

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛОВ

*Н.И. Айзацкий¹, А.Н. Довбня¹, В.И. Дубинко¹, В.Ф. Жигло¹, А.И. Косой¹, В.А. Кушнир¹,
В.В. Митроченко¹, С.А. Пережогин¹, Д.Л. Степин¹, И.В. Ходак¹, В.П. Лебедев²,
В.С. Крыловский², С.В. Лебедев²*

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

²*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина
E-mail: khiv@kipt.kharkov.ua*

Для изучения влияния электронов с энергией, меньшей энергии возникновения френкелевских пар, на дислокационную систему металлов была создана комплексная ускорительная установка на основе малогабаритного ускорителя электронов с энергией до 1 МэВ и импульсным током до 1 А. Установка включает в себя также деформационную машину для активного растяжения с устройством регистрации действующей нагрузки, дистанционные измерители поверхностной и объемной температур металлического образца. Изучение пластической деформации алюминия и меди проводилось в двух режимах воздействия пучка: дифференциальном режиме со временем облучения 10...100 с и непрерывном. В результате анализа кривых деформационного упрочнения металлов установлено изменение прочностных и пластических характеристик образцов.

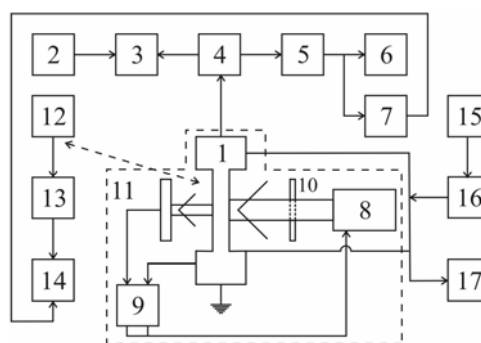
1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время роль компактных резонансных ускорителей при решении технологических задач и проведении научных исследований постоянно возрастает. Все большее их количество применяется при радиационной обработке материалов, в дефектоскопии, для осуществления неразрушающего контроля и т.д. [1, 2]. В физике твердого тела одним из актуальных направлений исследований в настоящее время является изучение изменения пластических и прочностных характеристик металлов при воздействии потока заряженных частиц. В частности, одной из актуальных задач этого направления является исследование эффекта электропластичности при облучении металлов электронами с энергией, при которой в дислокационной системе не образуется повышенная концентрация точечных дефектов [3, 4]. Несмотря на значительное количество теоретических работ, механизм воздействия таких электронов на дислокационную систему остается недостаточно изученным и требует проведения значительного объема экспериментальных исследований. С этой целью была создана комплексная установка, основными узлами которой являются линейный резонансный ускоритель электронов и деформационная машина. Установка позволяет проводить *in situ* исследования деформации металлов, облучаемых потоком электронов. Для этого в установке реализована методика оперативного измерения величины потока электронов, падающих на металлический образец, а также методики измерения температуры бесконтактным способом и по величине его электросопротивления.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА УСТАНОВКИ

2.1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА

Основными функциональными системами установки (Рис.1) являются: система формирования ускоренного потока электронов (узлы 8, 9, 10, 11), система активной деформации исследуемого образца (узлы 1, 2, 3, 4), система регистрации действующей нагрузки (узлы 5, 6, 7, 14) и система измерения температуры образца (узлы 12, 13, 14, 15, 16, 17).



*Рис.1. Функциональная блок-схема установки:
1 – испытуемый образец; 2 – электродвигатель;
3 – редуктор; 4 – динамометр; 5 – усилитель;
6 – самопишущий потенциометр; 7 – цифровой запоминающий вольтметр; 8 – резонансный ускоритель электронов; 9 – система измерения тока электронов, оставшихся в образце, и тока электронов, вышедших из образца; 10 – поглощающий экран; 11 – экран радиационной защиты; 12 – инфракрасный пирометр; 13 – камера наблюдения; 14 – персональный компьютер; 15 – источник постоянного тока; 16 – переключатель направления измерительного тока; 17 – нановольтметр*

2.2. УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Ускоренный поток электронов в установке формируется резонансным ускорителем (Рис.2).

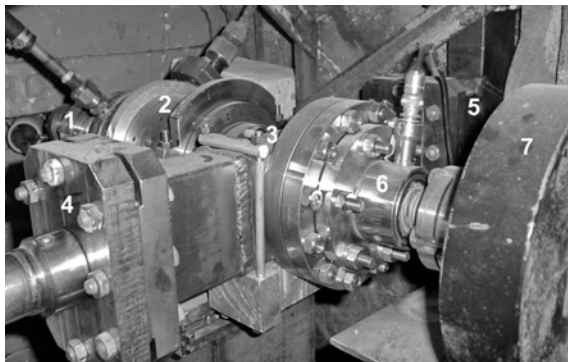


Рис.2. Ускоритель электронов: 1 – источник электронов; 2 – ускоряющая система; 3 – коаксиально-волноводный переход; 4 – волноводный поршень; 5 – волновод ВЧ-питания; 6 – измеритель тока; 7 – аксиальная линза

Формируемый диодной пушкой 1 с анодным напряжением 25 кВ поток электронов группируется и ускоряется в электрическом ВЧ-поле до энергии $W \approx 1$ МэВ в системе из пяти связанных резонаторов 2. Особенностью резонансной системы является экспоненциально возрастающая амплитуда продольного электрического поля, обеспечиваемая особым выбором размеров резонаторов (Рис.3).

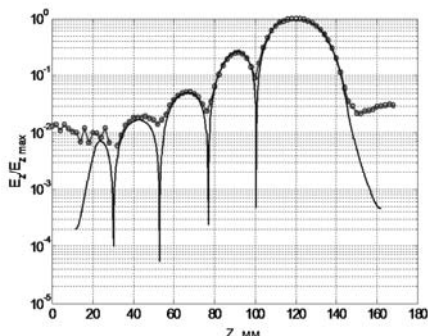


Рис.3. Распределение поля рабочего типа колебаний резонансной системы ускорителя: сплошная кривая – моделирование; кривая с окружностями – измерение

Такое распределение электрического поля позволяет эффективно группировать непрерывный низковольтный поток электронов и ускорять их до релятивистской скорости [5].

Для обеспечения симметрии электрического поля в резонансной системе связь ее с волноводом СВЧ-питания 5 выполнена с использованием коаксиально-волноводного перехода 3. Коэффициент связи β_c регулируется в пределах 3.3...6 без значительного изменения резонансной частоты путем перемещения поршня 4. Для эффективного ускорения электронов с импульсным током до 1 А $\beta_c = 5$.

СВЧ-мощность в ускоряющую систему подается от усилительного клистрона КИУ-12АМ, работающего в режиме автогенератора с внешней обратной связью [6]. При импульсной мощности клистрона до 14 МВт только часть ее подавалась в ускоритель

через регулируемый направленный ответвитель (переходное ослабление -22...-10 дБ). В процессе подготовки исследований длительность импульса ВЧ-мощности $P_{ВЧ}$ составляла ≈ 2 мкс (по уровню 0.1). В связи с необходимостью увеличения потока электронов, возникшей в ходе исследований, длительность импульса $P_{ВЧ}$ была увеличена до 4 мкс. Это было достигнуто путем установки соответствующей формирующей линии в модуляторе клистрона. Для фокусировки пучка использовалась аксиально-симметричная линза 7. Импульсный ток на выходе ускорителя I_n измерялся измерителем тока 6 с погрешностью 4%.

В зависимости от используемого в пушке катода ускоритель может работать в двух режимах: слабotoчном – импульсный ток на выходе пушки 250 мА, и сильноточном – ток на выходе пушки 1.1 А. Подробное описание настройки ускорителя и параметров его пучка в слабotoчном режиме приведено в работе [7]. Деформация металлов исследовалась при работе ускорителя в сильноточном режиме. Согласно расчетным данным в этом режиме на его выходе формируется пучок с $I_n = 0.89$ А и $W = 970$ кэВ. При этом размер пучка (4σ) составляет ≈ 9 мм, а ширина энергетического спектра электронов $\Delta W/W = 4.4\%$ (для 70% частиц). Данные параметры пучка получены при значении $P_{ВЧ} = 1.5$ МВт. В процессе подготовки ускорителя к исследованиям были экспериментально измерены зависимости импульсного тока пучка и энергии электронов от величины $P_{ВЧ}$ (Рис.4).

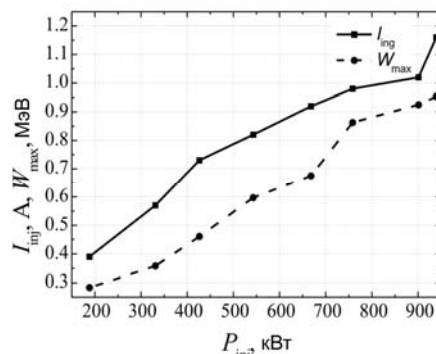


Рис.4. Зависимости тока пучка и энергии электронов от СВЧ-мощности

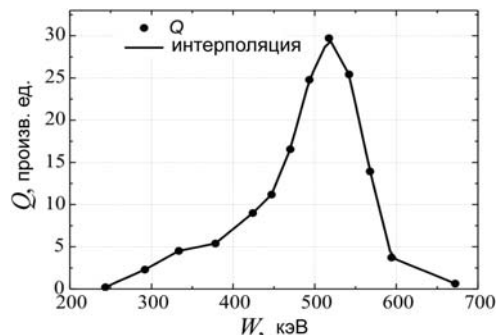


Рис.5. Энергетический спектр электронов

Для предотвращения появления в деформируемых металлах радиационных дефектов энергия электронов должна быть ниже пороговой, которая определяется материалом образца. Энергия частиц изменялась путем изменения величины СВЧ-

мощности, вводимой в ускоряющую систему. Для получения $W=500\pm 50$ кэВ величина импульсной мощности составляет $P_{вч} \cong 500$ кВт. Измеренный энергетический спектр электронов пучка в этом случае представлен на Рис.5. Ширина спектра на полувысоте (FWHM) составляет $\Delta W/W \cong 19\%$.

С выхода ускорителя транспортировка пучка к деформируемому образцу осуществлялась в электропроводе с помощью дублета квадрупольных линз, а также системы корректоров положения пучка (вертикального и горизонтального). Для определения энергии электронов и измерения их энергетического спектра использовался дипольный магнит с цилиндром Фарадея. Погрешность измерения энергии составляет $\pm 0.5\%$.

Электропровод общей протяженностью $\cong 1$ м заканчивается вакуум-плотным окном выпуска пучка, в котором для снижения потерь частиц применена титановая фольга толщиной 30 мкм. Конструкция окна предусматривает установку γ -конвертера (см. Рис.1 (10)).

2.3. ДЕФОРМАЦИОННАЯ МАШИНА

Активное растяжение исследуемого образца осуществлялось в деформационной машине (Рис.6), установленной непосредственно за выпускным окном ускорителя.

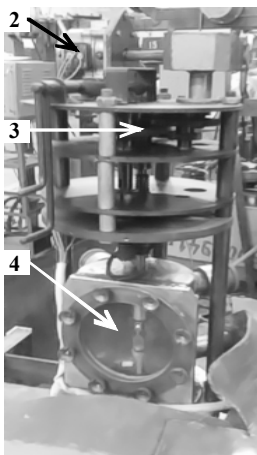


Рис.6. Деформационная машина.

Номера соответствуют обозначениям на Рис.1

Образец деформировался с постоянной скоростью удлинения при помощи электродвигателя 2 через силовой редуктор 3 и измеритель действующего напряжения – динамометр 4. Изменение геометрических размеров динамометра, пропорциональное приложенному усилию, трансформировалось через сбалансированный тензометрический мост в электрический сигнал. Этот меняющийся во времени сигнал разбаланса через усилитель постоянного тока (см. Рис.1 (5)) регистрировался при помощи автоматического электронного потенциометра (см. Рис.1 (6)) либо при помощи цифрового записывающего мультиметра (см. Рис.1 (7)). Чувствительность регистрации напряжения при использовании самопишущего электрометрического потенциометра ЭПП-09 находится в пределах 0.1...1 Н, а при использовании цифрового записывающего мультиметра Sanwa PC520M – в пределах 0.1 Н. Скорость пе-

ремещения штока нагружающего устройства составляет $v=0,5$ мкм·с⁻¹, что соответствует скорости деформации $\varepsilon \cong 2 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹.

Непосредственно в процессе облучения образцы подвергались одноосному нагружению, которое регистрировалось в координатах нагрузка (P) - время (t) с временной инерцией 1 с. Относительное удлинение определялось из соотношения $\varepsilon = vl/l$ (v - скорость перемещения штока, l - длина облучаемой части образца) с чувствительностью 0,1%, деформирующее напряжение - $\sigma = P(1+\varepsilon)/S$ (S - сечение образца) с чувствительностью 0,1 МПа.

3. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ

Для проявления электропластических эффектов величина облучаемого потока электронов ϕ по возможности должна составлять $1 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ и более. В этой связи измерение и оперативный контроль ϕ осуществлялся с помощью специально созданного измерителя (Рис.7).

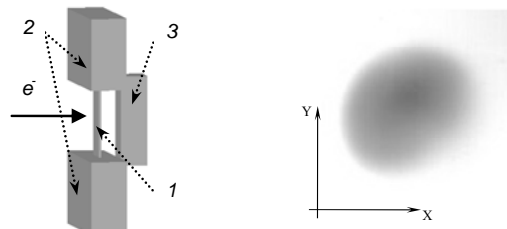


Рис.7. Схема измерителя; Рис.8. Отпечаток пучка:

1 - образец; 2 - захваты;

$\Delta X = 7.95$ мм;

3 - поглотитель

$\Delta Y = 7.03$ мм (FWHM)

Функционально конструкция измерителя представляет собой двойной цилиндр Фарадея (ЦФ), одним элементом которого является сам образец 1, а вторым – медный поглотитель пучка с полным поглощением 3. Размеры этого поглотителя соответствуют размерам облучаемой области на образце. Для корректного измерения ϕ , оседающего на образце, последний был полностью изолирован от захватов 2. С помощью поглотителя контролировался в ходе облучения поток электронов, прошедший через образец, а полный поток электронов измерялся непосредственно перед облучением образца.

Предварительные измерения ϕ и его контроль в процессе облучения показали, что при значениях длительности импульса $3,1 \pm 0,1$ мкс и величины среднего тока $6,5 \pm 0,5$ мкА в плоскости образца величина полного ϕ составила $(1,08 \pm 0,06) \cdot 10^{14}$ с⁻¹. Отпечаток пучка в плоскости образца показан на Рис.8.

3.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦОВ

Условие сохранения дислокационного механизма пластической деформации, не требующего термической активации металла, ограничивает температуру, до которой образец может быть нагрет электронным потоком, до $< 100^\circ\text{C}$. В этой связи максимально возможная температура облучаемых образцов была предварительно оценена путем решения стационарной задачи теплопроводности численными методами. Для расчета составлена двумерная геометрическая модель образца (Рис.9).

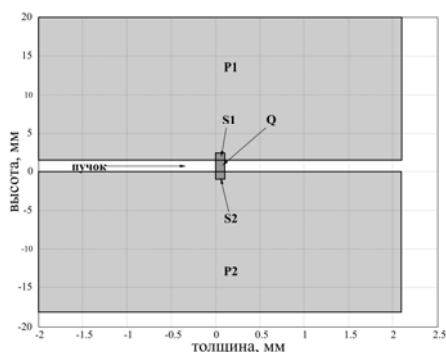


Рис.9. Модель образца: S1, S2, Q – образцы; P1, P2 – захваты

В модели толщина образцов из алюминия (Al) и меди (Cu) принята 0.1 мм. Расчеты проводились для следующих параметров пучка: средняя энергия электронов – 0.4 МэВ, средний ток пучка – 4 мкА. В качестве материала захватов принято железо. Из результатов расчетов следует, что максимальная температура образцов составляет для Al 90°C, а для Cu 85°C (Рис.10).

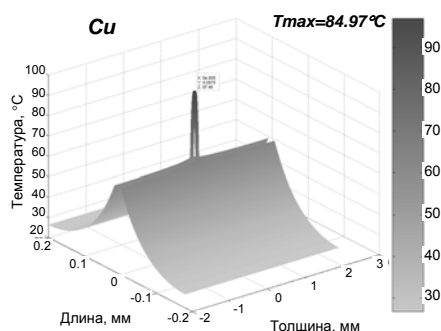


Рис.10. Распределение температуры по образцу

Следует отметить, что в расчетах учитывалось только конвективное охлаждение при температуре окружающего воздуха 22°C, но не учитывались охлаждение образцов за счет излучения и неоднородное распределение потока электронов внутри образца.

В процессе исследования контролировались поверхностная и объемная температуры образца. В первом случае использовался инфракрасный пирометр FLUKE66 (см. Рис.1 (12)). Пирометр был предварительно откалиброван по коэффициенту излучения поверхности исследуемых образцов и погрешность измерений составляла $\pm 1^\circ\text{C}$. Кроме того, в измерения температуры вносилась дополнительная погрешность $\approx \pm 1^\circ\text{C}$, обусловленная точностью наведения оси приемного канала пирометра на образец. В течение сеанса облучения показания пирометра считывались с помощью цифровой камеры (см. Рис.1 (13)) и запоминались в компьютере.

В ходе исследований данным методом была измерена температура образца из меди толщиной 0.19 мм. Данная минимальная толщина образца, использованная в экспериментах, ограничена характеристиками деформационной машины. В результате при непрерывном облучении образца в течение 40...60 минут установлено, что его температура увеличивается на $35 \pm 2^\circ\text{C}$ до максимального стационарного значения $t_{\text{max}} = 60^\circ\text{C}$ за время ≈ 10 минут. Не-

соответствие полученного экспериментального значения t_{max} и результатов расчетов можно объяснить меньшей температурой окружающего воздуха (15°C) во время эксперимента, охлаждением образца за счет излучения, а также несколько большей толщиной образца, чем принятой в расчете.

Внутренняя температура образцов определялась по температурной зависимости электросопротивления металлов. При облучении образцов потоком электронов их электросопротивление измерялось потенциометрическим четырехточечным методом в отсутствие нагрузки на образцах. В измерительную схему (см. Рис.1 (15, 16, 17)) включен переключатель направления измерительного тока для компенсации влияния термоЭДС, возникающей в образце. Чувствительность измерительной схемы по напряжению составила $2 \cdot 10^{-8}$ В. Измеренная таким методом температура t_{max} образцов составила 80°C . В данных измерениях не учитывалась поправка, вносимая за счет нагрева образца измерительным током, которая при малых токах прямо пропорциональна квадрату силы тока [8].

В целом следует отметить, что температурные режимы образцов были выдержаны согласно условиям исследований ($t_{\text{max}} < 100^\circ\text{C}$) без принудительного охлаждения.

4. ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На исследуемые образцы направлялся поток электронов с энергией $W = (0.5 \pm 0.02)$ МэВ и плотностью $\approx 1 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$. Электронный поток состоит из ступок частиц длительностью $\tau_{\text{ст}} = 4 \cdot 10^{-11}$ с, которые следуют с частотой $2.8 \cdot 10^9$ Гц. Ступки объединены в импульсы длительностью $(2 \dots 4) \cdot 10^{-6}$ с, следующие с частотой 25 или 50 Гц.

В экспериментах исследовались образцы из поликристаллического алюминия и меди технической чистоты (99.5%). Образцы имели вид плоскопараллельных пластин с уширениями на концах под захваты деформационной машины и размерами рабочей части $(0.2 \dots 2.5) \times 5 \times 20$ мм и $(0.2 \dots 2.5) \times 4 \times 30$ мм. Удерживаемые захватами деформационной машины образцы располагались на минимально технологически возможном расстоянии (≈ 15 мм) от выпускного окна ускорителя. Воздействие электронного потока на протекание деформации при $T \approx 300$ К осуществлялось в двух режимах: дифференциальном (время облучения составляло 10...100 с) и непрерывном (непрерывное облучение во время деформирования образца от предела текучести до его разрушения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана комплексная установка на основе малогабаритного резонансного ускорителя электронов, предназначенная для изучения воздействия электронного облучения на деформацию металлов. В ускорителе существует возможность изменять ток электронов и их энергию соответственно в пределах 0,15...0,9 А и 0,3...1 МэВ, что обеспечивает возможность исследования деформации металлов, имеющих соответствующее значение энергии обра-

зования радиационных дефектов. При этом пучок имеет удовлетворительные для данных исследовательских спектрально-энергетические характеристики. Первые эксперименты показали [9], что характеристики установки позволяют получить новые данные о воздействии электронов с подпороговой энергией на пластичность металлов.

Работа выполнена при поддержке фонда УНТЦ, грант №4368.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.V. Mishin. Advances in X-Band and S-Band Linear Accelerators for Security, NDT, and Other Applications // *Proc. of the 2005 Particle Accelerator Conference*. May 16-20, Knoxville, Tennessee, USA, p.240-244.
2. M.F. Vorogushin, Yu.N. Gavrish. Accelerators for Non-destructive Inspection of the Nuclear Reactor Equipment // *Proc. of the RuPAC*. Novosibirsk, Russia, 2006, p.132-134.
3. В.И. Спицын, О.А. Троицкий. Электропластический эффект в металлах // *Вестник РАН*. 1974, №11, с.10-15.
4. В.И. Спицын, О.А. Троицкий. Исследование электронного воздействия на пластическую деформацию металлов // *Металлофизика*. *Республиканский Межведомственный сборник*. Киев: "Наукова думка". 1974, в.51, с.18-45.
5. M.I. Ayzatskiy, K.Yu. Kramarenko, S.A. Perezhugin Bunching System Based on the Evanescent Waves // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2001, №3 (38), p.83-85.
6. В.И. Белоглазов, В.А. Вишняков, И.А. Гришаев и др. Использование клистронного автогенератора на двухсекционном ускорителе // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Линейные ускорители»*. 1976, №1 (2), с.18-19.
7. Н.И. Айзацкий, П.Г. Гуртовенко, В.Ф. Жигло и др. Компактный инжектор электронов для линейного резонансного ускорителя 10 см-диапазона // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №3 (49), с.68-72.
8. О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. *Тепловые и температурные измерения*. Киев: "Наукова думка", 1965, с.80-84.
9. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир и др. Воздействие высокоэнергетичного пучка электронов на пластическую деформацию металлов // *Наст. вып.*, с.140-144.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

THE FACILITY FOR THE RESEARCH OF ELECTRON FLUX EFFECT ON DEFORMATION OF METALS

M.I. Ayzatskiy, A.N. Dovbnya, V.I. Dubinko, V.F. Zhiglo, A.I. Kosoy, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, S.A. Perezhugin, D.L. Stepin, I.V. Khodak, V.P. Lebedev, V.S. Krylovskiy, S.V. Lebedev

The integrated accelerating facility based on the compact accelerator with electron energy up to 1 MeV and with a pulse current up to 1 A was constructed for the research of the effect of free high-energy electron flux on a dislocation system of metals. Beside the accelerator the facility includes a deformation machine for active tension with a device for the operating loading registration, remote devices for the measuring of a surface and body temperature of metallic samples. The deformation of aluminum and copper samples was researched both in differential mode with exposing time 10...100 s and in the continuous one. The modification of strength and plastic performances of samples was defined by the analysis of deformation hardening curves of metals.

УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ ПОТОКУ ЕЛЕКТРОНІВ НА ДЕФОРМАЦІЮ МЕТАЛІВ

М.І. Айзацький, А.М. Довбня, В.І. Дубінко, В.Ф. Жигло, А.І. Косой, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, С.А. Пережогін, Д.Л. Стьопін, І.В. Ходак, В.П. Лебедєв, В.С. Криловський, С.В. Лебедєв

Для вивчення впливу потоку вільних високоенергетичних електронів на дислокаційну систему металу була створена комплексна прискорювальна установка на основі малогабаритного прискорювача електронів з енергією до 1 MeV і імпульсним струмом до 1 А. Крім прискорювача установка включає деформаційну машину для активного розтягування з пристроєм реєстрації діючого навантаження, дистанційні вимірники поверхневої і об'ємної температур металевих зразків. Вивчення протікання деформації алюмінію і міді проводилося в двох режимах дії пучка: диференціальному режимі з часом опромінювання 10...100 с і безперервному. В результаті аналізу кривих деформаційного зміцнення металів встановлена зміна характеристик міцності і пластичності зразків.