

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛОВ

*В.И. Дубинко¹, А.Н. Довбня¹, В.А. Кушир¹, В.В. Митроченко¹, И.В. Ходак¹,
В.П. Лебедев², В.С. Крыловский², С.В. Лебедев², В.Ф. Клепиков³*

¹*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Харьков, Украина;*

²*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина;*

³*Институт электрофизики и радиационных технологий НАНУ, Харьков, Украина*

Изучено влияние электронного пучка с энергией 0.5 МэВ и плотностью потока $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на деформацию поликристаллического алюминия (99.5%) и меди (99.5%) при одноосном растяжении со скоростью $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре. В режиме дифференциального воздействия пучка определены начальное снижение уровня деформирующего напряжения и коэффициент упрочнения как функция относительного удлинения и толщины образца.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 60-70 гг. прошлого столетия были выполнены пионерские работы по изучению влияния электронного пучка на деформацию некоторых ГПУ-кристаллов [1, 2]. Было обнаружено повышение пластичности при низкотемпературном (78 К) облучении монокристаллов цинка электронами и γ -квантами с энергией ниже порога выбивания атомов при условии совпадения направления пучка с базисной плоскостью кристалла. Последующие исследования показали, что аналогичный эффект наблюдается при пропускании через ГПУ- и ГЦК-металлы импульсов электрического тока плотностью порядка 10^5 А/см^2 , длительностью $\sim 100 \text{ мкс}$ и частотой следования $\sim 1 \text{ Гц}$ [3, 4].

Такие методы обработки были названы электронно-пластической деформацией (ЭПД). Несмотря на широкое применение и большое количество работ по изучению ЭПД, управляющий механизм этого явления не вполне ясен. В работе [5] предложен фокусонный механизм ЭПД, обусловленный неравновесными флуктуациями энергетических состояний атомов дислокаций при рассеянии на них радиационно-индуцированных возбуждений атомной структуры металла – фокусоннов. Особый интерес представляет использование электронов разных энергий для сравнения действия на дислокационную систему подпорогового и надпорогового облучения при различных температурах [6].

В связи с этим целесообразно вернуться к изучению фактора электронного облучения металлов в процессе их деформирования. Определение силы динамического торможения дислокаций, а также возможной перестройки дефектной структуры металла позволит проанализировать механизмы взаимодействия потока высокоэнергетических электронов с кристаллической решеткой.

Поскольку пороговая энергия электронов для создания устойчивых дефектов в алюминии составляет 0.15 МэВ, а в меди - 0.5 МэВ [6], то в первом случае облучение будет надпороговым, а во втором – подпороговым.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика эксперимента подробно изложена в работе [7]. Электронный пучок с энергией $E = 0,5 \text{ МэВ}$ и плотностью потока $\phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ от линейного ускорителя электронов направлялся на деформируемый металлический образец. Развертка во времени электронного пучка на выходе линейного ускорителя показана на Рис.1.

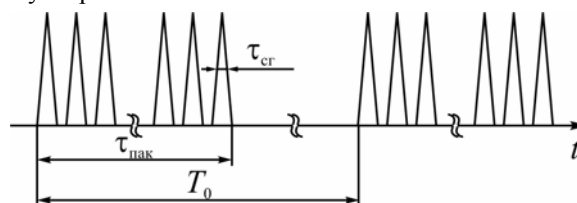


Рис.1. Распределение потока электронов в пучке во времени

Микросгустки электронов длительностью $\tau_{сг} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ с}$ следовали со скважностью $3 \cdot 10^{-10} \text{ с}$ в пакете длительностью $\tau_{пак} = (2 \dots 4) \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Частота следования пакетов $1/T_0$ составляла 25 Гц. Длительность генерации потока электронов можно было варьировать в пределах (10...3000) с. При этом воздействие электронного потока на протекание деформации при комнатной температуре осуществлялось за счет циклического включения облучения (время облучения составляло 10...100 с).

Во время электронного облучения металлические образцы также подвергались одноосному нагружению, которое регистрировалось в координатах нагрузка (P) - время (t) с временной инерцией 1 и 0,3 с. Нагрузка пересчитывалась в деформирующее напряжение по соотношению $\sigma = P(1+\varepsilon)/S$ (S - сечение образца). При равномерном движении штока разрывной машины относительное удлинение определяли по соотношению $\varepsilon = v_{st}t/l$ (v_{st} - скорость перемещения штока, l - длина рабочей части образца) с чувствительностью 0.1%.

Чувствительность регистрации приложенного усилия P при использовании самопишущего электронного потенциометра ЭПП-09 находится в пределах (0.1...1) Н, а при использовании цифрового

мультиметра Sanwa PC520M – в пределах 0.1 Н. Скорость перемещения штока нагружающего устройства составляет $v_{st}=0.5 \text{ мкм}\cdot\text{с}^{-1}$, что соответствует скорости пластического течения $\dot{\epsilon} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Для регистрации поверхностной температуры образца использовали дистанционный инфракрасный пирометр FLUKE 66, снабженный системой считывания температуры с помощью цифровой камеры и последующим запоминанием в компьютере в режиме реального времени.

Образцы для исследований представляли собой плоскопараллельные пластины размером $0.5 \times 4 \times 30 \text{ мм}$ с уширениями для удержания в захватах деформационной машины.

Перед испытаниями образцы алюминия (99.5%) и меди (99.5%) для создания исходной поликристаллической структуры отжигались в вакууме при 400°C в течение одного часа.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Воздействие электронного пучка высокой энергии на пластическое течение металла при комнатной температуре проводили в режиме циклической смены деформирования в отсутствие и при наличии электронного облучения (время выдержки составляло от 10 с до 100 с) (дифференциальный режим).

В пионерской работе [1] по обнаружению влияния электронного облучения на деформацию металла время облучения составляло не более 10 с, что позволило наблюдать кратковременные спады нагрузки на диаграмме активного нагружения с постоянной скоростью удлинения образца.

В связи с этим для определения оптимального времени облучения в дифференциальном режиме были использованы различные времена экспозиции. На Рис.2 приведен участок кривой нагружения поликристаллического алюминия с изменениями, вызванными воздействием электронного потока ϕ при разных временах экспозиции в диапазоне от 5 до 60 с.

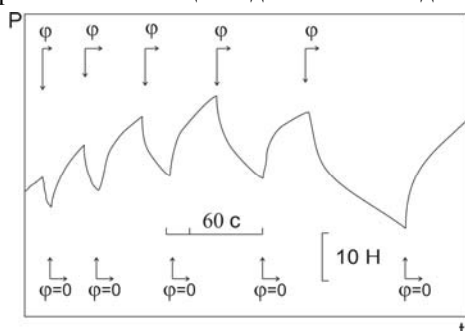


Рис.2. Скачки нагрузки в процессе деформации образца алюминия при разных временах экспозиции электронного потока ϕ

При временах облучения более 10 с помимо переходной стадии (достаточно быстрое разупрочнение металла) наблюдается стадия линейного во времени ($t \sim \epsilon$) снижения действующей нагрузки.

Выключение электронного облучения ($\phi = 0$) приводит к восстановлению хода кривой нагружения, но на более низком уровне действующей нагрузки (невозврат уровня нагружения за счет необратимых процессов в дефектной структуре металла).

В дальнейшем использовался дифференциальный режим испытаний (чередование состояний с $\phi=0$ и $\phi \neq 0$) с четко выраженными первой и второй стадиями на кривой $P(t)$.

Периодическое включение и выключение электронного облучения в процессе растяжения на стадии развитого пластического течения алюминия и меди приводит к одинаковым изменениям на диаграмме деформирования. При энергии $E=0.5 \text{ МэВ}$ для меди это подпороговый режим воздействия, а у алюминия возможно образование вакансий и межузельных атомов.

В качестве примера рассмотрим воздействие потока электронов на пластическое течение поликристаллического алюминия.

На Рис.3 показан участок диаграммы деформирования $\sigma(t) \sim \epsilon$ (σ – деформирующее напряжение, ϵ – относительная деформация) образца поликристаллического алюминия с размером в направлении электронного потока, равным толщине поглощающего слоя для электронов с энергией $E = 0.5 \text{ МэВ}$.

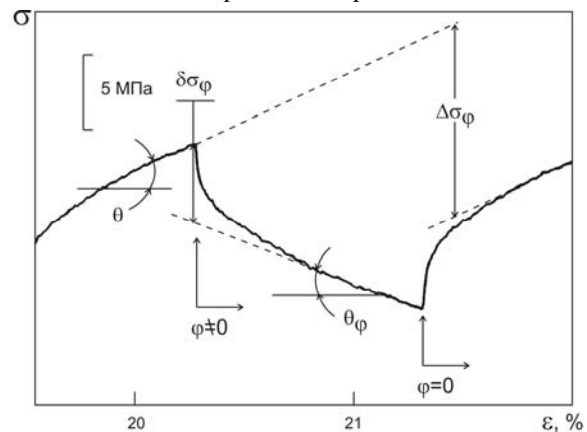


Рис.3. Участок кривой деформационного упрочнения алюминия при дифференциальном воздействии потока электронов

При включении электронного пучка происходит достаточно быстрое снижение уровня деформирующего напряжения на $\delta\sigma_\phi$, затем следует стадия деформирования при наличии потока электронов ($\phi \neq 0$). Если обозначить коэффициент деформационного упрочнения металла через $\theta = d\sigma/d\epsilon$, то прохождение электронного потока через образец всегда приводит к снижению интенсивности нарастания деформирующего напряжения $\theta > \theta_\phi$.

После выключения электронного пучка происходит восстановление уровня деформирующего напряжения на $\delta\sigma_\phi$ и дальнейшее его увеличение со скоростью θ ($\phi=0$).

Обращает внимание невозврат σ в результате действия потока электронов на величину $\Delta\sigma_\phi$. Такое поведение зависимости $\sigma(\epsilon)$ свидетельствует о возникновении менее прочного структурного состояния, которое формируется при наличии потока электронов высокой энергии.

На Рис.4 приведено изменение величины скачка $\delta\sigma_\phi$ для меди (1) и алюминия (2) в зависимости от степени относительной деформации ϵ . Характерным для этих металлов является: наличие $\delta\sigma_\phi \neq 0$ при напряжениях от предела текучести до предела прочно-

сти материала, а также линейное нарастание $\delta\sigma_\phi$ с ростом ϵ . При этом величина скачка $\delta\sigma_\phi$ при одинаковой толщине образца у меди больше, чем у алюминия. На уровне $\epsilon = 15\%$ величины $\delta\sigma_\phi$ соответственно равны 2.5 и 0.9 МПа, что в относительных величинах $\delta\sigma_\phi/\sigma$ составляет $\sim 1\%$.

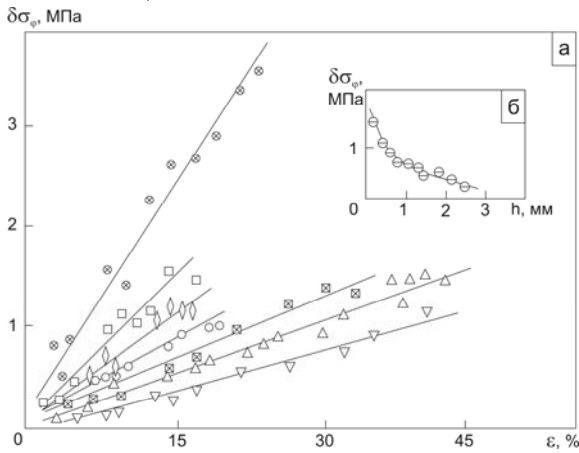


Рис.4. Изменение скачка разупрочнения $\delta\sigma_\phi$ при включении электронного потока как функция степени относительного удлинения ϵ для образцов меди (толщина образца 0,51 мм - \otimes) и алюминия (толщина образца, мм: 0,23 - \square ; 0,36 - \diamond ; 0,57 - \circ ; 0,82 - \boxtimes ; 1,76 - \triangle и 2,15 - ∇) (а). На вставке (б) - зависимость $\delta\sigma_\phi$ ($\epsilon = 15\%$) от толщины алюминиевого образца h

Поскольку толщина слоя поглощения электронов с энергией $E = 0.5$ МэВ составляет ~ 0.5 мм, была изучена зависимость величины скачка разупрочнения $\delta\sigma_\phi$ как функция толщины образца алюминия в направлении падающего излучения (см. Рис.4,б). Общей тенденцией является снижение скачка разупрочнения по мере роста толщины образца. Так при увеличении h от 0.23 до 2.5 мм $\delta\sigma_\phi$ снижается примерно в 8 раз.

Другой характеристикой, определяющей интенсивность накопления деформационных дефектов в кристаллической решетке металла, является величина коэффициента деформационного упрочнения в отсутствие и при наличии электронного облучения.

На Рис.5 приведены значения θ для меди и алюминия при последовательных включениях ($\phi \neq 0$) и выключениях ($\phi = 0$) электронного облучения как функции степени деформации ϵ . Как для меди, так и для алюминия θ : всегда ниже при наличии электронного потока, монотонно убывает с ростом ϵ , выше у более прочного металла.

Различие $(\theta - \theta_\phi)$ также увеличивается по мере деформирования образца и больше у меди, чем у алюминия. Относительное снижение коэффициента упрочнения $\theta - \theta_\phi/\theta$ для меди и алюминия на уровне $\epsilon = 5\%$ соответственно равно 25 и 100%. При более высоких степенях относительной деформации у меди ($\epsilon > 15\%$) и алюминия ($\epsilon > 5\%$) наблюдается $\theta_\phi < 0$, что указывает на разупрочнение деформируемого металла за счет существенной перестройки его дефрктной структуры.

Различие в коэффициентах упрочнения $(\theta - \theta_\phi) \neq 0$ приводит к невозврату деформирующего напряжения на $\Delta\sigma_\phi$ после выключения электронного облучения (см. Рис.3).

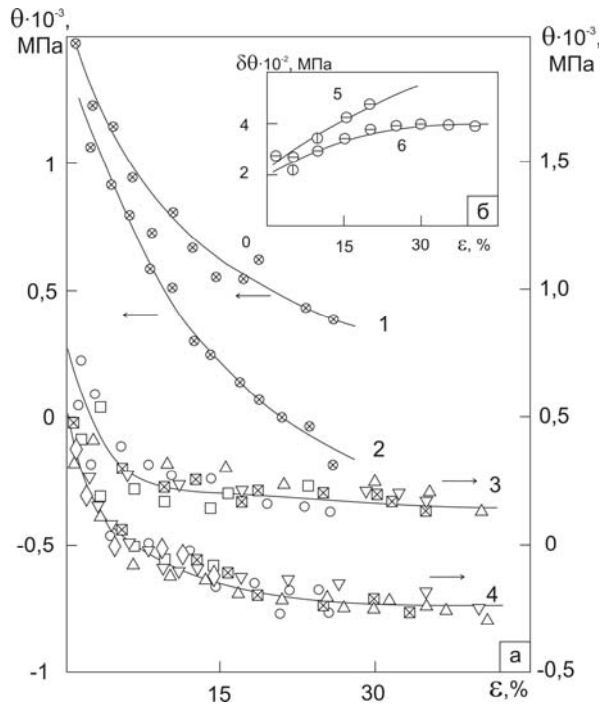


Рис.5. Величина коэффициента деформационного упрочнения θ в зависимости от ϵ для меди (1- $\phi = 0$, 2- $\phi \neq 0$) и алюминия (3- $\phi = 0$, 4- $\phi \neq 0$). Обозначения образцов алюминия разной толщины те же, что и на Рис.4,а.

На вставке (б) - различие в коэффициентах упрочнения $\theta - \theta_\phi$ для меди (5) и алюминия (6) при разных ϵ

В результате неупругого рассеяния высокоэнергетических электронов в металле возможно дополнительное термическое воздействие на дислокационную систему в процессе деформирования. Для определения термического вклада в наблюдаемые эффекты были выполнены измерения повышения поверхностной температуры образца при помощи дистанционного пирометра.

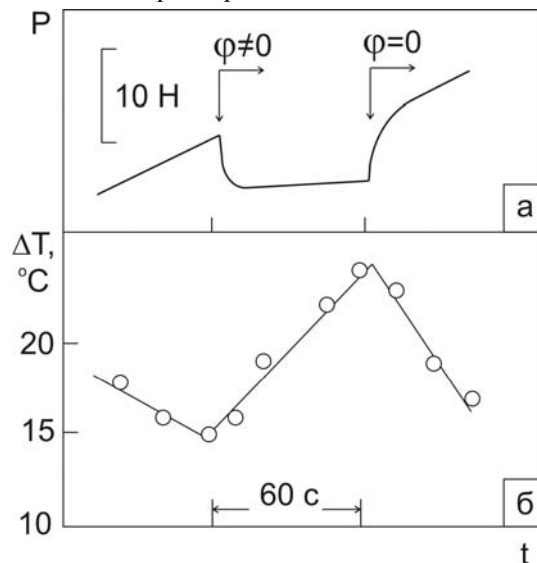


Рис.6. Изменение хода диаграммы нагружения (а) и повышение температуры образца меди (б) за счет электронного облучения

На Рис.6 приведено воздействие электронного облучения на диаграмму деформирования (а) и возрастание температуры ΔT (б) образца меди толщ-

ной $h=0.51$ мм. Как видно, снижение деформирующего усилия происходит при увеличении температуры образца на $\sim 20^\circ\text{C}$ в течение 1 мин. При этом возрастание ($\varphi \neq 0$) и спад ($\varphi=0$) температуры во времени происходят по линейному закону.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В отличие от низкотемпературных экспериментов Троицкого и др. [1, 2], в данной работе был исследован эффект ЭПД при относительно высокотемпературном ($20\dots 40^\circ\text{C}$) электронном облучении поликристаллов кубических металлов. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при электронном облучении наблюдается снижение предела текучести. На стадии пластического течения уровень деформирующего напряжения в облучаемом состоянии всегда ниже, чем без облучения.

Повышение поверхностной температуры за счет прохождения высокоэнергетичных электронов находится в пределах 20°C , что не достаточно для объяснения наблюдающихся эффектов.

Отметим отсутствие принципиального различия влияния подпорогового и надпорогового облучений в наших экспериментах. По-видимому, оно объясняется тем, что скорость создания устойчивых атомных смещений (пар Френкеля) даже при надпороговом облучении алюминия была весьма низкой (не более 10^{-9} сна/с). Поэтому концентрация радиационно-стимулированных дислокационных стопоров за время облучения слишком мала по сравнению с исходной и не приводит к радиационному упрочнению. Вместе с тем, при обоих типах облучения происходит радиационно-индуцированное возбуждение электронной и ионной систем, которое приводит к наблюдаемому разупрочнению металла.

Рассмотрим кратко возможный механизм ЭПД, связанный с радиационно-индуцированным образованием *нелинейных*, сильно локализованных возбуждений кристаллической решетки (так называемых «*дискретных бризеров*» [8] или «*квудонов*», время жизни которых значительно превосходит времена релаксации фононов и фокусонов [5]). В отличие от фокусонов, квудоны не взаимодействуют с фононами, т.е. они устойчивы по отношению к тепловым колебаниям решетки. Поэтому квудоны способны переносить энергию вдоль плотноупакованных направлений на миллионы атомных расстояний, что было экспериментально установлено при облучении слоистых изоляторов [9]. Взаимодействие квудонов с дислокациями может стимулировать отрыв дислокаций от стопоров и, как следствие, повышение пластичности материала. В этой связи, обнаружение эффекта ЭПД при облучении поликристаллов меди и алюминия является еще одним свидетельством в пользу гипотезы радиационно-индуцированного образования квудонов в кубических металлах, наряду с экспериментами по радиационно-стимулированной диффузии в аустенитной стали [10] и радиационному «отжигу» пор в никеле [11].

Особо отметим то, что в наших экспериментах скорость создания устойчивых атомных смещений при надпороговом облучении была сравнима со скоростью создания смещений при реакторном облуче-

нии корпусных сталей ($10^{-10}\dots 10^{-9}$ сна/с). Это позволяет сделать очень важный вывод о том, что механические свойства материалов в условиях реакторного облучения могут значительно отличаться от свойств образцов-свидетелей при послереакторных испытаниях. Таким образом, прогнозирование механического ресурса материалов ядерных реакторов должно проводиться с учетом эффекта ЭПД.

Для построения квудонной модели ЭПД и количественного описания взаимодействия квудонов с дислокационной системой материалов в процессе деформации необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Авторы выражают благодарность НТЦУ за финансовую поддержку работы по проекту № 4368.

ЛИТЕРАТУРА

1. О.А. Троицкий, В.И. Лихтман. Об анизотропии действия электронного и γ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии // *Докл. АН СССР*. 1963, т.148, №2, с.332-334.
2. В.И. Спицын, О.А. Троицкий. Исследование электронного воздействия на пластическую деформацию металлов // *Металлофизика*. Киев: «Наукова думка», 1974, в.51, с.18-45.
3. A.F. Sprecher, S.L. Mannan, H. Conrad. On the mechanisms for the electroplastic effects in metals // *Acta met.* 1986, v.34, №7, p.1145-1162.
4. О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. *Физические основы и технологии обработки современных материалов*. Москва-Ижевск, 2004, с.590.
5. В.И. Дубинко, В.Ф. Клепиков. Влияние неравномерных флуктуаций на пластичность металлов под облучением // *Вісник Харківського національного університету. Серія «Ядра, частинки, поля»*. 2005, №710, в.3/28/, с.87-92.
6. V.I. Dubinko, N.P. Lazarev. Effect of the radiation-induced vacancy emission from voids on the void evolution // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*. 2005, v.B228, p.187-192.
7. Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня, В.И. Дубинко и др. Установка для исследования воздействия потока электронов на деформацию металлов // *Труды XXI Международного семинара по ускорителям заряженных частиц (Алушта, 6-12 сентября 2009 г.)*.
8. S. Flach, A.V. Gorbach, Discrete breathers. Advances in theory and applications // *Phys. Rep.* 2008, v.467, p.1-116.
9. F.M. Russell, J.C. Eilbeck, Evidence for moving breathers in a layered crystal insulator at 300 K // *Europhys. Lett.* 2007, v.78, p.10004-100011.
10. G. Abrasonis, W. Moller, X.X. Ma. Anomalous ion accelerated bulk diffusion of interstitial nitrogen // *Phys. Rev. Lett.* 2006, v.96, p.065901-1-4.
11. V.I. Dubinko, A.G. Guglya, E. Melnichenko, R. Vasilenko. Radiation-induced reduction in the void swelling // *J. Nuclear Materials*. 2009, v.385, p.228-230.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

EFFECT OF HIGH ENERGY ELECTRON BEAM IRRADIATION ON PLASTIC DEFORMATION OF METALS

V.I. Dubinko, A.N. Dovbnya, V.A. Kushnir, V.V. Mitrochenko, I.V. Khodak, V.P. Lebedev, V.S. Krylovskiy, S.V. Lebedev, V.F. Klepikov

In the present paper, we report on the effect of electron beam of (0.5 MeV energy and $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ density) on plastic deformation of polycrystalline aluminum (99.5%) and copper (99.5%) under uniaxial deformation at a rate of $2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ at room temperature. Radiation-induced decrease of the flow stress has been measured as a function of the sample thickness.

ВПЛИВ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПУЧКА ЕЛЕКТРОНІВ НА ПЛАСТИЧНУ ДЕФОРМАЦІЮ МЕТАЛІВ

В.І. Дубінко, А.М. Довбня, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, І.В. Ходак, В.П. Лебедєв, В.С. Криловський, С.В. Лебедєв, В.Ф. Клепиков

Досліджено вплив електронного пучка з енергією 0.5 MeV і щільністю потоку $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на деформацію полікристалічного алюмінію (99.5%) і міді (99.5%) при одноосьовому розтяганні зі швидкістю $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ при кімнатній температурі. У режимі диференційної дії пучка визначено початкове зниження рівня деформуючої напруги, коефіцієнт зміцнення як функція відносного видовження та товщини зразка.