

УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

© 2016 г. Ю.Ф. Иванов, К.В. Аксёнова, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Е.А. Петрикова

Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ)

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), Новокузнецк

Статья поступила в редакцию 10.07.14 г., доработана и подписана в печать 18.11.14 г.

Осуществлена обработка силумина эвтектического состава высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и выявлено кратное увеличение усталостной долговечности материала. Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры модифицированного слоя и поверхности разрушения силумина, подвергнутого усталостным многоцикловым испытаниям до разрушения. Установлены и проанализированы факторы, ответственные за увеличение его усталостной долговечности.

Ключевые слова: высокоинтенсивный импульсный электронный пучок, силумин, структура, усталостная долговечность.

Иванов Ю.Ф. — докт. физ.-мат. наук, профессор НИ ТГУ (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36), гл. науч. сотрудник ИСЭ СО РАН (634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3). E-mail: yufi55@mail.ru.

Аксёнова К.В. — аспирант кафедры физики СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). E-mail: alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru.

Громов В.Е. — докт. физ.-мат. наук, профессор, заведующий той же кафедрой СибГИУ. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

Коновалов С.В. — докт. техн. наук, доцент, профессор той же кафедры СибГИУ. E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru.

Петрикова Е.А. — аспирант ИСЭ СО РАН. E-mail: elizmarkova@yahoo.com.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Аксёнова К.В., Громов В.Е., Коновалов С.В., Петрикова Е.А. Увеличение усталостной долговечности эвтектического силумина электронно-пучковой обработкой // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 72–80. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-72-80.

Ivanov Yu.F., Aksenova K.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Petrikova E.A.
The increase in eutectic silumin fatigue life caused by electron beam processing

Eutectic silumin was processed with a high-intensity pulsed electron beam, and a multi-fold increase in the material fatigue life was discovered. Scanning electron microscopy was used to study the modified layer structure and the fracture surface of silumin subjected to high-cycle fatigue breakdown tests. The factors responsible for the increase in fatigue life of silumin were identified and analyzed.

Keywords: high-intensity pulsed electron beam, silumin, structure, fatigue life.

Ivanov Yu.F. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the National Research Tomsk State University (634050, Russia, Tomsk, Lenina str., 36), Researcher of the Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (SB RAS) (634055, Russia, Tomsk, av. Akademicheskii, 2/3). E-mail: yufi55@mail.ru

Aksenova K.V. — Graduate Student, Department of physics, Siberian State Industrial University (SibSIU) (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirov str., 42). E-mail: alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru.

Gromov V.E. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the same Department of SibSIU. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

Konovalov S.V. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the same Department of SibSIU. E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru.

Petrikova E.A. — Graduate Student, Institute of High-Current Electronics of the SB RAS. E-mail: elizmarkova@yahoo.com.

Citation: Ivanov Yu.F., Aksenova K.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Petrikova E.A. Uvelichenie ustalostnoi dolgovechnosti evtekticheskogo silumina elektronno-puchkovoi obrabotkoi. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 2. P. 72–80. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-72-80.

Введение

Усталостное разрушение деталей является одной из наиболее часто (70–80 %) встречающихся причин выхода из строя оборудования, механизмов, машин и сооружений [1]. Усталостные трещи-

ны, как правило, зарождаются в поверхностном слое детали, а следовательно, его состояние оказывает существенное влияние на усталостную долговечность материала [2, 3].

Кардинальное повышение ресурсных свойств поверхностных слоев материала возможно при условии целенаправленного формирования в них дополнительных уровней структурно-фазового состояния в субмикро- и наноразмерной областях их существования. Эффективным методом указанной модификации и, как следствие, повышения усталостного ресурса [4–7] является обработка поверхности материала высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия, позволяющая изменять структуру поверхностного слоя толщиной в десятки микрометров, переводя его в мультимодальное структурно-фазовое состояние и практически не изменяя структурно-фазовое состояние основного объема сплава [8, 9].

Целью настоящей работы являются анализ закономерностей модификации структуры эвтектического силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и выявление механизмов, ответственных за разрушение силумина, подвергнутого многоцикловым усталостным испытаниям.

Материал и методика исследования

В качестве объекта исследований был использован силумин АК12 [3]. Усталостные испытания проводили на специальной установке по схеме циклического несимметричного консольного изгиба [10]. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами сторон $8 \times 14 \times 145$ мм. Имитация трещины осуществлялась надрезом в виде полукруглости радиусом 10 мм. Температура испытаний составляла 300 К, частота нагружения образцов изгибом — 15 Гц при нагрузке 10 МПа.

Облучение поверхности образцов, приготовленных к усталостным испытаниям, осуществлялось на установке «СОЛЮ» [8] при следующих параметрах: энергия электронов 16 кэВ; частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$; длительность импульса пучка электронов 50 и 150 мкс; плотность энергии пучка электронов $10\text{--}25 \text{ Дж/см}^2$; количество импульсов воздействия 1, 3 и 5. Облучалась лицевая поверхность образцов, т.е. находящаяся над надрезом, имитирующим трещину.

На каждом режиме облучения испытывалось не менее 5 образцов. Исследования поверхности разрушения осуществлялись методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Tesla BS-301).

Результаты исследования и их обсуждение

Характерной особенностью силумина эвтектического состава является наличие большого количества кристаллитов кремния преимущественно пластинчатой формы (рис. 1). Пластины располагаются хаотически либо декорируют границы зерен сплава.

Размеры пластин исследуемого в настоящей работе силумина в плоскости шлифа изменяются в пределах от единиц до десятков микрометров. Очевидно, что материал, содержащий такое количество хрупких включений разнообразных форм и размеров, будет обладать большим разбросом характеристик усталостной долговечности.

Действительно, выполненные нами испытания на усталостную долговечность выявили весьма широкий набор результатов, существенным образом зависящих как от структуры образца, так и от режима его облучения (см. таблицу и рис. 2).

Для структурных исследований поверхности обработки и поверхности разрушения силумина

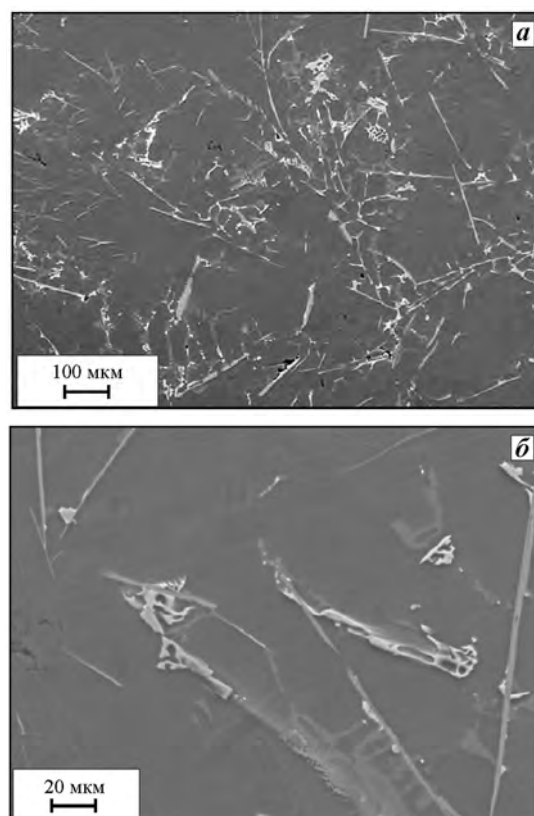


Рис. 1. Структура силумина перед усталостными испытаниями. Металлография травленого шлифа

были выбраны образцы, показавшие минимальную (при режимах облучения *I* и *II*) и максимальную (при режиме *III*) усталостную долговечность.

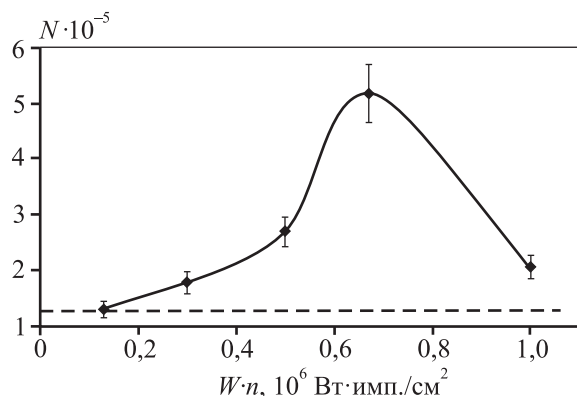


Рис. 2. Зависимость среднего количества циклов до разрушения (N) от произведения плотности мощности (W) на количество импульсов воздействия пучка электронов (n)

Штриховой линией указаны значения усталостной долговечности исходного материала

Как отмечалось выше, усталостная долговечность материала существенным образом зависит от структуры его поверхностного слоя. На рис. 3 представлены результаты исследования образца силумина, подвергнутого облучению электронным пучком по режиму *I* и показавшего при усталостных испытаниях минимальную долговечность. Анализ структуры, формирующейся при облучении силумина по данному режиму, дает основание заключить, что электронно-пучковая обработка приводит лишь к частичному плавлению пластин избыточного кремния (см. рис. 3, *a*). Процесс их оплавления сопровождается формиро-

Режимы облучения поверхности исследуемого образца силумина

Режим	$E, \text{ Дж}/\text{см}^2$	$\tau, \text{ мкс}$	$n, \text{ имп.}$
<i>I</i>	15	150	3
<i>II</i>	20	150	1
<i>III</i>	20	150	5

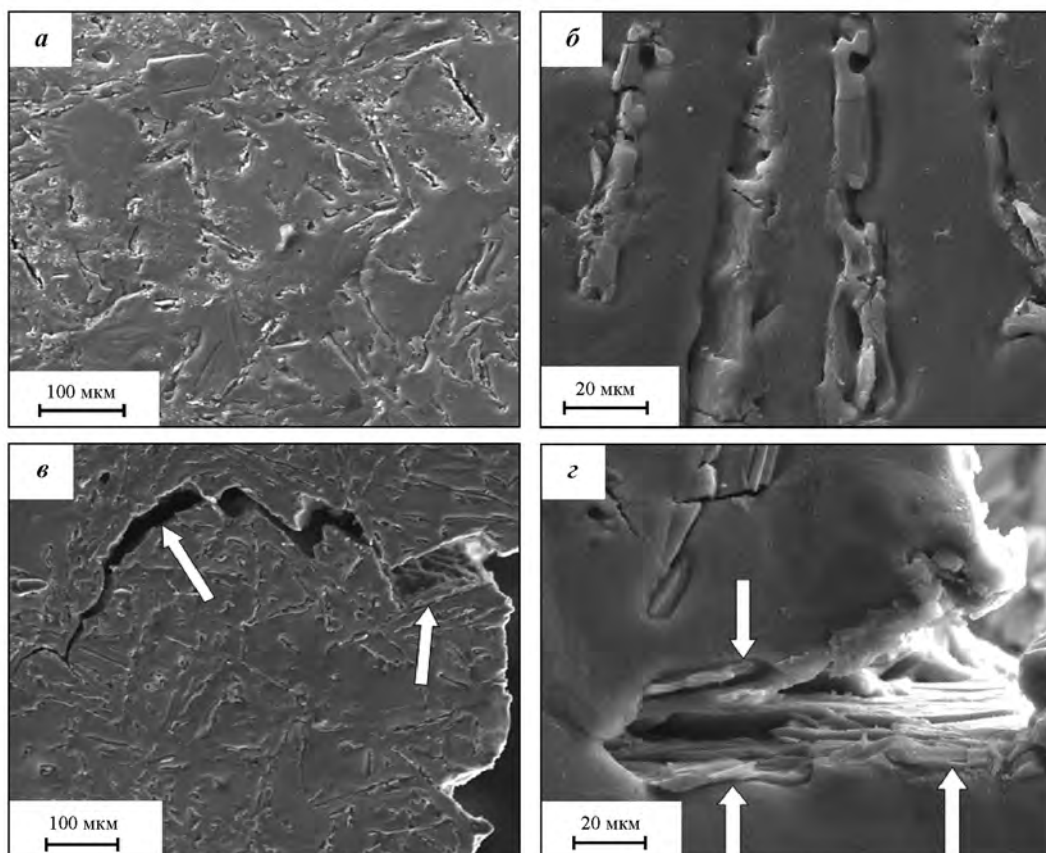


Рис. 3. Структура поверхности силумина, обработанного электронным пучком по режиму *I* ($15 \text{ Дж}/\text{см}^2, 150 \text{ мкс}, 3 \text{ имп.}$)

a, б — исходное состояние; *в, г* — состояние после усталостных испытаний
Стрелками на рис. *в* показана трещина, сформировавшаяся при испытаниях, а на рис. *г* — пластины кремния, разрушенные в ходе испытаний

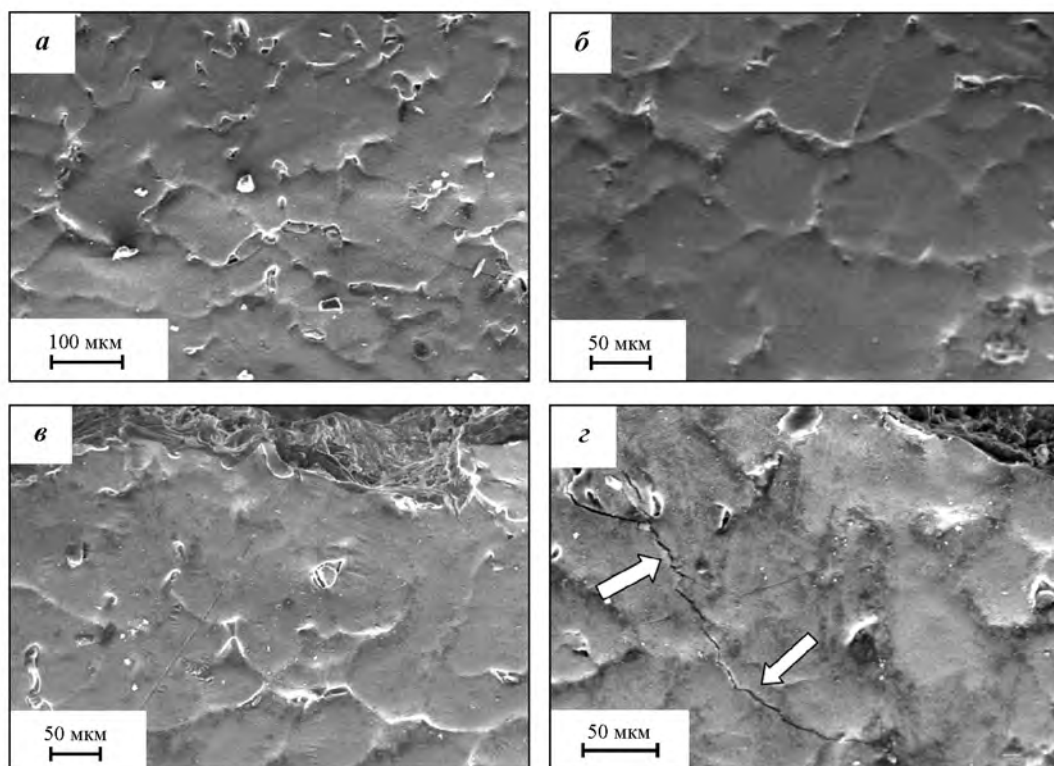


Рис. 4. Структура поверхности силумина, обработанного электронным пучком по режиму III (20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп.)

a, б – исходное состояние; *в, г* – состояние после усталостных испытаний
Стрелками указана микротрещина, сформировавшаяся в ходе испытаний

ванием многочисленных микропор вдоль границы раздела пластина/матрица и микротрещин, расположенных в пластинах (см. рис. 3, б). Пластины кремния являются концентраторами напряжений. Усталостные испытания приводят к их разрушению и появлению протяженных микротрещин (см. рис. 3, в, г).

Таким образом, облучение поверхности силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в режиме оплавления включений избыточного кремния сопровождается формированием в поверхностном слое микропор и микротрещин, ослабляющих материал. Последнее является определяющим фактором, способствующим незначительному повышению (см. рис. 2) усталостной долговечности материала.

Характерные изображения структуры, формирующейся при облучении силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком по режиму III (20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп.), показавшего при испытаниях максимальную усталостную долговечность, представлены на рис. 4, а, б. Отчетливо видно, что по морфологическому признаку она кардинально отличается от структуры исход-

ного образца и обработанного по режиму I (см. рис. 1 и 3).

На поверхности облучения формируется однородная структура зеренного (ячеистого) типа (размер зерен эвтектики изменяется в пределах 30–50 мкм). Зерна разделены прослойками кремния, поперечные размеры которых не превышают 20 мкм (см. рис. 4, б). Концентраторы напряжений, способные являться источниками разрушения образца, на кромке излома не обнаруживаются (см. рис. 4, в). Трещины, параллельные поверхности разрушения, располагаются на некотором удалении от нее (см. рис. 4, г). Это, очевидно, указывает на то, что концентратор, явившийся причиной разрушения образца, находился под поверхностью, по всей видимости — на границе раздела жидкой и твердой фаз.

Таким образом, анализ поверхности эвтектического силумина, облученного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, показал, что высокоскоростное плавление и последующая кристаллизация поверхностного слоя с образованием структуры ячеистого типа с распределенными по границам ячеек прослойками избыточного

кремния, позволяют повысить усталостную долговечность этого сплава в среднем более чем в 3,5 раза по отношению к исходному состоянию (см. рис. 2).

Как правило, усталостное разрушение является процессом, развивающимся во времени в локальных объемах материала. При достижении определенного критического состояния наступает разрушение образца в целом. На поверхности разрушения выявляются три характерные области: зона усталостного роста трещины, зона долома и разделяющая их зона ускоренного роста трещины [11, 12]. Деформационные процессы, имеющие место при усталостных испытаниях материала, в полной мере развиваются в зоне усталостного роста трещины и в существенно меньшей степени — в зоне долома. Характерное изображение поверхности образцов силумина, разрушенных при режимах облучения *I* и *III*, представлено на рис. 5.

Ширина зоны усталостного роста трещины в исследуемых образцах силумина коррелированным образом связана с числом циклов до разрушения, т.е. зависит от условий облучения материала электронным пучком. Выполненные исследования показали, что толщина зоны усталостного роста трещины в образце, разрушенном при режиме *I*, составляет 0,96 мм, а при режиме *III* — 3,45 мм (см. рис. 5).

Ширину зоны усталостного роста трещины приравнивают к критической длине трещины [1].

Следовательно, при оптимальных условиях облучения поверхности силумина пучком электронов удается увеличить критическую длину трещины более чем в 3 раза, повышая тем самым ресурс работоспособности материала. Подобные результаты были получены при многоцикловом нагружении феррито-перлитной стали 60ГС2 после электроимпульсной обработки на определенной стадии нагружения [13, 14].

По величине отношения площади чисто усталостной зоны к площади зоны, занятой доломом, можно ориентировочно судить о значении коэффициента безопасности материала [1]: чем меньше это отношение, тем ниже данный коэффициент при одной и той же величине нагрузки усталостных испытаний. Анализ фрактограмм исследуемого материала показал, что значение этого параметра изменяется от 0,24 (в случае использования режима *I*) до 0,86 (при режиме *III*). Следовательно, облучение силумина при оптимальных условиях существенно повышает коэффициент безопасности его эксплуатации.

Как правило, трещины при усталостных испытаниях зарождаются на поверхности материала либо в его приповерхностном слое. Анализ структуры образцов силумина, показавших сравнительно низкий уровень усталостной долговечности (при режимах облучения *I* и *II*), позволил выявить источник их разрушения. Как и следовало ожидать, концентратором критических напряжений

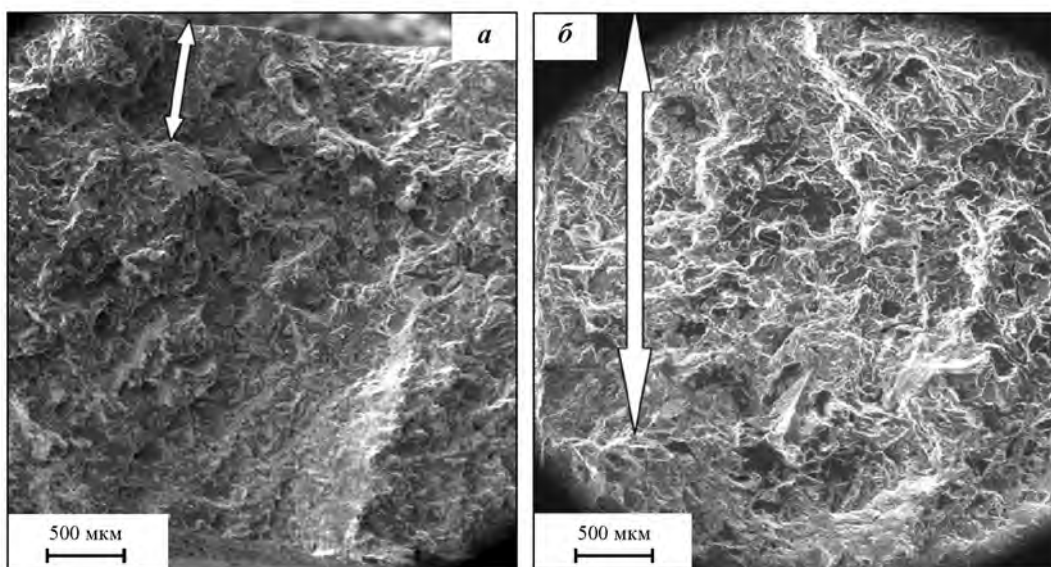


Рис. 5. Структура поверхности разрушения образцов силумина, подвергнутых облучению электронным пучком

a — режим облучения *I* (15 Дж/см², 150 мкс, 3 имп.); *б* — *III* (20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп.)
Стрелками указаны зоны усталостного роста трещины

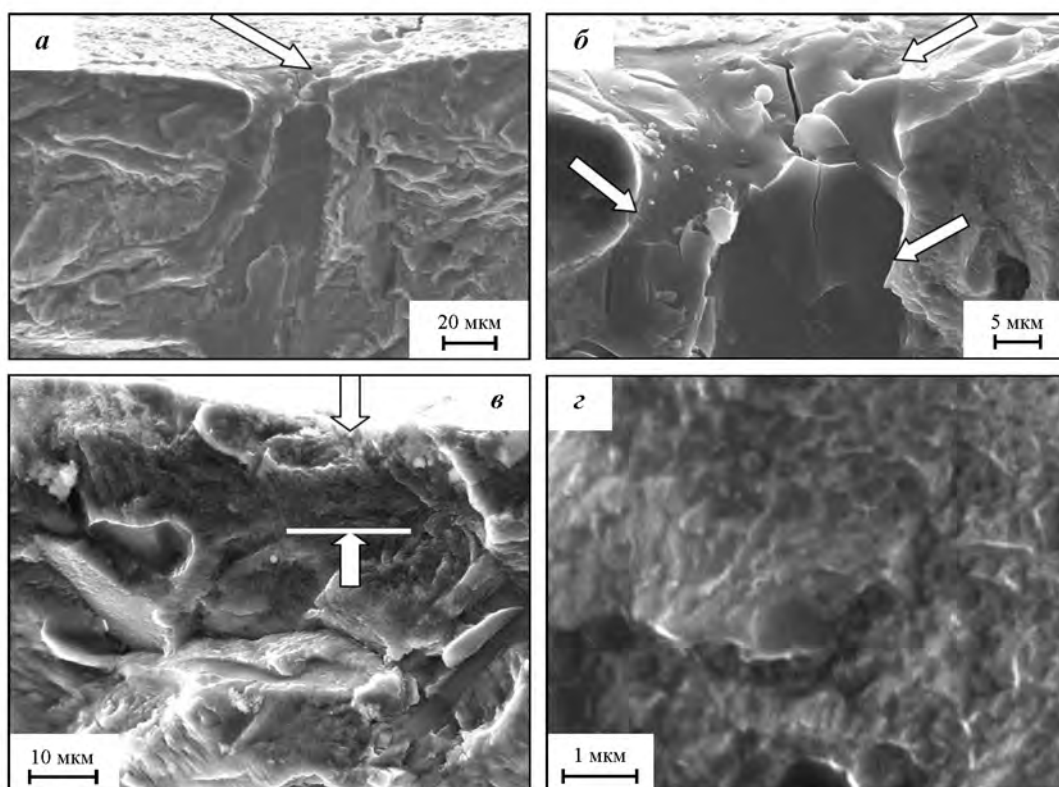


Рис. 6. Электронно-микроскопические изображения поверхности усталостного разрушения силумина при режимах облучения *II* (20 Дж/см², 150 мкс, 1 имп.) (*а, б*) и *III* (20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп.) (*в, г*)

Стрелками на рис *а, б* показаны пластины кремния, а на рис *в* – толщина расплавленного электронным пучком слоя силумина

являлись крупные пластины кремния, расположенные на поверхности (см. рис. 3, *в, г*) и в приповерхностном слое (см. рис. 6, *а, б*) образцов. При облучении поверхности силумина электронным пучком по режиму *III* плавится поверхностный слой толщиной не менее 20 мкм (см. рис. 6, *в*).

Из рис. 6, *г* видно, что размеры фасеток поверхности разрушения изменяются в пределах от 250 до 100 нм, что, по всей видимости, отражает субмикроструктурное строение поверхностного слоя материала. Очевидно, формирование подобной субмикро- и наноразмерной структуры и является основной причиной, способствующей многократному увеличению усталостной долговечности силумина.

При каждом цикле изменения нагрузки у вершины трещины имеет место значительная, но сильно локализованная пластическая деформация. Поликристаллический характер структуры (зерненное строение твердого раствора на основе алюминия и большое количество сравнительно крупных пластин первичного кремния) приводит

к многократному ветвлению фронта разрушения материала. Образуется большое число микроскопически видимых параллельно расположенных следов разрушения, что особенно характерно для образца с максимальным числом циклов до разрушения (см. рис. 5, *б*).

К важным признакам усталостной зоны разрушения материала относятся так называемые усталостные бороздки [1, 2, 11, 12] (рис. 7), под которыми понимают полосы последовательно расположенных углублений и выступов или полосы со ступеньками сброса, ограниченные этими углублениями, располагающиеся параллельно фронту трещины. С каждым циклом нагружения трещина (излом) продвигается вперед на определенное расстояние. При этом на поверхности разрушения остается последовательный ряд полосок, т.е. они являются следом перемещающейся в общем случае на один шаг за каждый цикл нагружения трещины. По предложению авторов [15] данные полоски и названы «усталостными бороздками» [15]. Они перпендикулярны или почти перпенди-

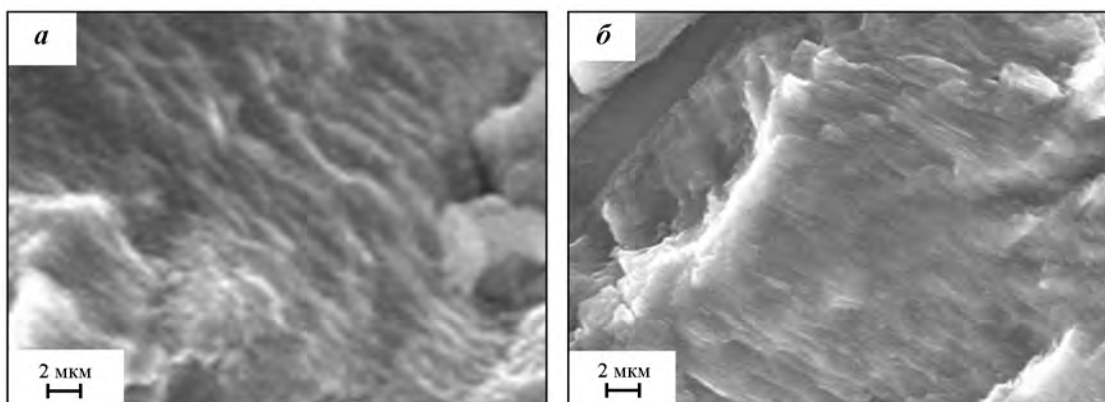


Рис. 7. Усталостные бороздки, формирующиеся в силумине в результате усталостного разрушения *а* – образец, разрушенный при режиме облучения *II*; *б* – при режиме *III*

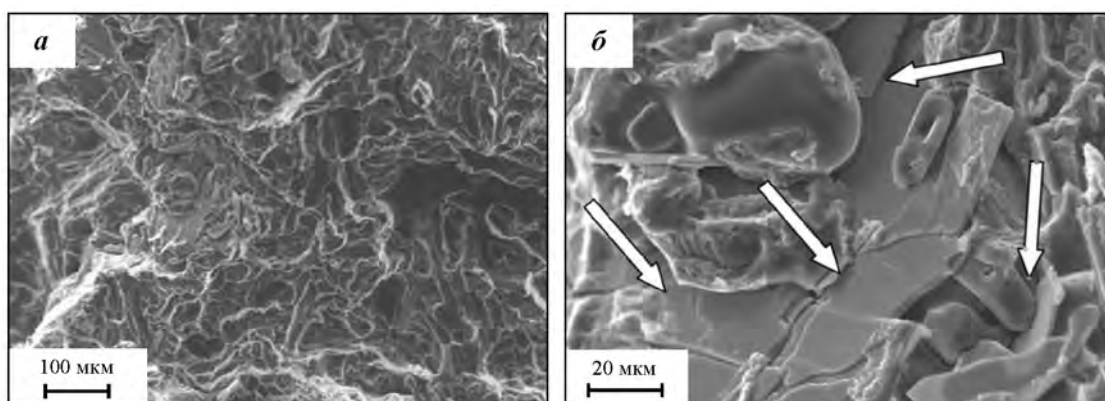


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение поверхности усталостного разрушения силумина при режиме облучения *II*
Стрелками показаны пластины кремния

кулярны к направлению распространения трещины. Бороздки могут быть непрерывными и правильными (характерны для сплавов алюминия) с уменьшающимся расстоянием между ними по мере уменьшения уровня напряжений и скорости распространения трещины. Они также могут быть прерывистыми и неправильными, что характерно для поверхности разрушения сталей.

При прочих равных условиях, связанных с организацией эксперимента усталостного нагружения, расстояние между бороздками будет определяться способностью материала сопротивляться распространению усталостной трещины: чем меньше расстояние между ними, тем большая сопротивляемость. Проведенные нами исследования показали, что среднее расстояние между усталостными бороздками в образцах силумина, разрушенных при режимах облучения *I* и *II*, близки и в среднем равны 0,95 мкм, а в образце, разрушенном при режиме *III*, — 0,28 мкм, что в 3,5 раза меньше, следо-

вательно, данный образец обладает более высокой сопротивляемостью распространению усталостной трещины.

Поверхность разрушения, как правило, имеет сложное строение. В двухфазных материалах, к которым относится анализируемый в настоящей работе сплав, обычно реализуется смешанный механизм усталостного разрушения. На рис. 8 наблюдаются ямки вязкого разрушения и фасетки квазискола. Ямки являются преобладающим элементом структуры поверхности разрушения и образуются в результате срезания микропор, через которые прошло разрушение зерен алюминия (рис. 8, *а*). Пластины кремния разрушаются по механизму скола (рис. 8, *б*).

Заключение

Осуществлено модифицирование поверхности эвтектического силумина высокоинтенсивным

импульсным электронным пучком, проведены многоцикловые усталостные испытания и выявлен режим облучения, позволивший повысить усталостную долговечность материала более чем в 3,5 раза. Показано, что ее повышению способствуют значительное увеличение критической длины трещины, повышение коэффициента безопасности, снижение среднего расстояния между усталостными бороздками (трещины за цикл нагружения), формирование субмикро- и наноразмерной структуры.

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

Литература

1. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 1976.
2. Фрактография и атлас фрактограмм / Под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия, 1982.
3. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977.
4. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Гришунин В.А., Тересов А.Д., Коновалов С.В. Структура поверхностного слоя и усталостная долговечность рельсовой стали, облученной высокоинтенсивным электронным пучком // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. No. 2. С. 47—53.
5. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А., Райков С.В., Коновалов С.В. Масштабные уровни структурно-фазовых состояний и усталостная долговечность рельсовой стали после электронно-пучковой обработки // Успехи физики металлов. 2013. Т. 14. No. 1. С. 67—80.
6. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Increase in the fatigue durability of stainless steel by electron-beam surface treatment // J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7. No. 1. P. 94—99.
7. Konovalov S.V., Atroshkina A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Evolution of dislocation substructures in fatigue loaded and failed stainless steel with the intermediate electropulsing treatment // Mater. Sci. Eng. A. 2010. Vol. 527. No. 12. P. 3040—3043.
8. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н., Бирик Н.В., Асташинский В.М. Модификация структуры и свойств эвтектического

силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: Белорусская наука, 2013.

9. Иванов Ю.Ф., Кобзарева Т.Ю., Райков С.В., Будовских Е.А. Модификация поверхности сплава ВТ6 плазмой электрического взрыва проводящего материала и облучением электронным пучком // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2013. No. 6. С. 45—49.
10. Соснин О.В., Громов В.Е., Козлов Э.В., Иванов Ю.Ф. Усталость сталей при импульсном токовом воздействии. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004.
11. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия, 1988.
12. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002.
13. Иванов Ю.Ф., Соснин О.В., Целлермаер В.В., Громов В.Е., Козлов Э.В. Поверхность разрушения стали 60Г2С, подвергнутой усталостным испытаниям в условиях промежуточного электростимулирования // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. No. 3. С. 91—97.
14. Соснин О.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Козлов Э.В., Целлермаер В.В. Эволюция структуры стали 60Г2С при циклических усталостных испытаниях в условиях токового воздействия // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2003. No. 12. С. 27—30.
15. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1986.

References

1. Kocan'da S. Ustalostnoe razrushenie metallov [Fatigue failure of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1976.
2. Fellouz J. (Ed.) Fraktografija i atlas fraktogramm [Fractography and satin fraktogramm]. Moscow: Metallurgiya, 1982.
3. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. Splavy aljuminija s kremniem [Alloys of aluminum and silicon]. Moscow: Metallurgiya, 1977.
4. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Grishunin V.A., Teresov A.D., Konovalov S.V. Struktura poverhnostnogo sloja i ustalostnaja dolgovechnost' rel'sovoj stali, obluchennoj vysokointensivnym jelektronnym puchkom [The structure of the surface layer and the fatigue life of the rail steel, a high-intensity electron beam irradiated]. *Fizicheskaja mezomehanika*. 2013. Vol. 16. No. 2. P. 47—53.
5. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Grishunin V.A., Rajkov S.V., Konovalov S.V. Masshtabnye urovni strukturno-fazovyh sostojanij i ustalostnaja dolgovechnost' rel'sovoj stali posle jelektronno-puchkovej obrabotki [Scale levels of structural-phase states and the fatigue life of rail steel

- after electron-beam processing]. *Uspehi fiziki metallov*. 2013. Vol. 14. No. 1. P. 67—80.
6. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Increase in the fatigue durability of stainless steel by electron-beam surface treatment. *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013. Vol. 7. No. 1. P. 94—99.
 7. Konovalov S.V., Atroshkina A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Evolution of dislocation substructures in fatigue loaded and failed stainless steel with the intermediate electropulsing treatment. *Mater. Sci. Eng. A*. 2010. Vol. 527. No. 12. P. 3040—3043.
 8. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Koval' N.N., Uglov V.V., Cherenda N.N., Bibik N.V., Astashinskij V.M. Modifikacija struktury i svojstv jevtekticheskogo silumina jelektronno-ionno-plazmennoj obrabotkoj [Modification of the structure and properties of the eutectic silumin electron-ion-plasma treated]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2013.
 9. Ivanov Yu.F., Kobzareva T.Yu., Rajkov S.V., Budovskih E.A. Modifikacija poverhnosti splava VT6 plazmoj jelektricheskogo vzryva provodjashhego materiala i oblučenijem jelektronnym puchkom [Modification of the surface of the alloy VT6 plasma electric explosion of a conductive material and the electron beam irradiation]. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgija*. 2013. No. 6. P. 45—49.
 10. Sosnin O.V., Gromov V.E., Kozlov Ye.V., Ivanov Yu.F. Uсталost' stalej pri impul'snom tokovom vozdejstvii [Fatigue steels under pulsed tone exposure]. Novokuznetsk: SibGIU, 2004.
 11. Ivanova V.S., Shanjavskij A.A. Kolichestvennaja frakto-grafija. Uсталostnoe razrushenie [Quantitative fractography. fatigue failure]. Cheljabinsk: Metallurgiya, 1988.
 12. Terent'ev V.F. Uсталost' metallicheskih materialov [Fatigue of metallic materials]. Moscow: Nauka, 2002.
 13. Ivanov Yu.F., Sosnin O.V., Cellermaer V.V., Gromov V.E., Kozlov Ye.V. Poverhnost' razrushenija stali 60G2S, podvergnutoj ustalostnym ispytaniyam v uslovijah promezhutochnogo jelektrostimulirovanija [The fracture surface of steel 60G2S subjected to fatigue testing under conditions of intermediate electrostimulation]. *Fizicheskaja mezomehanika*. 2003. Vol. 6. No. 3. P. 91—97.
 14. Sosnin O.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kozlov Ye.V., Cellermaer V.V. Jevoljucija struktury stali 60GS2 pri ciklicheskih ustalostnyh ispytaniyah v uslovijah tokovogo vozdejstvija [Evolution of steel 60GS2 cyclic fatigue tests under the impact of the current]. *Izv. vuzov. Cher. metallurgija*. 2003. No. 12. P. 27—30.
 15. Engele L., Klingele G. Rastrovaja jelektronnaja mikro-skopija. Razrushenie [Scanning electron microscopy. destruction]. Moscow: Metallurgija, 1986.