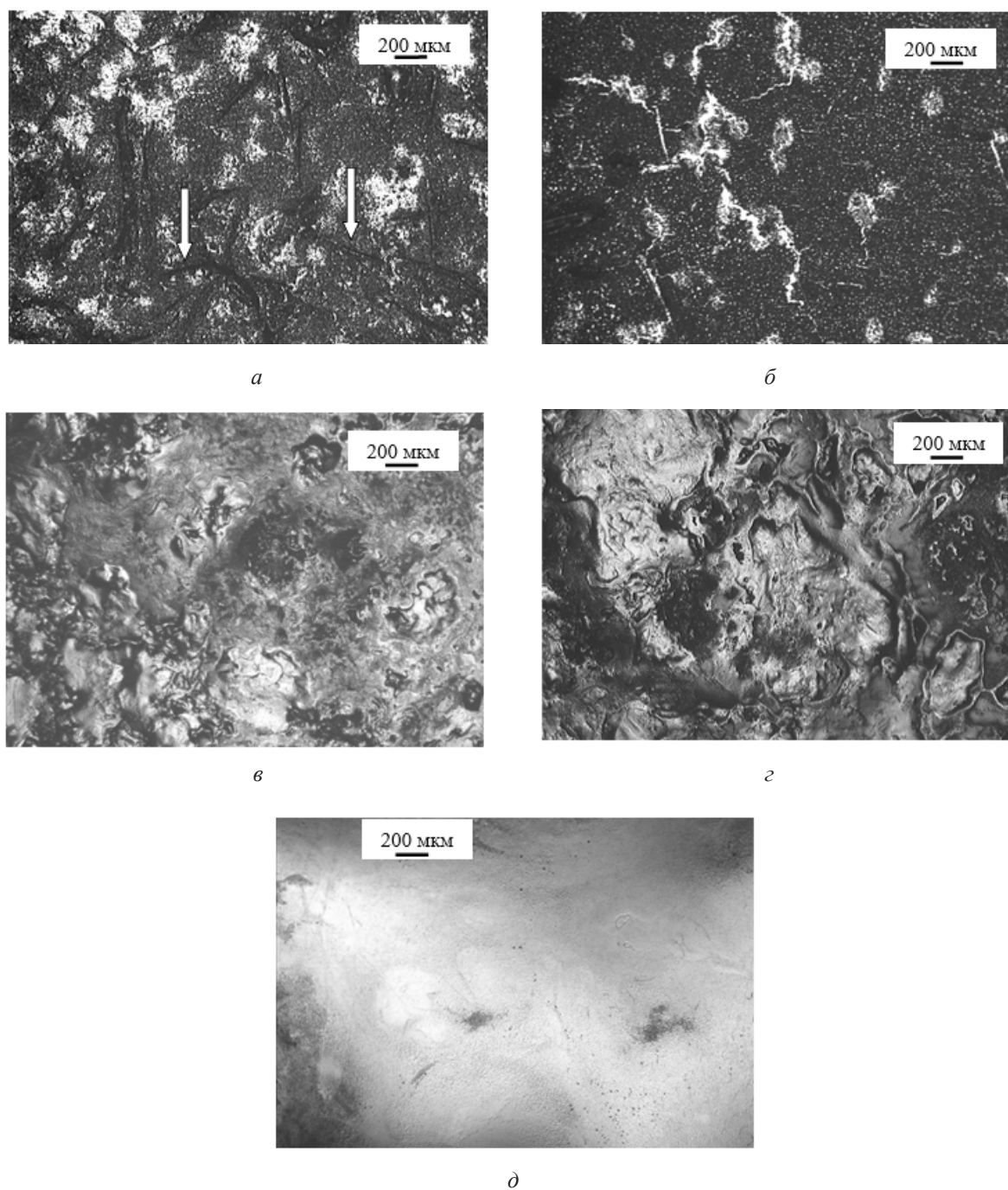


Рис. 2. Оптическое изображение поверхности образцов заэвтектического силумина, обработанных импульсным электронным пучком в режиме облучения (150 мкс, $0,3\text{c}^{-1}$, 3 имп):
a – 15 Дж/см² (режим 2); *б* – 20 Дж/см² (режим 3); *в* – 30 Дж/см² (режим 4);
г – 50 Дж/см² (режим 6); *д* – режим 1. Стрелками на (*a*) указаны микротрещины

Fig. 2. Optical image of the surface of hypereutectic silumin samples treated with a pulsed electron beam in the irradiation mode (150 μs, 0.3 s^{-1} , 3 imp):
a – 15 J/cm² (mode 2); *б* – 20 J/cm² (mode 3); *в* – 30 J/cm² (mode 4); *г* – 50 J/cm² (mode 6); *д* – mode 1.
 Microcracks are indicated by arrows in (*a*)

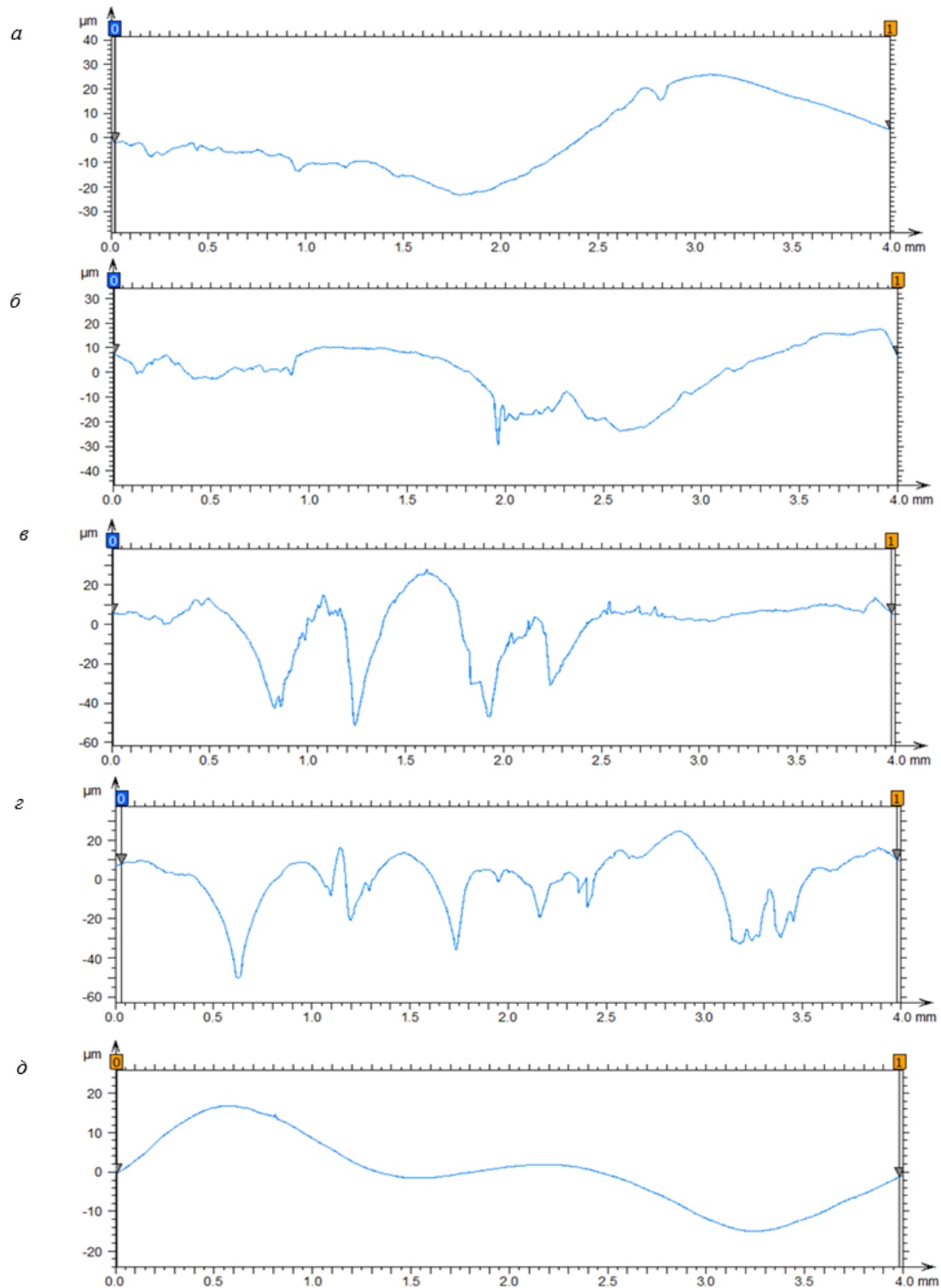


Рис. 3. Профиль поверхности образцов заэвтектического силумина, обработанных импульсным электронным пучком в режиме облучения ($150 \mu\text{s}$, $0,3 \text{ c}^{-1}$, 3 имп):
a – 50 Дж/см^2 (режим 6); *б* – 30 Дж/см^2 (режим 4); *в* – 20 Дж/см^2 (режим 3); *г* – 15 Дж/см^2 (режим 2);
д – режим 1 ($E_s(50) \rightarrow E_s(30) \rightarrow E_s(18) \rightarrow E_s(9)$)

Fig. 3. Surface profile of hypereutectic silumin samples treated with a pulsed electron beam in the irradiation mode ($150 \mu\text{s}$, $0,3 \text{ s}^{-1}$, 3 imp):
a – 50 J/cm^2 (mode 6); *б* – 30 J/cm^2 (mode 4); *в* – 20 J/cm^2 (mode 3); *г* – 15 J/cm^2 (mode 2);
д – mode 1 ($E_s(50) \rightarrow E_s(30) \rightarrow E_s(18) \rightarrow E_s(9)$)

Среднее (на основании 100 измерений) значение микротвердости поверхностного слоя силумина после облучения в режиме 1 составила 1430 МПа, что в 2 раза превышает микротвердость силумина в исходном (литом) состоянии и в 1,6 раза ниже средней микротвердости силумина, облученного по режимам 3–8.

Результаты трибологических испытаний образцов силумина, облученных импульсным электронным пучком, представлены в табл. 3 и на рис. 4. Отчетливо видно, что увеличение плотности энергии пучка электронов сопровождается снижением па-

раметра износа (величина, обратная износоустойкости) материала. Износоустойкость после модификации в режиме 1 увеличилась более, чем в 4 раза по сравнению с износоустойкостью исходного образца. Коэффициент трения образцов после модификации в режиме 1 близок к значениям коэффициента трения, полученных при испытаниях образцов, обработанных в режимах 2–8 ($E_s = (15–70) \text{ Дж/см}^2$). Таким образом, выполненные трибологические испытания показали, что значения износоустойкости и коэффициента трения, полученные в режиме 1 и 2–8, близки по своим значениям.

Таблица 3. Результаты трибологических испытаний образцов силумина, облученных импульсным электронным пучком (150 мкс, $0,3 \text{ с}^{-1}$, 3 имп)

Table 3. Results of tribological tests of silumin samples irradiated with a pulsed electron beam (150 μs , 0.3 s^{-1} , 3 pulses)

Режим модификации / Modification mode	μ	$k, 10^{-4}, \text{ мм}^3/(\text{Н}^*\text{м})$ $k, 10^{-4}, \text{ мм}^3/(\text{N}^*\text{m})$
Литое состояние / Cast state	0,50	11,5
1 ($50–30–18–9 \text{ Дж/см}^2$) / 1 ($50–30–18–9 \text{ J/cm}^2$)	0,43	2,6
2 (15 Дж/см^2) / 2 (15 J/cm^2)	0,43	5,9
3 (20 Дж/см^2) / 3 (20 J/cm^2)	0,43	4,5
4 (30 Дж/см^2) / 4 (30 J/cm^2)	0,44	4,0
5 (40 Дж/см^2) / 5 (40 J/cm^2)	0,43	2,8
6 (50 Дж/см^2) / 6 (50 J/cm^2)	0,41	2,9
7 (60 Дж/см^2) / 7 (60 J/cm^2)	0,43	2,7
8 (70 Дж/см^2) / 8 (70 J/cm^2)	0,44	2,2

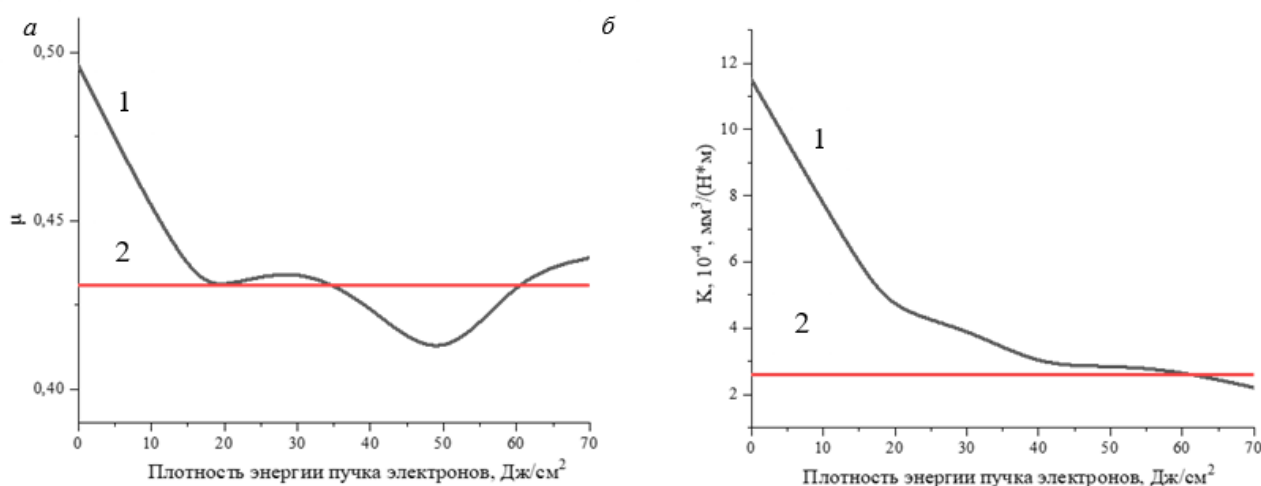


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения (а) и параметра износа (б) от режима модификации: 1 – (режимы обработки 2–8); 2 – режим 1

Fig. 4. Dependence of the friction coefficient (а) and wear parameter (б) on the modification mode: 1 – (processing modes 2–8); 2 – mode 1

Выводы

Осуществлено облучение образцов силумина заэвтектического состава импульсным электронным пучком. Показано, что многоступенчатая обработка, заключающаяся в облучении образцов в едином вакуумном цикле импульсным электронным пучком при последовательном снижении плотности энергии пучка электронов от 50 Дж/см² до 9 Дж/см² по схеме $E_s(50) \rightarrow E_s(30) \rightarrow E_s(18) \rightarrow E_s(9)$ (в скобках указана плотность энергии пучка электронов) позволяет существенно снизить уровень шероховатости обрабатываемой поверхности и при этом сохранить сравнительно высокие значения микротвердости и износостойкости модифицированного слоя, что является важным фактором при модифицировании поверхности деталей и изделий на финишном этапе обработки.

Предлагаемый многоступенчатый режим модификации, в котором в едином вакуумном цикле последовательно облучают поверхность, постепенно снижая плотность энергии пучка электронов, является перспективным, позволяющим сократить затраты на получение изделий с низким уровнем шероховатости, что дает возможность рекомендовать его для обработки изделий поршневой и подшипниковых групп.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRM-2021-0006).

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FWRM-2021-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N.A. Belov, S.V. Savchenko, A.V. Khvan, Phase composition and structure of silamins. Moscow: "MISiS", 2007. 283 p. (in Russian) [Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов. Справочное издание. - Москва: МИСиС, 2007. 283 с.]
2. Zaguliaev D., Ivanov Yu., Kononov S., Abaturova A., Gromov V., Rubannikova Yu., Semin A. Effect of electron-plasma treatment on the microstructure of Al-11wt%Si alloy. // *Materials Research*, 23 (2), e20200057 (2020). DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2020-0057
3. Zaguliaev D., Kononov S., Ivanov Y., Gromov V. Effect of electron-plasma alloying on structure and mechanical properties of Al-Si alloy. // *Applied Surface Science*, 498, 143767 (2019). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.143767
4. Ivanov Yu. F., Gromov V. E., Zagulyaev D. V., Kononov S. V., Rubannikova Yu. A., Semin A. P. Nanostructuring of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying and subsequent electron beam processing // *International Journal of Nanotechnology*, 16, 619–628 (2019). DOI: 10.1504/IJNT.2019.106633
5. Nevskii S. A., Sarychev V. D., Kononov S. V., Granovskii A. Yu., Gromov V. E. Formation Mechanism of Micro- and Nanocrystalline Surface Layers in Titanium and Aluminum Alloys in Electron Beam Irradiation // *Metals*, 10, 1-14 (2020). DOI: 10.3390/met10101399
6. Ivanov Y. F., Petrikova E. A., Gromov V. E. [et al.] Structural-phase state and the properties of silumin after electron-beam surface treatment // *Russian Metallurgy (Metally)*. – Vol. 2019(4), 398-402 (2019). (In Russian) [Иванов Ю. Ф., Громов В. Е. Коновалов С. В. [и др.] Структурно-фазовое состояние и свойства поверхности силумина после электронно-пучковой обработки // *Деформация и разрушение материалов*, 10, 17-21 (2018)]. DOI: 10.31044/1814-4632-2018-10-17-21
7. Koval', N. N., Ivanov, Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams // *Russian Physics Journal*. 51(5), 505-516 (2008). (In Russian) [Коваль, Н. Н. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке / Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов // *Известия вузов. Физика*. 51(5), 60-70 (2008)]. DOI: 10.1007/s11182-008-9073-7.
8. Ivanov Y. F., Petrikova E. A., Ivanova O. V. [et al.] Numerical simulation of the temperature field of silumin irradiated by a high-intensity electron beam // *Russian Physics Journal*. 58 (4), 478-484 (2015). (In Russian) [Иванов Ю. Ф., Петрикова Е. А., Иванова О. В. [и др.] Численное моделирование температурного поля силумина, облученного интенсивным электронным пучком // *Известия вузов. Физика*. 58(4), 46-51 (2015)]. DOI 10.1007/s11182-015-0524-7
9. N. N. Koval, Yu. F. Ivanov, Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys Tomsk: "NTL Publishing House", 2016. 308 p.

(in Russian) [Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов/ Под общ. ред. Н.Н. Коваль и Ю.Ф. Иванова. - Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 308 с.]

10. V. P. Rotshtein, D. I. Proskurovsky, G. E. Ozur, Yu. F. Ivanov, Modification of surface layers of metallic materials with low-energy high-current electron beams. Novosibirsk: "Nauka", 2019. 348 p. (in Russian) [Ротштейн В. П., Проскуровский Д. И., Озур Г. Е., Иванов Ю. Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. Новосибирск: Наука, 2019. 348 с.]

11. GOST 25347-82. Basic norms of interchangeability. Unified system of tolerances and fits. Tolerance fields and recommendable fits. Moscow: "IPK Publishing House of Standards", 2001. 53 p. (in Russian) [ГОСТ 25347-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки. - М.: ИПК издательство стандартов. Москва, 2001. 53 с.]

12. A.P. Laskonev, Yu.F. Ivanov, E.A. Petrikova, et al. Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment. Minsk: "Belarus. Navuka", 2013. 288 p. (in Russian) [А.П. Ласконеv, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: Беларус. Навука. 2013. 288 с.]

13. Rygina M.E., Petrikova E.A., Teresov A.D., Ivanov Yu.F. Studying the possibility of hypereutectic silumin surface layer structure and properties modification by intense pulsed electron beam // Bulletin of Moscow Aviation Institute. 25 (4) 248-256 (2018). (In Russian) [Рыгина М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Иванов Ю.Ф. Исследование возможности модификации структуры и свойств поверхностного слоя заэвтектического силумина интенсивным импульсным электронным пучком // Вестник Московского авиационного института. 25 (4) 248-256 (2018)].

14. Shlyarova Yu. A., Zagulyaev D. V., Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Shlyarov V. V., Prudnikov A. N. Effect of two-stage surface modification on the structure of Al - 11% Si and Al - 20% Si silumins // Metallurgy and Heat Treatment of Metals. 12(810) (2022) 34-42] DOI: 10.30906/mitom.2022.12.34-42. (In Russian) [Шлярова Ю.А., Загуляев Д.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шляров В.В., Прудников А.Н. Влияние двухэтапного поверхностного модифицирования

на структуру силуминов Al - 11 % Si и Al - 20 % Si // Металловедение и термическая обработка металлов. 12(810) (2022) 34-42]. DOI: 10.30906/mitom.2022.12.34-42.

15. Shlyarova Yu.A., Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Electron-ion-plasma modification of the surface of silumin of hypereutectic composition // Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya. 29 (5) 69-78 (2023). (In Russian) [Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Электронно-ионно-плазменное модифицирование поверхности силумина заэвтектического состава // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 29 (5) 69-78 (2023).] DOI: 10.17073/0021-3438-2023-5-69-78

16. Ivanov Yu.F., Klopotov A.A., Petrikova E.A., Rygina M.E., Tolkachev O.S., Klopotov V.D. Structural-phase state of silumin of hypereutectic composition irradiated with a pulsed electron beam // Physicochemical Aspects of Studying Clusters, Nanostructures and Nanomaterials. 12 89-102 (2020). (In Russian) [Иванов Ю.Ф., Клопотов А.А., Петрикова Е.А., Рыгина М.Е., Толкачев О.С., Клопотов В.Д. Структурно-фазовое состояние силумина заэвтектического состава, облученного импульсным электронным пучком // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов 12 89-102 (2020)]. DOI: 10.26456/rascnnp/2020.12.089.

17. GOST 11069-2001. Primary aluminum. Grades. Moscow: "Publishing House of Standards", 2008. 6 p. (In Russian) [ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Марки. - Москва: Издательство стандартов, 2008. 6 с.]

18. GOST 2169-69. Technical silicon. Specifications. Moscow: "Publishing House of Standards", 2001, 6 p. (In Russian) [ГОСТ 2169-69. Кремний технический. Технические условия. - Москва: Изд-во стандартов, 2001. - 6 с.]

19. Grigoriev S.V., Devjatkov V.N., Koval N.N., Teresov A.D. The automated installation for surface modification of metal and ceramic-metal materials and products by intensive pulse sub-millisecond electron beam // Proc. of the 9th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 21-26 September, 19-22 (2008).

20. GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics. Moscow: "Standartinform", 2005. 6 p. (In Russian) [ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Москва: Стандартинформ, 2005. 6 с.]