

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СИЛУМИНА ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

Алсараева Кристина Владимировна

Руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Громов Виктор Евгеньевич
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк

alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru

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. Выявлены и проанализированы факторы, ответственные за увеличение его усталостной долговечности.

Одной из наиболее часто встречающихся причин выхода из строя оборудования, механизмов, машин и сооружений является усталостное разрушение деталей. Поэтому проблема предотвращения усталостных разрушений ответственных деталей и, соответственно, увеличения срока их службы является достаточно актуальной. Существенное влияние на усталостную долговечность материалов, в том числе и силумина, оказывает состояние поверхностного слоя, так как усталостные трещины, как известно, зарождаются именно в поверхностном слое детали [1].

Применение методов поверхностного упрочнения приводит в ряде случаев к значительному повышению пределов выносливости (в 2–3 раза и более), что связано с удалением микронеровностей от механической обработки, формированием в поверхностном слое упрочненной детали сжимающих остаточных напряжений, диспергированием структуры матрицы и включений вторых фаз [2]. Эффективным методом указанной модификации и, как следствие, повышения усталостного ресурса [3, 4], является обработка поверхности материала высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия, позволяющая изменять структуру поверхностного слоя толщиной в десятки микрометров.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры поверхностного слоя силумина АК12, модифицированного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия и подвергнутого последующим многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения.

Усталостные испытания, как и в [3, 4], проводили на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба. При испытаниях определялось число циклов до полного разрушения образцов с

размерами $8 \times 15 \times 145 \text{ мм}^3$ и концентратором напряжений в виде полукруглого выреза радиусом 10 мм. Образцы облучались высокоинтенсивным электронным пучком на установке «СОЛЮ» при следующих фиксированных параметрах: энергия электронов 16 кэВ; длительность импульса воздействия пучка электронов 50, 150, мкс; количество импульсов воздействия 1, 3, 5; частота следования импульсов 0,3 Гц; плотность энергии пучка электронов $10\text{--}25 \text{ Дж/см}^2$.

Проведенные усталостные испытания образцов силумина показали, что зависимость количества циклов до разрушения от режима облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком носит немонотонный характер (Рис. 1). Наибольшее увеличение усталостной долговечности ($\sim 3,5$ раза) обеспечивал режим облучения №4 с параметрами: $E_s=20 \text{ Дж/см}^2$; длительность импульса 150 мкс; число импульсов – 5.

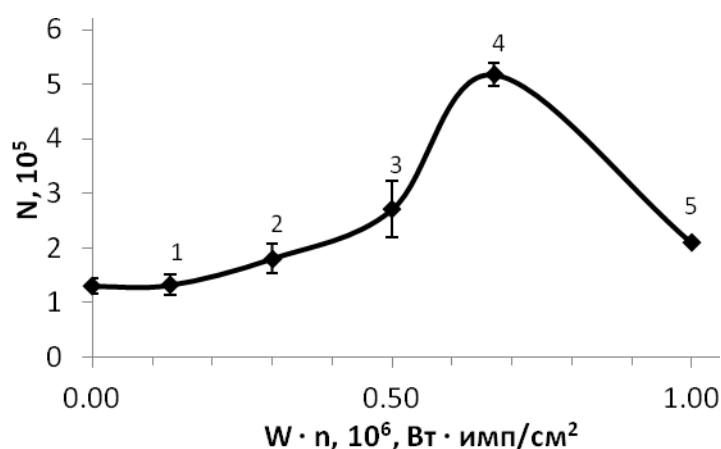


Рис. 1. Зависимость среднего числа циклов до разрушения N от произведения плотности мощности W_s на количество импульсов воздействия пучка электронов n .

Структура эвтектического силумина в исходном состоянии содержит алюмо-кремниевую эвтектику, в которой частицы кремния располагаются хаотически и имеют преимущественно пластинчатую форму с размерами от единиц до десятков микрометров. Проанализируем структуру образцов, облученных в режимах, приводящих к незначительному (режим №2: 15 Дж/см^2 ; 150 мкс; 3 имп.) и существенному (режим №4: 20 Дж/см^2 ; 150 мкс; 5 имп.) увеличению усталостной долговечности (Рис. 2).

Облучение поверхности силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (режим №2) приводит к частичному оплавлению включений избыточного кремния (Рис. 2, а) и сопровождается формированием в поверхностном слое микропор и микротрещин, ослабляющих материал. Пластины кремния являются концентраторами напряжений, и в результате усталостные испытания приводят к разрушению пластин и формированию протяженных микротрещин (Рис. 2, б).

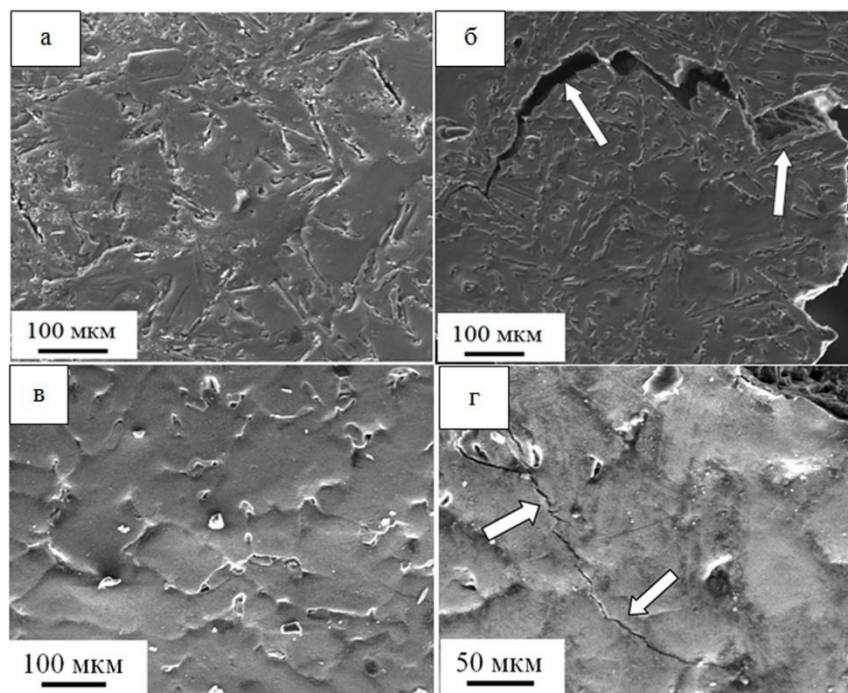


Рис. 2. Структура поверхности силумина, обработанного электронным пучком по режимам №2 (а, б) и №4 (в, г); Стрелками на (б) и (г) указана трещины, сформировавшиеся при усталостных испытаниях.

При облучении образцов силумина по режиму №4 (Рис. 2, в, г) концентраторы напряжений, способные являться источниками разрушения образца, на кромке излома не обнаруживаются. Трещины, параллельные поверхности разрушения, располагаются на некотором удалении от нее (Рис. 2, г). Это, очевидно, указывает на то, что концентратор, явившийся причиной разрушения образца, располагался под поверхностью, по всей видимости, на границе раздела жидкой и твердой фаз. Высокоскоростная кристаллизация приводит к формированию структуры, размеры кристаллитов которой изменяются в пределах от 250 нм до 100 нм. Очевидно, формирование подобной наноразмерной структуры и является определяющей причиной, способствующей многократному увеличению усталостной долговечности силумина.

На поверхности разрушения выявляются три характерные зоны — зона усталостного роста трещины, зона долома и разделяющая их зона ускоренного роста трещины [5]. Характерное изображение поверхности разрушения образцов силумина, разрушенных при режимах облучения №2 и №4, представлено на рис. 3. Ширина зоны усталостного роста трещины в исследуемых образцах силумина зависит от режима облучения материала электронным пучком. Выполненные исследования показали, что толщина зоны усталостного роста трещины в образце, разрушенном при режиме №2, составляет 0,96 мм, а в образце, разрушенном при режиме №4 — 3,45 мм. Ширину зоны усталостного роста трещины приравнивают к критической длине трещины. Следовательно, при оптимальном режиме облучения

поверхности силумина пучком электронов удается увеличить критическую длину трещины более чем в три раза, увеличивая тем самым ресурс работоспособности материала.

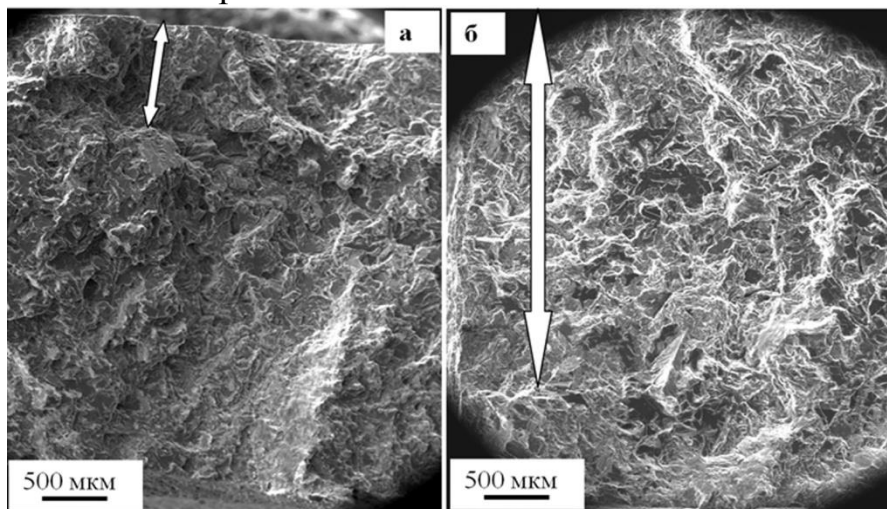


Рис. 3. Структура поверхности разрушения образцов силумина, подвергнутых облучению электронным пучком; а – режим облучения №2; б – режим облучения №4. Стрелками указана зона усталостного роста трещины.

По величине отношения площади чисто усталостной зоны к площади зоны, занятой доломом, можно ориентировочно судить о значении коэффициента безопасности данного материала [1]: чем меньше это отношение, тем ниже коэффициент безопасности при одной и той же величине нагрузки усталостных испытаний. Анализ фрактограмм исследуемого материала показал, что значение данного коэффициента изменяется от 0,24 (режим №2) до 0,86 (режим №4). Следовательно, облучение силумина при оптимальном режиме существенно повышает коэффициент безопасности эксплуатации материала.

К важным признакам усталостной зоны разрушения материала относятся усталостные бороздки [5], которые являются следом перемещающейся трещины на один шаг за каждый цикл нагружения (Рис. 4). 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 бороздками, тем большей сопротивляемостью распространению трещины обладает материал. Проведенные исследования показали, что среднее расстояние между усталостными бороздками в образце силумина, разрушенном при режиме облучения №2 в среднем равно 0,95 мкм, а в образце, разрушенном при режиме облучения №4 – 0,28 мкм. Следовательно, шаг трещины за один цикл усталостного нагружения в образце силумина, обработанном по оптимальному режиму, в 3,5 раза меньше, следовательно, данный образец

обладает более высокой сопротивляемостью распространению усталостной трещины.

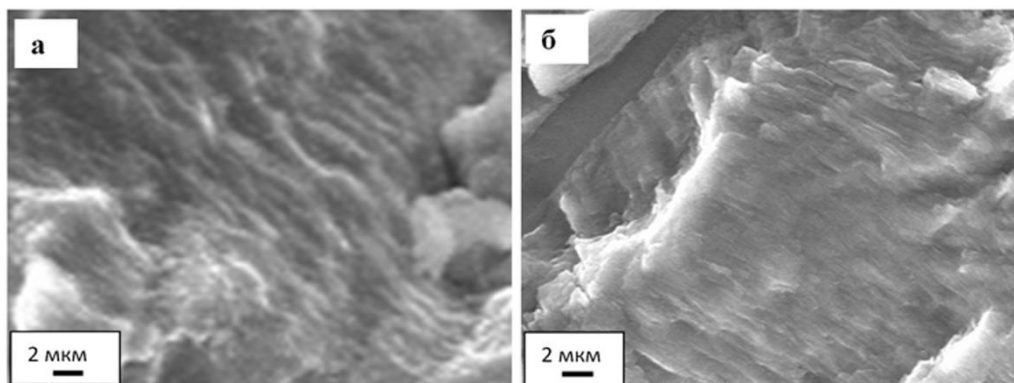


Рис. 4. Усталостные бороздки, формирующиеся в силумине в результате усталостного разрушения; а, б – образцы, разрушенные при режимах облучения №2 и №4 соответственно.

Таким образом, анализ поверхности 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, позволяет повысить усталостную долговечность эвтектического силумина в среднем более чем в 3,5 раза по отношению к исходному состоянию. Основными причинами увеличения усталостной долговечности силумина являются: формирование наноразмерной структуры, значительное увеличение критической длины трещины, коэффициента безопасности, снижение среднего расстояния между усталостными бороздками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Фрактография и атлас фрактограмм / Под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия, 1982.
2. Гиржон В.В., Танцюра И.В., Волчок И.П., Широкобокова Н.В. Влияние лазерной обработки на структуру и свойства поверхностных слоев силумина // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 1. С. 50-54.
3. Иванов Ю.Ф., Алсараева К.В., Громов В.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Ткаченко А.В. Повышение усталостного ресурса силумина при обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т 11. №3. С. 281-284.
4. 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. № 1. С. 67 – 80.
5. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002.