

Для реализации технологии предполагается создать производственный объект, который будет включать в себя три основные технологические линии, имеющие возможность работать как параллельно, так и независимо друг от друга:

- технологическая линия получения материала и производства из него контейнеров и крышек к ним;

- технологическая линия для осуществления энергосберегающей высокоэффективной технологии концентрирования (обезвоживания) ЖРО;

- технологическая линия автоматической загрузки в контейнер отходов и цемента, герметичной приварки крышки к корпусу контейнера и подготовки к отправке упакованных отходов на захоронение.

Заключение. Установлена перспективность технического решения по размещению радиоактивных отходов АЭС в контейнерах из термопласткомпозитного материала. Исследована радиационная стойкость термопласткомпозитного материала из песка и отходов полиэтилена. Установлено, что при дозах до 800 КГр от гамма-источника Co-60 прочность материала на изгиб и сжатие не ниже, чем у необлученного. В части радиационной стойкости материал пригоден для применения в устройствах хранения и захоронения отходов. Технология получения термопласткомпозитных материалов к настоящему времени изучена и отработана в Беларуси.

## УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СИЛУМИНА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Алсараева К.В.<sup>1</sup>, Громов В.Е.<sup>1</sup>, Коновалов С.В.<sup>1</sup>, Иванов Ю.Ф.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,*  
[gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия,*  
[yufi55@mail.ru](mailto:yufi55@mail.ru)

<sup>3</sup>*Научно-исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

**Введение.** В настоящее время в различных отраслях промышленности все большую популярность набирают алюминиевые сплавы, наиболее распространенным из которых является сплав алюминия с кремнием – силумин. Это связано с его относительно низкой стоимостью и относительно низким удельным весом. Однако у силуминов есть свой недостаток – сравнительно низкие прочностные свойства, что существенно сужает сферу их применения. Силумины практически не упрочняются термической обработкой, из-за малого различия по растворимости кремния при высокой и низкой температуре, поэтому важнейшим методом улучшения их механических свойств является модифицирование [1]. Эффективным методом указанной модификации является обработка поверхности материала высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, позволяющая модифицировать структуру поверхностного слоя толщиной до десятков микрон, переводя его в мультимодальное структурно-фазовое состояние и практически не изменяя структурно-фазовое состояние основного объема сплава [2]. Как показано в работах [3-5], формирование таких структурно-фазовых состояний поверхности способствует повышению усталостной долговечности сталей различных структурных классов в 2-3,5 раза.

Целью данной работы является исследование структурно-фазовых состояний, формирующихся в поверхностном слое силумина, подвергнутого облучению электронным пучком и многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения.

**Материал и методы исследования.** В качестве материала исследования был использован сплав Al–Si (силумин) в литом состоянии. Импульсное плавление поверхностного слоя силумина осуществляли высокоинтенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [2] по режимам: энергия электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов (10–25) Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульсов воздействия 50 и 150 мкс, количество импульсов воздействия 1, 3, 5; частота следования импульсов 0,3 с<sup>-1</sup>; облучение проводили в аргоне при остаточном давлении 0,02 Па.

Усталостные испытания, как и в [3-5], проводили на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами 8x14x145 мм. Имитация трещины осуществлялась надрезом в виде полуокружности радиусом 10 мм. Температура испытаний 300 К, частота нагружения образцов изгибом 15 Гц, нагрузка 10 МПа. На каждый режим облучения испытывали не менее 5 образцов.

Исследования структуры и фазового состава сплава осуществляли методами оптической (травленный шлиф) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

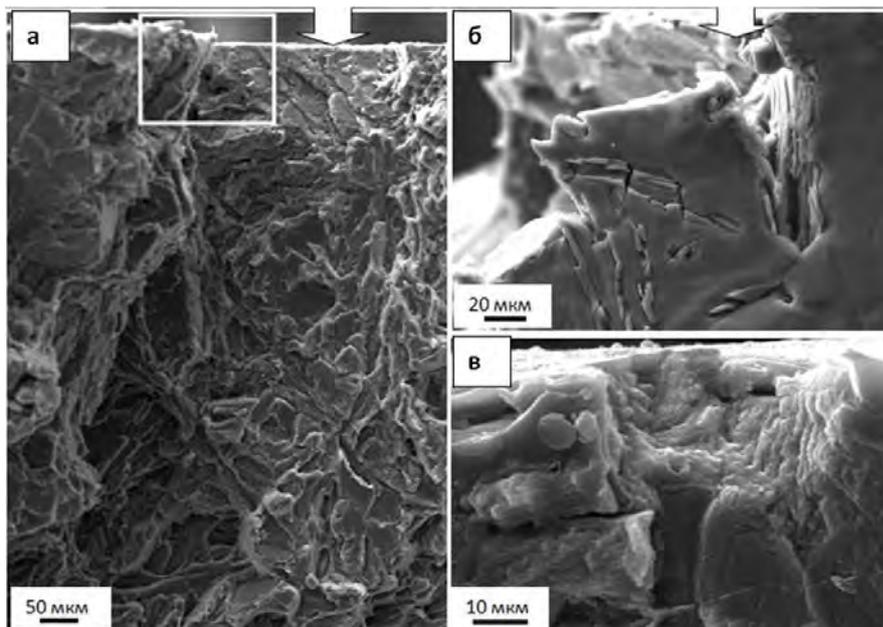
**Результаты и их обсуждение.** Структура силумина перед облучением электронным пучком (структура исходного состояния) характеризуется наличием сравнительно крупных (от десятых долей до десятков микрометра) включений кремния преимущественно пластинчатой морфологии.

В результате усталостных испытаний образцов силумина получена зависимость количества циклов до разрушения от режима облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, которая носит немонотонный характер. Наибольшее увеличение усталостной долговечности (~3,5 раза) при исходном числе циклов до разрушения –  $N = 1,3 \cdot 10^5$  обеспечивал режим облучения № 4 с параметрами 20 Дж/см<sup>2</sup>, 150 мкс., 5 имп. Очевидно, что усталостная долговечность силумина определяется в первую очередь структурой модифицированного при электронно-пучковой обработке поверхностного слоя. Для структурных исследований поверхности облучения силумина были выбраны образцы, показавшие минимальную (при режиме №2 с параметрами 15 Дж/см<sup>2</sup>, 150 мкс., 3 имп.) и максимальную (при режиме №4) усталостную долговечность.

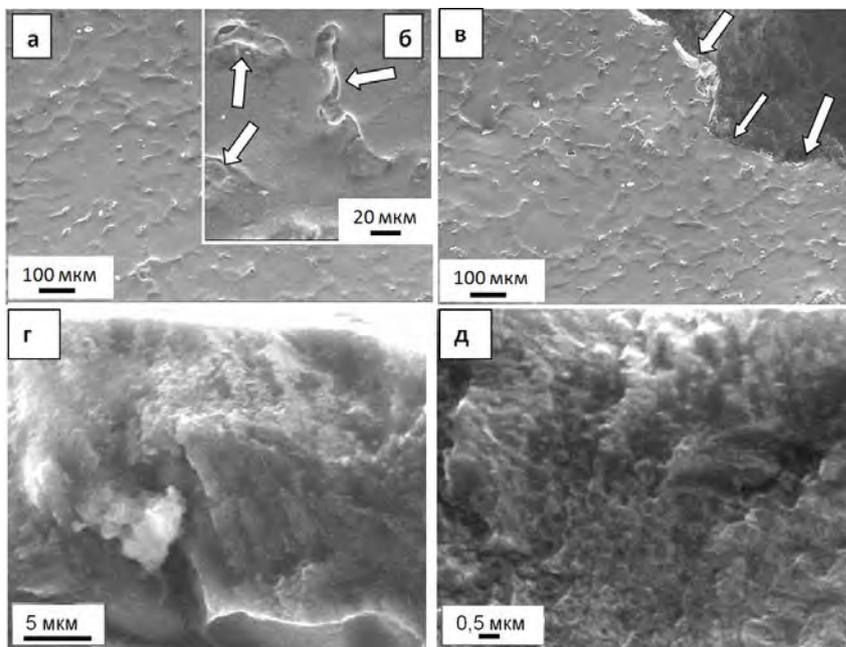
Облучение поверхности силумина по режиму №2 приводит лишь к частичному оплавлению включений избыточного кремния. При этом в поверхностном слое формируются многочисленные микропоры, расположенные вдоль границы раздела пластина/матрица, и микротрещины, расположенные в пластинах кремния, ослабляющих материал. На изображении поверхности усталостного разрушения образца силумина (рис. 1) отчетливо видно, что усталостная трещина образуется на поверхности образца (рис. 1, а). Причиной формирования усталостной трещины являются грубые включения кремния (рис. 1, б), которые являются концентраторами напряжений. В результате усталостные испытания приводят к разрушению пластин и формированию протяженных микротрещин. При облучении силумина высокоинтенсивным электронным пучком по режиму №4 на поверхности облучения формируется однородная структура зеренного типа (рис. 2, а-в), а толщина расплавленного слоя изменяется в пределах до 20 мкм (рис. 2, г).

Формирующаяся в результате высокоскоростной кристаллизации мультимодальная структура на макроуровне представлена зернами на основе алюминия, размеры которых изменяются от 30 до 50 мкм. На границах зерен расположены частицы кремния, поперечные размеры которых не превышают 20 мкм (рис. 2, б). Мезоуровень модифицированного слоя составляют двухфазные (кремний и твердый раствор на основе алюминия) ячейки кристаллизации, выявляемые на поверхности усталостного излома. Размеры ячеек кристаллизации изменяются в пределах от 100 нм до 250 нм (рис. 2, д), что отражает субмикроструктурное строение приповерхностного слоя. Важно, что концентраторы напряжений, способные являться источниками разрушения образцов силумина при данном режиме облучения, на кромке излома не обнаруживаются. Таким образом, формирование

субмикро- и наноразмерной многофазной структуры при облучении силумина по режиму №4 и является определяющей причиной, способствующей многократному увеличению его усталостной долговечности.



**Рис. 1.** Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности разрушения (*а, в*) и поверхности облучения (*б*) силумина, обработанного электронным пучком по режиму № 2. На (*а*) рамкой выделена область образования усталостной трещины; стрелками обозначено: на (*а*) – поверхность облучения, на (*б*) – место образования усталостной трещины



**Рис. 2.** Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности облучения (*а-в*) и поверхности разрушения (*г, д*) силумина, обработанного электронным пучком по режиму № 4. Стрелками на (*б*) указаны частицы кремния; на (*в*) – кромка усталостного излома образца

**Заключение.** Выполнены многоцикловые усталостные испытания до разрушения образцов силумина, подвергнутых электронно-пучковой обработке. Выявлен режим облучения, который способствует многократному (более чем в 3,5 раза) увеличению усталостного ресурса силумина. Установлено, что главной причиной многократного увеличения усталостной долговечности силумина, обработанного импульсным электронным пучком, является формирование в модифицированном приповерхностном слое наноразмерной многофазной структуры.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К.*

### Список литературы

1. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: Издательский Дом МИСиС. 2005. 376 с.
2. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: «Белорусская наука», 2013. 287 с.
3. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Gorbunov S.V., Vorobyov S.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. Multicyclic fatigue of stainless steel treated by a high-intensity electron beam: surface layer structure // Rus. Phys. J. 2011. V 54. No 5. P. 575-583.
4. Sizov V.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Fatigue failure of stainless steel after electron-beam treatment // Steel in Translation. 2012. V 42. No 6. P. 486-488.
5. Grishunin V.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Konovalov S.V. Evolution of the phase composition and defect substructure of rail steel subjected to high-intensity electron-beam treatment // J. of Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. V 7. No 5. P. 990-995.

### СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ГРАДИЕНТЫ, ФОРМИРУЮЩИЕСЯ В РЕЛЬСАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Громов В.Е.<sup>1</sup>, Морозов К.В.<sup>2</sup>, Иванов Ю.Ф.<sup>3,4</sup>, Перегудов О.А.<sup>1</sup>, Алсараева К.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,  
[gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)*

<sup>2</sup>*ОАО «Евраз – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»,  
Новокузнецк, Россия, [morozov\\_kv75@mail.ru](mailto:morozov_kv75@mail.ru)*

<sup>3</sup>*Научно-исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,*

<sup>4</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия,  
[yufi55@mail.ru](mailto:yufi55@mail.ru)*

**Введение.** В последние годы в отечественной и зарубежной литературе традиционно подробно освещаются вопросы, связанные с износом рельсов при эксплуатации. Вопросы износа и поверхностной прочности являются предметом самого тщательного рассмотрения с точки зрения, как научных исследований, так и опытно конструкторских и технологических разработок. Их роль особенно возрастает для современных высоконагруженных ответственных изделий, подвергающихся воздействию циклических нагрузок.

Увеличение интенсивности движения и грузонапряженности вызывает необходимость дальнейшего повышения надежности и эксплуатационной стойкости рельсов и обу-