

ДЕФОРМАЦИЯ СИЛУМИНА, ОБЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

М.Е. РЫГИНА^{1,2}, А.М. УСТИНОВ³, А.А. КЛОПOTOВ³, Ю.Ф. ИВАНОВ¹

¹Институт сильноточной электроники СО РАН

²Томский политехнический университет

³Томский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: l-7755me@mail.ru

Практически все процессы износа, коррозии, роста усталостных трещин и т.д., приводящие к отказам деталей и механизмов, начинаются с поверхности и определяются свойствами относительно тонкого поверхностного слоя [1]. Следовательно, в ряде случаев для повышения срока службы изделия достаточным является модифицирование его поверхностного слоя. В настоящее время перспективными, демонстрирующими высокую эффективность поверхностного модифицирования изделий, являются методы, основанные на применении концентрированных потоков энергии, в том числе комбинированные электронно-ионно-плазменные методы [2].

Целью настоящей работы является установление и анализ закономерностей пластической деформации образцов силумина, облученных интенсивным импульсным электронным пучком и подвергнутых растяжению.

В качестве объекта модифицирования использованы образцы силумина марки АК10М2Н, широко применяемого в машиностроении, аэрокосмической промышленности, кораблестроении, приборостроении, медицине и т.д.[3]. Модифицирование образцов силумина осуществляли на установке «СОЛЮ», созданной в Институте сильноточной электроники СО РАН (УНУ «УНИКУУМ» (skp-ef.ru/usu/434216/) входит в перечень объектов Современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации). Механические испытания образцов силумина проводили методом растяжения пропорциональных плоских образцов с головками в соответствии с ГОСТом [4] и Международным стандартом «ИСО 6892-84. Metals. Methodsoftensiontest», который регламентирует размеры используемых для испытаний на растяжение образцов. При облучении образцов электронный пучок был ориентирован по нормали к плоскости образца. Облучение рабочей части образцов производилось с двух сторон. Максимальный диаметр пучка электронов, получаемый на установке «СОЛЮ», зависит от плотности энергии пучка электронов и достигает 50 мм, поэтому применялся метод многошаговой обработки поверхности с перекрытием отпечатков, используя встроенный в установку манипулятор с размером области сканирования 200x200 мм. Исследование процессов, протекающих при деформировании силумина, осуществляли с использованием метода цифровой корреляции изображений[5]. Метод цифровой корреляции изображений относится к классу бесконтактных методов, позволяет выполнять анализ изображений исследуемой поверхности твердого образца для получения качественных и количественных данных полей деформаций, перемещений и скоростей. Деформационная картина поверхности получается путем объединения изменений суб-регионов. Спекл-структуры наносятся искусственно на поверхность твердых образцов для образования контрастной картины. Цифровая оптическая система Vic3D использует принцип корреляции цифровых стереоскопических изображений, что дает возможность получения данных по перемещению поверхности образца в пространстве. Съемка с двух цифровых камер позволяет получать стереоскопическое изображение поверхности образца. Анализируя их, определяются перемещения точек его поверхности в трех осях (в пространстве). С помощью метода корреляции цифровых изображений, реализованном в цифровой оптической системе Vic3D, вычисляются геометрические параметры поверхности (координаты X, Y, Z для каждой анализируемой точки), а также перемещение в каждой точке (U, V и W, указывающие перемещения по осям X, Y и Z соответственно), относительные деформации (ε_{xx} – по оси X,

ε_{yy} – по оси Y, ε_{xy} – деформации сдвига), скорости изменения перемещения и деформаций, кривизну поверхности.

Выполненные исследования показали, что облучение силумина импульсным электронным пучком в режиме плавления сравнительно тонкого (до сотни мкм) поверхностного слоя и последующая высокоскоростная кристаллизация приводят к формированию структуры ячеистой кристаллизации (твердый раствор на основе кристаллической решетки алюминия) субмикро- наноразмерного диапазона. Наноразмерные частицы кремния и интерметаллидов располагаются в объеме и вдоль границ ячеек.

На рис. 1 приведены деформационные кривые в координатах $\sigma=f(\varepsilon)$ и $\sigma=f(\sqrt{\varepsilon})$ для образцов до облучения и после облучения импульсным электронным пучком. Видно, что механические свойства силумина существенным образом зависят от плотности энергии пучка электронов.

Стандартным подходом является анализ стадийности деформационных кривых при помощи обработки кривых упрочнения в координатах $\sigma-\varepsilon^n$. По точкам перегиба на деформационных кривых можно судить о структурных изменениях, происходящих в сплавах. Наличие точек перегиба на деформационных кривых в координатах $\sigma-\sqrt{\varepsilon}$ не облученного и облученного электронным пучком с плотностью энергии 25 Дж/см² образцов свидетельствует о структурных изменениях при деформации. На деформационной кривой образца, облученного электронным пучком с плотностью энергии 15 Дж/см² таких изменений не обнаружено.

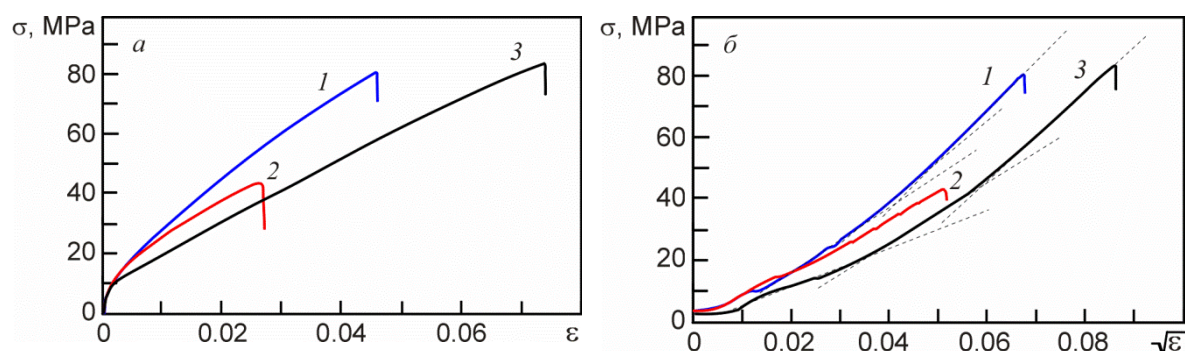


Рисунок 1 - Деформационные кривые растяжения образцов силумина в координатах σ от ε (а) и σ от $\sqrt{\varepsilon}$ (б) до облучения (1), облученных интенсивным импульсным электронным пучком с энергией 15 Дж/см² (2) и 25 Дж/см² (3)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-БРФФИ (проект № 19-52-04009) и гранта РНФ (проект № 19-79-10059).

Список литературы

1. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Аксенова К.В. Усталость силумина, модифицированного электронно-пучковой обработкой. – Новокузнецк: Изд-во «Полиграфист», 2019. – 184 с.
2. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 287 с.
3. ГОСТ 1583-93 Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. – Минск: Издательство стандартов, 2003 г.
4. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2005 г.
5. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Plastic Strain Localization and its Stages in Al-Mg Alloys // Physical Mesomechanics. – 2018. - V. 21, No. 4. - P. 314-319.