

## **ФОРМИРОВАНИЕ АМОРФИЗИРОВАННОГО НАПЛАВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ТРУБЧАТОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛОВ**

*Н.И. Базалеев, В.В. Брюховецкий, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарев\*,  
В.В. Уваров\*, В.Т. Уваров\**

*Научно-технический центр электрофизической обработки НАН Украины,  
г. Харьков;*

*\* ННЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины  
г. Харьков, Украина*

Рассмотрен способ модификации поверхности сплава Д16 релятивистским импульсным пучком электронов. Мишени облучались под различными углами к оси пучка. Изучена структура материала мишени в области радиационного воздействия пучка. Установлено, что на формирование структуры поверхности мишени оказывают влияние силы электродинамического взаимодействия тока пучка и токов, наведенных в мишени.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Разработка способов получения аморфных металлических материалов является интенсивно развивающимся направлением. Поскольку одним из основных ограничений широкого внедрения этих материалов является невозможность получения заготовки с заданными размерами, то способ аморфизации, как правило, выбирают с учетом особенностей последующей эксплуатации изделия. Широко распространен способ спиннингования, заключающийся в разливе струи расплава на вращающийся вал, центрифугу либо диск, выполняющие роль холодильника, обеспечивающего необходимую скорость охлаждения (вращение производится с целью получения аморфизованного материала (АМ) необходимого размера и формы, как правило, это лента либо проволока) [1]. Известно также, что АМ получают путем импульсного переплава поверхности металла в режиме, когда затвердевание расплавленной части происходит в результате интенсивного теплообмена с холодной частью изделия. В качестве одного из признаков аморфизации может служить высокая коррозионная стойкость переплавленных поверхностей, что наблюдалось авторами (В.Т. Уваров, А.Г. Пономарев) на примере различных сплавов, выдерживаемых в естественной среде на протяжении более 10 лет. Для этого используют лазерное излучение либо электронные пучки. Сравнивая эти два вида излучения, следует отметить преимущество первого благодаря его высокой размерной точности и преимуществу второго, выражающееся в достаточно высоком КПД преобразования энергии (порядка 60 %).

Учитывая то, что в ряде случаев необходимо получить аморфизированный слой непосредственно на поверхности изделия, более удобным представляется метод переплава электронным пучком. Вместе с тем возникает необходимость увеличения скорости охлаждения расплавленной части мишени вследствие более высоких градиентов температуры. Это

может достигаться в результате принудительного расплескивания расплава из лунки на более холодную часть поверхности. Такой процесс может осуществляться в результате электродинамического взаимодействия тока пучка и индукционных токов, наводимых в материале мишени. Одним из результатов взаимодействия тока мишени с током пучка и его влияния на режим последующего застывания расплава является форма и размеры оплавленной поверхности в зоне действия пучка.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

На процесс обработки поверхностного слоя металлического материала, обрабатываемого мощным импульсным пучком электронов, могут оказывать влияние три фактора:

1. В результате воздействия мощного пучка релятивистских электронов на металлическую поверхность зона максимального энерговыделения приходится на приповерхностную область. В этом случае в течение определенного времени вблизи поверхности существует слой перегретой жидкости, которая обеспечивает разлет расплавленной части мишени. Поскольку время действия пучка соизмеримо со временем образования расплава, его разлет происходит в условиях взаимодействия тока пучка и токов, наведенных в расплаве.

2. Проникновение электронов пучка в материал мишени зависит от угла между осью пучка и нормалью к поверхности мишени. Следовательно это окажет влияние на толщину формирования расплавленной зоны.

3. Направленность волны акустического импульса, генерируемого пучком, зависит от направления первичных электронов.

Одним из способов экспериментальной оценки влияния указанных факторов может быть исследование особенностей застывания расплава при воздействии пучка под углом к поверхности мишени.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы сплава Д16 облучались на ускорителе "Старт" импульсным трубчатым пучком электронов длительностью 10 мкс со значениями тока  $I=2 \text{ кА}$ , ускоряющего напряжения  $U=370 \text{ кВ}$ . Пластины размещались под углами 90, 45, 30° к оси пучка. На поверхности пластин образовывались эллипсообразные следы оплавленной поверхности. Образцы пластин разрезались вдоль большой оси эллипса, после чего проводились металлографические исследования на оптическом микроскопе МИМ-6. Зеренную структуру выявляли универсальным травителем следующего состава: 17 мл  $\text{HNO}_3$ , 5 мл  $\text{HF}$ , 78 мл  $\text{H}_2\text{O}$ . На растровом электронном микроскопе JEOL JSM-840 исследовались фрактограммы облученной и необлученной поверхностей низкотемпературного ударного излома образцов. Также сравнивались поверхности образцов, облученных под различными углами.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматривая вопрос возможного влияния сил электродинамического взаимодействия электронов пучка с компонентами газоплазменного факела и током, индуцируемом в мишени, на режим формирования свойств переплавленной поверхности мишени, попытаемся оценить зависимость величины и формы площади переплавленной поверхности от угла падения пучка. В случае отсутствия сил взаимодействия мощный трубчатый пучок, направленный под углом к поверхности мишени, оставил бы переплавленный след правильной эллиптической формы. Очевидно, что пучок будет испытывать взаимодействие с токами изображения мишени, сила которого для случая идеально проводящей пластины оценивалась в работе [2] следующей формулой

$$\gamma m \frac{d^2 l}{dt^2} = \frac{\beta^2 n e^2}{l}, \quad (1)$$

где  $m$ ,  $n$ ,  $e$  – масса, концентрация и заряд электрона;  $\beta$  – средняя скорость электронов, отнесенная к скорости света;  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  – релятивистский фактор электрона;  $l$  – расстояние от электрона до мишени. Поэтому признаки такого взаимодействия мы можем визуальным образом наблюдать на поверхности мишени. Как видно из рис. 1, образовавшаяся эллипсоподобная оплавленная зона действия пучка на мишени, расположенной под углом 30° к оси трубчатого пучка, не является симметричной. По мере удаления от источника излучения площадь оплавленной поверхности увеличивается, что является следствием изменения траектории пучка в результате электродинамического взаимодействия с токами, индуцируемыми в мишени.

Известно, что обработка дюралюмина импульсным высокопоточным релятивистским пучком

электронов приводит к измельчению его микроструктуры в зоне, подвергнутой переплаву [3].



Рис. 1. Мишень, облученная трубчатым пучком электронов под углом 30° к оси пучка

Этот эффект аналогичен тому, который достигается введением легирующих добавок для придания заданных пластических свойств. Подтверждением того, что данный эффект оказывает влияние на способность материала к пластической деформации послужили данные исследования сверхпластических свойств материала [4]. Следует заметить, что измельченная структура поверхности, как правило, обеспечивает повышенную коррозионную и кавитационную стойкость. Известно, что при больших скоростях кристаллизации наблюдается слабая сегрегация примесей, так как их перераспределение лимитируется диффузией в жидкой фазе. Однако на расстоянии порядка длины диффузионного переноса этим эффектом пренебрегать нельзя.

В изменение состава приповерхностных слоев может вносить вклад также вытеснение движущейся границей твердое тело – расплав различного рода термодинамически устойчивых соединений типа силикатов, алюминатов и др. [4]. Наконец, изменения состава можно ожидать в связи с тем, что поверхность нагретого в вакууме расплава в процессе испарения обедняется наиболее летучими компонентами. Сопоставление масс-спектров обработанных и необработанных поверхностей указывает на значительные изменения элементного состава после облучения высокопоточным РЭП. В частности, интенсивность пика магния облученной пучком поверхности выросла в 14 раз по сравнению с исходной поверхностью. Увеличились также концентрации и других компонентов облученного сплава Д16 (меди, марганца, железа и других элементов) [5].

Изучение микроструктуры шлифов на продольных разрезах облученных образцов показывает, что переплавленная часть мишени имеет измельченную структуру (рис. 2, а).

Застывание расплава (см. рис. 2, а, б) происходило в процессе его волнообразного движения. Возникновение жидкой фазы на поверхности носило локаль-

ный характер, что может быть обусловлено двумя факторами:

1) преимущественным плавлением в местах локализации примесей;

2) присутствием в объеме основного пучка микропучков с повышенными плотностями токов. Вместе с тем, микрорельефы поверхностей сплавов, облученных под разными углами различаются (рис. 3).

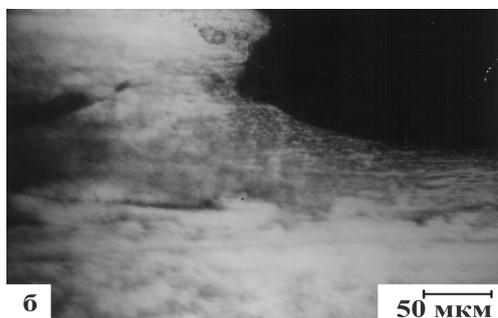
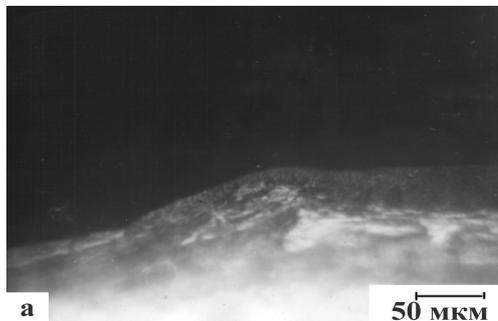


Рис. 2. Микрофотографии участков илиффов поперечного разреза мишени со стороны действия пучка

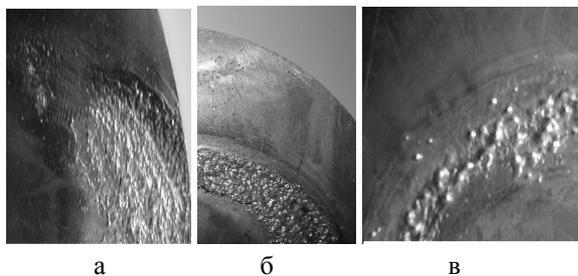


Рис. 3. Фотография поверхностей мишеней, облученных под углами а – 30; б – 45; в – 90°

Снимки, сделанные на РЭМ, поверхностей образцов, облученных под углами 90 и 30° к оси пучка представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

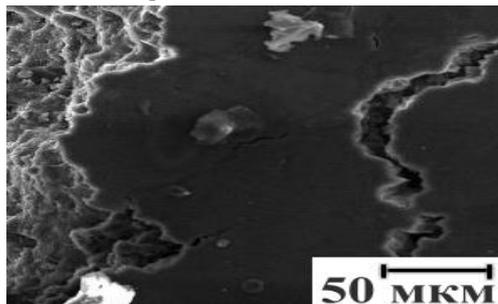


Рис. 4. Микрофотография поверхности, облученной под углом 90°

Как видно из рис. 4, присутствие касательной составляющей в скорости частиц создает вихревые образования, возникающие вследствие гидродинамических и электродинамических процессов взаимодействия на поверхности мишени.

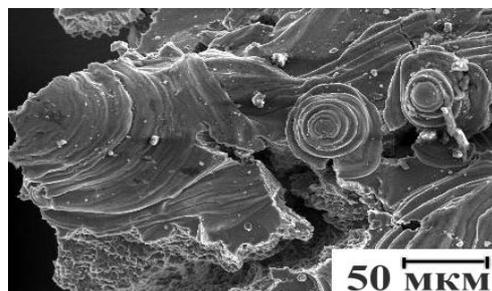


Рис. 5. Микрофотография поверхности, облученной под углом 30°

Принимая во внимание, что рассматриваемый способ модификации структуры алюминиевых сплавов позволяет улучшать их пластичные свойства, нами исследовались фрактограммы поверхностей ударного низкотемпературного излома образцов. Наличие равноосных ямок на изломе приповерхностного слоя, подвергнутого действию пучка, (рис. 6) показывает что разрушение происходило по вязкому механизму.

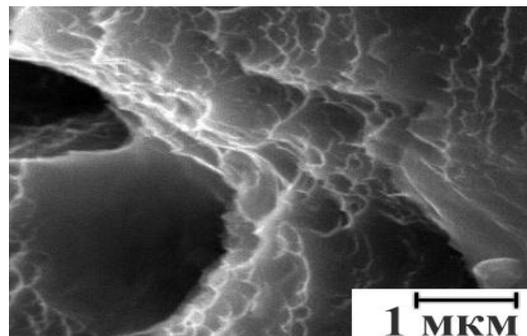


Рис. 6. Фрактограмма низкотемпературного ударного излома дюралюмина в области переплавляющего воздействия пучка

При этом роль равноосности, получаемой благодаря радиационному воздействию, в пластическом механизме деформации отмечалась нами в работах [3, 4].

На изображениях фрактограммы необработанной пучком части пластины (рис. 7) видны кристаллические фасетки, т.е. преобладал внутризеренный механизм излома в силу крупнозернистости материала.

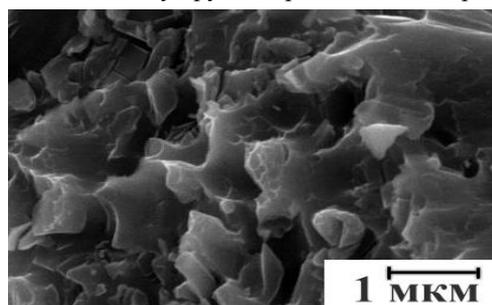


Рис. 7. Фрактограмма низкотемпературного ударного излома исходного дюралюмина

Такой вид фрактограммы характерен для полностью хрупкого разрушения. Несмотря на то, что для алюминиевых сплавов не характерно хрупкое разрушение типа внутрикристаллического скола [7], заметно существенное различие в механизмах излома исходного и обработанного пучком материала. Это может объясняться дроблением крупных частиц избыточных фаз на границах зерен во время облучения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что для формирования зоны радиационного воздействия сильноточных пучков электронов на технологические мишени перспективным является возможность использования сил электродинамического взаимодействия тока пучка и наведенного тока в мишени. Данный подход открывает возможности для обработки поверхностей изделий сложной формы, в том числе и внутренних поверхностей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аморфные металлические сплавы /Под ред. Ф.Е. Люборского. М.: «Металлургия», 1987, 584 с.
2. К.В. Ходатаев. «Зеркальный захват» сильноточного самофокусирующегося пучка релятивистских электронов на замкнутую орбиту //Атомная энергия. 1972, т. 32, в.5.
3. В.В. Брюховецкий, В.В. Литвиненко, В.Ф. Клепиков, Р.И. Кузнецова и др. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина //Физика и химия обработки материалов. 2002, №4, с. 33–38.
4. В.Ф. Клепиков, В.В. Брюховецкий, А.В. Пойда, В.В. Литвиненко. Изменение структуры и сверхпластичных свойств пластин алюминиевых сплавов воздействием импульсного пучка электронов //ВАНТ. Серия: ФРП и РМ (84). 2003, №6, с. 86–88.
5. В.В. Уваров, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко и др. Модификация свойств поверхностных слоев сталей и сплавов сильноточным РЭП микросекундной длительности //ВАНТ. Серия: ФРП и РМ (84). 2003, №6, с. 86–88.
6. В.П. Ротштейн. Модификация структуры и свойств материалов электронными пучками: Автореф. докт. дис. 1995, 37 с.
7. Т.А. Гордеева, И.П. Жегина. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: «Машиностроение», 1978, 200 с.

### ФОРМУВАННЯ АМОРФИЗОВАНОГО НАПЛАВУ ПРИ ДІЇ ІМПУЛЬСНОГО ТРУБЧАТОГО ПУЧКА ЕЛЕКТРОНІВ НА ПОВЕРХНЮ МЕТАЛІВ

*М.І. Базалєєв, В.В. Брюховецький, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарьов, В.В. Уваров, В.Т. Уваров*

Розглянуто спосіб модифікації поверхні сплаву Д16 релятивістським імпульсним пучком електронів. Мішені опромінювались під різними кутами до осі пучка. Вивчена структура матеріала мішені в області радіаційного впливу пучка. Встановлено, що на формування структури поверхні мішені справляють вплив сили електродинамічної взаємодії струму пучка та струму зображення мішені.

### THE METAL SURFACE GLASS LIKE MELTING BY THE PULSE TUBE LIKE ELECTRON BEAM'S INFLUENCE

*M.I. Bazaleev, V.V. Bryukhovetsky, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko, A.G. Ponomarev, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov*

The method of modification influences of duraluminum surface by the pulse electron beam are considered. The targets were irradiated on the various angles to the beams axes. It was investigated the target's structure on the region of beam's action. It was determined that on target's surface structure the influence of electrodynamic interaction between beam's current and currents which are induced on target is essential.