

УДК 662.61.537.66.092

## УДАРНО-ЗАЩИТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

**Н. И. Базалеев, С. Е. Донец, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко,  
Ю. Ф. Лонин<sup>1</sup>, А. Г. Пономарев<sup>1</sup>, В. Т. Уваров<sup>1</sup>**

*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,  
Харьков, Украина,*

*<sup>1</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 27.03.2017

В работе рассмотрена возможность использования обработки конструкционных алюминиевых сплавов сильноточным релятивистским пучком электронов с целью улучшения их механических характеристик. Изучены особенности поверхностей излома области образцов, модифицированной излучением, установлены эффекты увеличения микротвердости, изотропной ориентации зерен. Сделаны предположения о перспективности такого вида обработки для формирования демпфирующих покрытий.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, сильноточный релятивистский электронный пучок, облучение, модификация структуры.

## УДАРНО-ЗАХИСНІ ПОВЕРХНІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, МОДИФІКОВАНИХ СИЛЬНОСТРУМОВИМ РЕЛЯТИВІСТСЬКИМ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ

**М. І. Базалєєв, С. Є. Донець, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко,  
Ю. Ф. Лонін, А. Г. Пономарьов, В. Т. Уваров**

В роботі розглянута можливість застосування обробки конструкційних алюмінієвих сплавів потужнострумивим релятивістським пучком електронів з метою покращення їх механічних характеристик. Вивчено особливості поверхонь зламу області зразків, модифікованої випромінюванням, встановлені ефекти збільшення микротвердості, изотропної орієнтації зерен. Припускається перспективність такого виду обробки для формування демпфуючих покриттів.

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, потужнострумивий релятивістський електронний пучок, опромінення, модифікація структури.

## ALUMINUM ALLOYS SHOCK PROTECTIVE SURFACES MODIFIED BY HIGH CURRENT ELECTRON BEAM

**M. I. Bazaleev, S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko,  
Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, V. T. Uvarov**

The possibility of structural aluminum alloys processing by a high current relativistic electron beam in order to improve their mechanical characteristics is considered. The features of the fracture surfaces of the sample region modified by irradiation are studied. The effects of increasing the microhardness, and the isotropic orientation of the grains are established. Assumptions about the prospects of this type of treatment for the formation of damping coatings are made.

**Keywords:** aluminum alloys, high-current relativistic electron beam, irradiation, structure modification.

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка принципов получения ударно-защитных поверхностей является одной из ключевых задач обеспечения безопасности, как здоровья людей, так и технических систем. Среди множества существующих

подходов к решению этой проблемы мы остановимся на рассмотрении технологии получения упрочненных поверхностей металлических пластин путем облучения их сильноточными релятивистскими электронными пучками (СРЭП).

Данная технология, как правило, представляет интерес с точки зрения придания модифицируемой поверхности требуемых эксплуатационных характеристик: микротвердость, стойкость к истиранию, коррозионная стойкость и др. Вместе с тем известно [1, 2], что механизм модифицирующего действия СРЭП заключается в радиационном, температурном и ударно-волновом воздействии. При этом глубина модифицированного слоя значительно превышает средний пробег электронов в материале. Кроме того, такой показатель, как значение микротвердости изменяется периодически по глубине пластины. Таким образом, разупрочненные прослойки могут демпфировать возможные внешние ударные воздействия [1, 3]. Также нами было установлено, что предварительная обработка алюминиевых сплавов СРЭП приводит к существенному улучшению показателей их сверхпластической деформации [4]. Еще более непредсказуемо изменяется распределение плотности дислокаций по объему облучаемого материала и их ориентация в пространстве [1]. Рассматривая приведенный перечень эффектов, возникающих при облучении металлических пластин СРЭП, с точки зрения возможности получения ударно защитных материалов, можно сказать, что они представляют определенные технологические перспективы. Понимая под обобщенным определением ударно-защитное свойство материала, его способность конвертировать кинетическую энергию ударяющего предмета в собственную внутреннюю энергию, а также в энергию собственных деформаций во всех направлениях, за исключением направления, в котором расположен защищаемый объект, приблизиться к реализации подобного требования возможно путем создания определенной анизотропии в ориентации зерен сплошного материала с изменением направления оси преимущественной ориентации на субмикронных пространственных периодах, создания хаотической пористости и плотности дислокаций. Одним из инструментов достижения указанных эффектов в пределах сплошного объема монолитного материала является облучения его СРЭП. Поскольку речь идет о хаотическом распределении характеристик

объекта уместно использовать аппарат фрактального анализа для количественной оценки их влияния на параметры деформации при приложенном усилии.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку, одним из требований к ударно-защитным материалам является их легкость и прочность, в качестве образцов были выбраны алюминиевые сплавы Д16 (91,9 % Al; 4,8 % Cu; 1,5 % Mg; 0,8 % Mn; примеси Fe и Si до 0,5 %) и АМг6 (92,197 % Al, 0,1 % Cu; 6 % Mg; 0,6 % Mn; 0,4 % Fe; 0,4 % Si; 0,2 % Zn; 0,1 % Ti; 0,003 % Be). К тому же алюминиевые сплавы сейчас рассматриваются как конструкционный материал для изготовления кузовов автомобилей, в том числе из соображений безопасности пассажиров при резком торможении.

Облучение проводили на импульсном электронном ускорителе ННЦ ХФТИ [5]: ТЕМП-А (ток — 2 кА, энергия электронов 0,3 МэВ, длительность импульса — 5 мкс).

Фрактографические исследования проводили с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-840.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образцы облучаемых материалов готовили в виде, пригодном для последующих механических деформаций в различных режимах. Облучалась, только рабочая часть образцов. После облучения на поверхности наблюдались следы оплавления рис. 1.



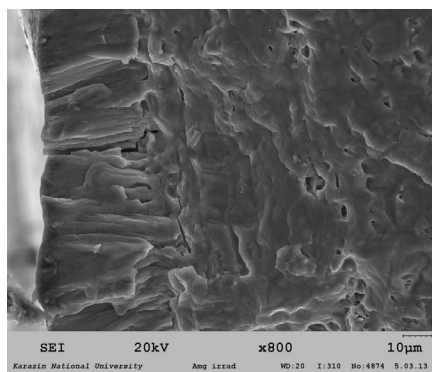
Рис. 1. Образцы алюминиевого сплава Амг6, обработанного СРЭП

На рис. 2 показана фрактограмма излома облученного сплава АМг6. На рис. 2а с левой стороны видна переплавленная пучком область мишени, для которой характерна вытянутость зерен перпендикулярно

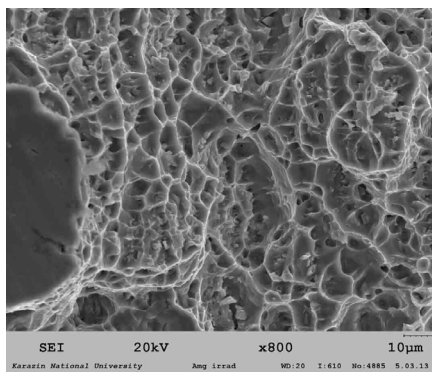
поверхности, на рис. 2б представлен фрагмент центральной части пластины с большим увеличением. Диаметр волокон составляет менее одного микрона. Микротвердость в этой области на 20 % выше, чем в глубине образца. Вытянутость волокон можно объяснить формированием волн сжатия-растяжения в объеме мишени. Далее следует область температурного воздействия и область ударно-волнового воздействия. В нашем случае параметры пучка таковы, что выполняется условие возникновения ударных волн согласно соотношению [1]

$$I \geq \frac{C_L^4 \rho R_0 \tau}{S}, \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивность пучка,  $C_L$  — продольная скорость звука в материале мишени,  $\rho$  — плотность,  $R_0$  — пробег электронов в мишени, длительность импульса,  $S$  — площадь облучаемой поверхности,  $\tau$  — длительность импульса. Наличие ударных волн приводит к возникновению демпфирующей области между переплавленным слоем и областью температурного и ударно-волнового воздействия.



а



б

Рис 2. Фрагменты излома облученного сплава АМг6: а — переплавленная часть образца, б — центральная часть образца

Таким образом, в результате облучения, мы имеем на отрезке толщины сплошной пластины материал, который характеризуется различными механическими свойствами, с хаотичной закономерностью распределения упругих свойств в пространстве.

На дифрактограмме, приведенной на рис. 3, наблюдается снижение интенсивности пика (111) для облученного образца, что может объясняться перераспределением электронной структуры, в частности возможного изменения соотношения валентных и ковалентных связей, обусловленных смещением к поверхности легирующих элементов. Вероятно, также, что обеднение поверхностного слоя фазой  $Al_2O_3$ , обусловлено перемещением при облучении переплавленного слоя и десорбцией растворенного кислорода.

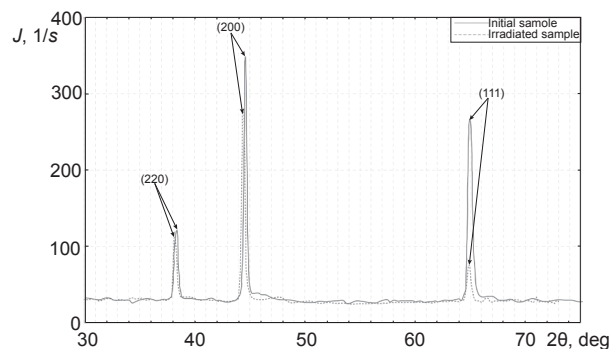


Рис. 3. Дифрактограмма сплава до и после облучения

Изменение ориентации зерен, распределений электронной структуры и элементного состава позволяет говорить об анизотропии механических свойств материала, возможном повышении его демпфирующих свойств [6], поскольку при подобной анизотропии происходит возникновение ротационных мод в процессе деформации.

Различия в структуре ударного излома алюминиевого сплава Д16 были описаны нами в работе [7]. Вместе с тем, данные приведенные в работе [6] касательно волнового характера движения дефектов на границе раздела сред с различной структурой, дают основания переосмыслить характер излома на рис. 4. Как видно на рис. 4а, излом облученной части мишени сопровождался выделением энергии внутренних напряжений, проявляющейся в виде ротаций мезомасштабного уровня, тогда как в необлученной части рис. 4б,

разрушение реализовалось как хрупкий межкристаллитный излом. С точки зрения поглощения внешней ударной энергии материалом, безусловно, предпочтительней явля-

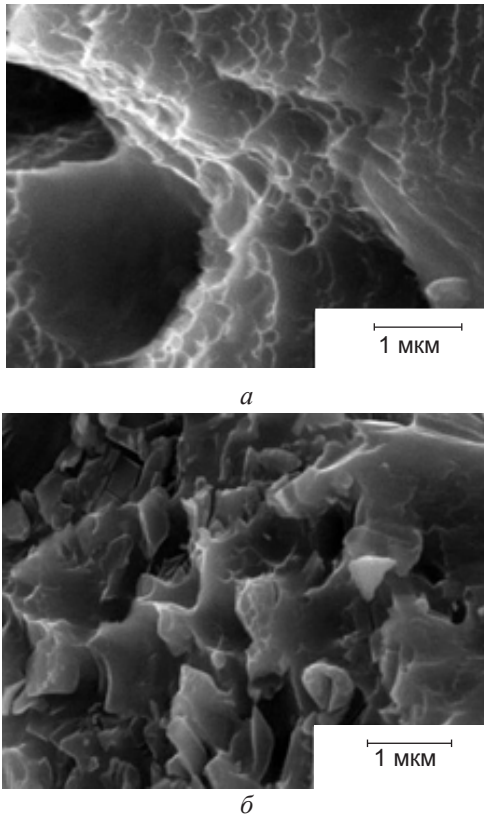


Рис. 4. Фрактограммы ударного излома сплава Д16: *а* — излом в облученной области, *б* — излом в необлученной области

ется реализация ротаций в области раздела.

Нелинейность поведения механических свойств алюминиевого сплава с модифицированным поверхностным слоем в условиях приложения ударной нагрузки будет следовать из модифицированного выражения Холла-Петча [8]

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 + F(d), \\ H &= H_0 + F(d),\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\sigma$  — предел текучести,  $H$  — твердость,  $d$  — размер зерна.

Функциональная зависимость указывает на довольно неустановленную роль размера, формы и ориентации зерна, как ресурса для получения заданных свойств материала, причины нелинейности из отклонения в поведении материала. Непредсказуемость поведения сплавов с субмикроструктурными и наномасштабными размерами зерен обусловлена именно многообразием процессов на

границах зерен, которые являются участками как генерации и скопления, так и аннигиляции дислокаций [9]. Роль дислокационного взаимодействия при деформации материала описывается выражением для напряжения пластического течения [9, 11]

$$\tau = \tau_f + \alpha \mu b \rho^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность дислокаций,  $\tau_f$  — напряжение трения при взаимодействии движущихся дислокаций с решеточными дефектами,  $\alpha$  — постоянная взаимодействия дислокаций друг с другом. В случае существенной анизотропии в ориентации зерен, как это происходит вследствие облучения, динамика изменения плотности дислокаций без учета состояния границ зерен описывается выражением [9, 10]

$$\frac{d\rho}{dt} = \left( \frac{\beta}{d} + \frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_f} \right) u \rho - \left( h_a u \rho^2 + \frac{\rho}{t_d} \right), \quad (4)$$

где  $\lambda_m$ ,  $\lambda_f$  — расстояния свободного пробега дислокаций между актами двойного поперечного скольжения,  $u$  — скорость перемещения дислокаций вдоль плоскости скольжения,  $h_a$  — характерное время аннигиляции дислокаций, зависящее от температуры и энергии дефектов упаковки. В правой части уравнения (4) приведена разность между многообразием механизмов рождения и аннигиляции дислокаций, более подробно описанная в [9], но которая подтверждает, что при преимущественной реализации того или иного механизма мы получим существенно различные значения для напряжения пластического течения. Отмечаемые нами выше эффекты увеличения микротвердости в модифицированной поверхностной области дают основание ожидать увеличения предела текучести [11].

## ВЫВОДЫ

Модификация поверхностей алюминиевых сплавов материалов путем обработки сильноточными релятивистскими электронными пучками позволяет увеличивать значение микротвердости в поверхностной области, таким образом повышая значение напряжения трещинообразования,

долговечности под нагрузкой. Создание раз-  
нонаправленности в ориентации зерен моди-  
фицированной и основной области, позволяет  
рассматривать сильноточный релятивистский  
электронный пучок, как инструмент модифи-  
кации механических свойств алюминиевых  
сплавов. Работа выполнена при частичной  
поддержке проекта НАН Украины № 62/17-н.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко В. И., Валяев А. Н., Погребняк А. Д. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // УФН. — 1999. — Т. 169, № 11. — С. 1243–1271.
2. Базалеев Н. И., Брюховецкий В. В., Клепиков В. Ф. и др. Формирование аморфизированного наплава при воздействии импульсного трубчатого пучка электронов на поверхность металлов // Вопросы атомной науки и техники. — 2005. — № 5(88). — С. 146–149.
3. Klepikov V. F., Kivshik V. F. Berezovsky S. V., et. al. The structure of the undersurface layer of alloys in the region of the relativistic tube-like electron beam and thermodynamic models // Problems of Atomic Science and Technology. — 2004. — No. 1(42). — P. 215–217.
4. Брюховецкий В. В., Литвиненко В. В., Клепиков В. Ф. и др. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина // Физика и химия обработки материалов. — 2002. — № 4. — С. 33–38.
5. Уваров В. Т. и др. Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к. п. д. Препринт ХФТИ 84–30. — М.: ЦНИИатоминформ, 1984. — 13 с.
6. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Солитоны кривизны как обобщенные волновые носители пластической деформации и разрушения // Физ. Мезомех. — 2013. — Т. 16, № 3. — С. 7–26.
7. Базалеев Н. И., Брюховецкий В. В., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Пономарев А. Г., Уваров В. В., Уваров В. Т. Формирование аморфизированного наплава при воздействии импульсного трубчатого пучка электронов на поверхность металлов // Вопросы атомной науки и техники. — 2005. —

№ 5(88). — С. 146–149.

8. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystals // J. Iron Steel Instr. — 1953. — Vol. 174: 25–8.
9. Малыгин Г. А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. — 2007. — Т. 49, вып. 6. — С. 961–982.
10. Кайбышев О. А., Валиев Р. З. Границы зерен и свойства металлов. — М.: Металлургия, 1987. — 213 с.
11. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.

## REFERENCES

1. Bojko V. I., Valyaev A. N., Pogrebnyak A. D. Modifikaciya metallicheskih materialov impul'snymi moschnymi puchkami chastic // UFN. — 1999. — Vol. 169, No. 11. — P. 1243–1271.
2. Bazaleev N. I., Bryuhoveckij V. V., Klepikov V. F. i dr. Formirovanie amorfizirovanogo naplava pri vozdejstvii impul'snogo trubchatogo puchka elektronov na poverhnost' metallov // Voprosy atomnoj nauki i tehnik. — 2005. — No. 5(88). — P. 146–149.
3. Klepikov V. F., Kivshik V. F. Berezovsky S. V., et. al. The structure of the undersurface layer of alloys in the region of the relativistic tube-like electron beam and thermodynamic models // Problems of Atomic Science and Technology. — 2004. — No. 1(42). — P. 215–217.
4. Bryuhoveckij V. V., Litvinenko V. V., Klepikov V. F. i dr. Vliyanie impul'snogo elektronno-go oblucheniya na parametry sverhplastichnosti dyuralyumina // Fizika i himiya obrabotki materialov. — 2002. — No. 4. — P. 33–38.
5. Uvarov V. T. i dr. Poluchenie sil'notochnyh puchkov mikrosekundnoj dlitel'nosti s vysokim k. p. d. Preprint HFTI 84–30. — М.: ЦНИИатоминформ, 1984. — 13 p.
6. Panin V. E., Egorushkin V. E. Solitony krivizny kak obobschennye volnovye nositeli plasticheskoy deformacii i razrusheniya // Fiz. Mezomeh. — 2013. — Vol. 16, No. 3. — P. 7–26.
7. Bazaleev N. I., Bryuhoveckij V. V., Klepikov V. F., Litvinenko V. V., Ponomarev A. G., Uvarov V. V., Uvarov V. T. Formirovanie

- amorfizirovannogo naplava pri vozdeystvii impul'snogo trubchatogo puchka elektronov na poverhnost' metallov // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. — 2005. — No. 5(88). — P. 146–149.
8. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystals // J. Iron Steel Instr. — 1953. — Vol. 174: 25–8.
9. Malygin G. A. Plastichnost' i prochnost' mikro- i nanokristallicheskih materialov // Fizika tverdogo tela. — 2007. — Vol. 49, vyp. 6. — P. 961–982.
10. Kajbyshev O. A., Valiev R. Z. Granicy zeren i svojstva metallov. — M.: Metallurgiya, 1987. — 213 p.
11. Markovec M. P. Opredelenie mehanicheskikh svojstv metallov po tverdosti. — M.: Mashinostroenie, 1979. — 191 p.