

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ 0,5 МэВ НА ДЕФОРМАЦИЮ СПЛАВА Э110 В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 10...300°C

*В.И. Дубинко¹, В.А. Кушнир¹, И.В. Ходак¹, В.М. Грицина¹, П.Н. Остапчук²,
В.П. Лебедев³, С.В. Лебедев³*

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

²*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,
Харьков, Украина;*

³*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

Изучено воздействие электронного пучка с энергией 0,5 МэВ и плотностью потока $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на деформацию поликристаллического сплава Э110 (сплав Zr-1 %Nb российского производства) при одноосном растяжении со скоростью $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и релаксацию напряжений в интервале температур 10...300°C. В режимах кратковременного (10...60 с) и непрерывного облучения определены: начальное снижение уровня деформирующего напряжения, коэффициент упрочнения, прочностные и пластические характеристики сплава.

1. ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование циркониевых сплавов в ядерной энергетике [1] стимулирует развитие исследований механических, структурных, теплофизических и др. характеристик в широком интервале температур при наличии и отсутствии фактора различных видов облучения.

Проведенные ранее механические испытания Al, сплава Al-3 %Mg, Cu показали, что в процессе высокоэнергетичного электронного облучения происходит снижение уровня деформирующего напряжения, изменение характера протекания пластического течения, значительное увеличение ресурса пластичности и др. [2-4].

Для расширения перечня перечисленных объектов, подвергнутых электронно-индуцированному воздействию, были изучены механические свойства промышленного сплава Э110 в температурном интервале 10...300°C.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Механические испытания с одновременным воздействием электронного облучения проводили на образцах сплава Э110, которые представляли собой плоскопараллельные пластины с размерами рабочей части $0,7 \times 4 \times 30$ мм с уширениями на концах под захваты разрывной машины. Пластины были получены разрезанием и выпрямлением промышленной трубчатой заготовки. Нормализующий отжиг производили в вакууме при $T = 500^\circ\text{C}$ в течение 3 ч, что создавало размер зерна поликристаллической структуры $\sim 4 \dots 6$ мкм.

Механические испытания с одновременным воздействием электронного облучения проводили по ранее описанной схеме [5] с добавлением к ней электронагревательного элемента, который позволял варьировать температуру в интервале 10...300°C.

Блок-схема экспериментальной установки для испытаний материалов в режиме нагружения с постоянной скоростью деформирования и релаксации напряжения для температурного интервала 10...300°C

при наличии и отсутствии высокоэнергетичного электронного облучения приведена на Рис.1.

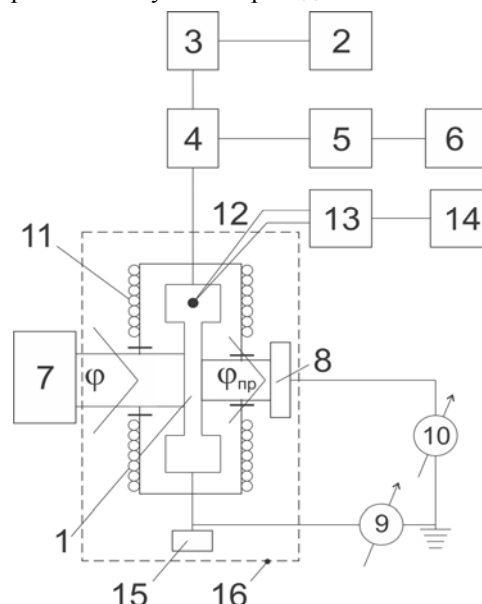


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки:

- 1 – испытуемый образец; 2 – электродвигатель;
- 3 – механический редуктор; 4 – динамометр;
- 5 – фотоусилитель постоянного тока;
- 6 – электронный самопитающийся потенциометр;
- 7 – резонансный ускоритель электронов;
- 8 – цилиндр Фарадея; 9, 10 – измерители начального ϕ и прошедшего $\phi_{пр}$ потока электронов;
- 11 – электронагревательный элемент с окнами ввода и вывода электронного пучка;
- 12 – термопара; 13 – нановольтметр; 14 – ПК;
- 15 – механическая опора нагружающего устройства;
- 16 – защитный свинцовый экран

Диagramму нагружения образца регистрировали в координатах «нагрузка (P)-время (t)» с разрешением 1 с (электронный потенциометр ЭПП-09) и 0,3 с (запоминающий цифровой мультиметр Sanwa PC 520M). Чувствительность регистрации составляла 0,5 Н. Затем нагрузка P пересчитывалась в деформи-

рующее напряжение по соотношению $\sigma = P(1+\varepsilon)/S$ (S – начальное сечение образца, ε – его относительное удлинение).

При равномерном перемещении штока разрывной машины относительную деформацию образца определяли как $\varepsilon = v_{шт} \cdot t/L$ ($v_{шт} = 4 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$ – скорость перемещения штока; L – начальная длина рабочей части образца) с погрешностью $\pm 0,1 \%$.

В процессе деформирования сплава при температурах 20...300°C использовали внешний электронагреватель с окнами для входа и выхода электронного пучка. Изменение температуры образца за счет внешнего нагревательного устройства определяли при помощи термопары медь-константан с погрешностью $\Delta T = \pm 1^\circ\text{C}$.

Электронный пучок с энергией $E = 0,5 \text{ МэВ}$ и плотностью потока $\phi = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (мощность излучения $\sim 3 \text{ Вт}$) от линейного ускорителя «Резонанс» направлялся на поверхность рабочей части образца. При этом электроны имели однородное распределение на площади $\sim 7 \dots 8 \text{ мм}^2$.

Микросгустки электронов длительностью $\tau_{сг.} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ с}$ следовали с частотой $3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ в пакете длительностью $\tau_{пак.} = (2 \dots 4) \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Частота следования пакетов составляла 25 Гц [5].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Облучение образца непосредственно во время механических испытаний производили в двух режимах: дифференциальном (ДР) и непрерывном (НР). В случае ДР время облучения варьировалось в пределах $\sim 10 \dots 60 \text{ с}$, а при НР-облучении – от начала до конца деформирования.

Дифференциальный режим облучения (ДР)

Воздействие высокоэнергетичного электронного облучения на пластическую деформацию сплава Э110 при температуре окружающей среды $T \sim 10^\circ\text{C}$ проводили в режиме циклической смены состояний: без электронного потока ($\phi = 0$) и при его наличии ($\phi \neq 0$). Для нахождения оптимального времени облучения в ДР использовали разные времена экспозиции.

На Рис.2 показан участок кривой деформирования в координатах «нагрузка P –время t » с чередованием состояний с $\phi = 0$ и $\phi \neq 0$. При временах экспозиции $t < 20 \text{ с}$ происходит линейное во времени снижение нагрузки. При больших временах выдержки под электронным пучком присутствуют все характерные стадии развития скачка разупрочнения ($\phi \neq 0$) и его восстановления ($\phi = 0$).

Поскольку в результате неупругого рассеяния энергии потока электронов в металле возможно дополнительное термическое воздействие на кристаллическую решетку, то одновременно с регистрацией кривой нагружения $P(t)$ проводили контроль температуры деформируемого образца (медь-константановая термопара размещалась на недеформируемой лопатке и была защищена от прямого действия электронного пучка).

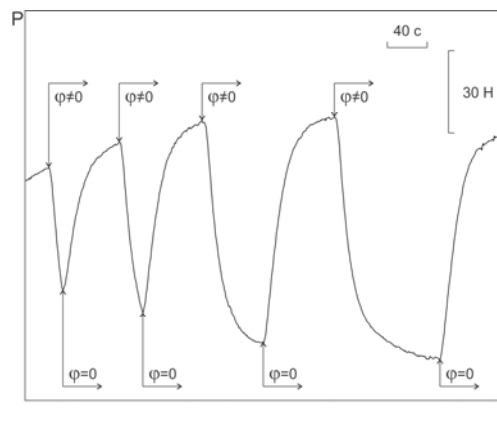


Рис.2. Скачки нагрузки для разных времен электронного облучения сплава Э110 ($E = 0,5 \text{ МэВ}$, $\phi = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, температура окружающей среды – 10°C)

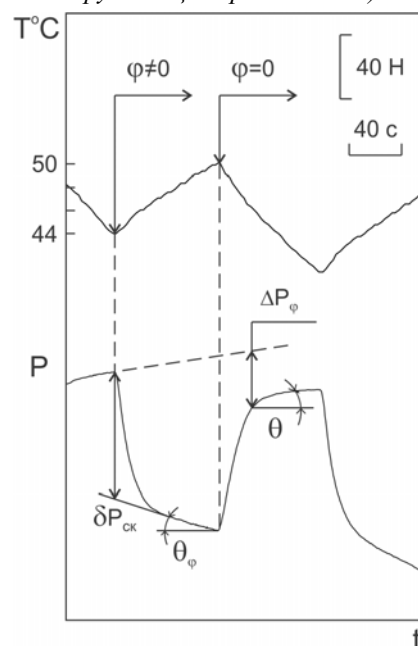


Рис.3. Ход кривой $P(t)$ при одиночном цикле включения ($\phi \neq 0$) и выключения ($\phi = 0$) электронного потока, а также изменение температуры образца T во времени

Одновременная регистрация хода $P(t)$ и температуры образца при одиночном цикле включения ($\phi \neq 0$) и выключения ($\phi = 0$) электронного потока (Рис.3) указывает на то, что изменения параметров скачка нагрузки (первичного разупрочнения $\delta P_{ск}$, коэффициента деформационного упрочнения θ и θ_ϕ , невозврата нагрузки ΔP_ϕ) не в полной мере повторяют ход $T(t)$. Поскольку во время облучения температура возрастает по линейному временному закону (ΔT составляет $\sim 5^\circ\text{C}$), а ход $\Delta T(t)$ и $P(t)$ по форме не коррелирует между собой, то вклад термической активации в разупрочнение сплава не является определяющим.

Помимо изучения процессов деформационного разупрочнения/упрочнения сплава Э110 в режиме активного нагружения возможно изучать воздействие электронного облучения в режиме релаксации напряжений (сумма скоростей упругого и пластического течения постоянна) (см. Рис.3).

Остановка штока деформирующего устройства позволяет проследить за релаксацией внутренних напряжений, связанных с движением отдельных дислокационных групп и перестройкой дефектной структуры металла, во времени при включении/выключении электронного облучения.

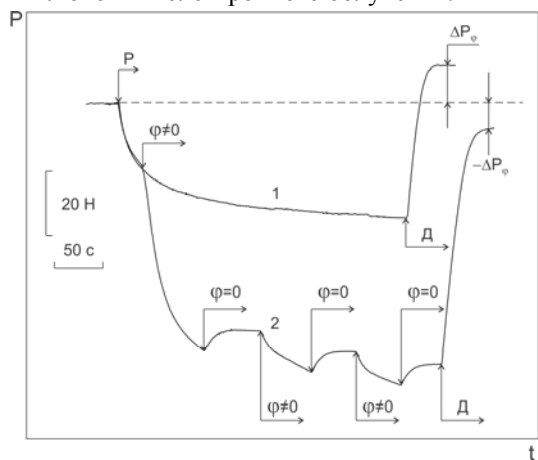


Рис.4. Сопоставление совмещенных кривых релаксации нагрузки при отсутствии ($\varphi = 0$) (1) и наличии циклов включения/выключения (2) электронного потока. Обозначения P и Д соответствуют режимам релаксации нагрузки и активного нагружения

Кривая релаксации напряжения $P(t)$ в состоянии с $\varphi = 0$ характеризуется монотонным спадом приложенной нагрузки во времени, и при переходе в режим активной деформации имеет место упрочнение на $\Delta P > 0$ (зависимость 1, Рис.4).

В том случае, когда релаксация начинается с состояния $\varphi = 0$, а затем в какой-то момент времени включается электронное облучение ($\varphi \neq 0$), наблюдается резкий спад нагрузки (кривая 2, Рис.4). Последующие циклы включения/выключения электронного потока сопровождаются обратимым спадом и увеличением нагрузки на образце. При переходе к активному нагружению исходный уровень нагрузки не достигается ($\Delta P_\varphi < 0$).

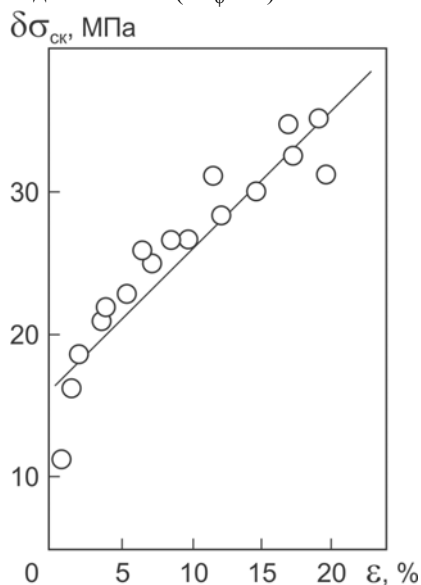


Рис.5. Изменение скачка $\delta\sigma_{ск}$ в зависимости от ε ($E = 0,5 \text{ МэВ}$, $\varphi = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, температура окружающей среды 10°C)

Приведенные зависимости $P(t)$ указывают на то, что электронное облучение приводит к обратимым (динамика дислокаций, упругие модули) и необратимым (перестройка дефектной структуры) процессам в кристаллической структуре сплава Э110.

Изменение первичного скачка разупрочнения $\delta\sigma_{ск}$ сплава Э110 в зависимости от степени относительного удлинения ε показано на Рис.5.

Скачок разупрочнения $\delta\sigma_{ск}$ имеет место уже на пределе текучести ($\varepsilon_{пл.} \approx 0$); $\delta\sigma_{ск}$ – линейная функция степени относительного удлинения (диапазон изменения составляет 18...35 МПа) – на уровне; $\varepsilon \sim 20\%$ относительное изменение деформирующего напряжения составляет $\delta\sigma_{ск}/\sigma \sim 10\%$ (см. Рис.5).

Непрерывный режим облучения (НР)

Поскольку при ДР-облучении используется ограниченное время воздействия электронного пучка, деформацию сплава Э110 проводили также в режиме непрерывной реализации состояний $\varphi = 0$ и $\varphi \neq 0$.

На Рис.6 показаны кривые деформационного упрочнения $\sigma(\varepsilon)$ (σ – деформирующее напряжение, ε – относительное удлинение) поликристаллических образцов Э110 в отсутствие ($\varphi = 0$) (кр. 1) и при наличии ($\varphi \neq 0$) (кр. 2) электронного потока.

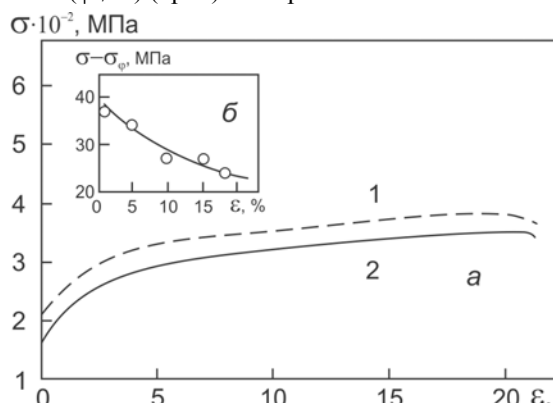


Рис.6. Диаграммы деформирования $\sigma(\varepsilon)$ образцов Э110 при отсутствии ($\varphi = 0$) (кр.1) и наличии ($\varphi \neq 0$) (кр.2) электронного облучения ($E = 0,5 \text{ МэВ}$, $\varphi = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, температура окружающей среды 10°C) (а). Различие $(\sigma - \sigma_\varphi)$ как функция ε (б)

Приведенные на Рис.6,а кривые $\sigma(\varepsilon)$ (только пластическая область деформаций) свидетельствуют о том, что электронное облучение в непрерывном режиме снижает деформирующее напряжение во всем диапазоне деформаций, также уменьшает ресурс пластичности сплава. Величина $(\sigma - \sigma_\varphi)$ находится в пределах 50...30 МПа и спадает с увеличением ε (Рис.6,б), а относительное изменение $(\sigma - \sigma_\varphi) / \sigma$ составляет ~ 30 и $\sim 9\%$ соответственно вблизи пределов текучести и прочности металла.

Характеристикой, определяющей интенсивность накопления и взаимодействия деформационных дефектов в кристаллической решетке металла, является величина коэффициента деформационного упрочнения ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$).

На Рис.7 приведены значения θ для сплава Э110 при режимах циклического чередования состояний с $\varphi = 0$ (кр. 1) и $\varphi \neq 0$ (кр. 2), а также при непрерывном облучении (∇) и без него (\square) (кр. 3) в зависимости

от степени деформации. Как следует из Рис.7, коэффициент упрочнения уменьшается с ростом ε , всегда $\theta > \theta_\phi$, в дифференциальном режиме для $\varepsilon > 10\%$ коэффициент $\theta_\phi < 0$ и относительное снижение составляет $(\theta - \theta_\phi) / \theta \approx 75\%$.

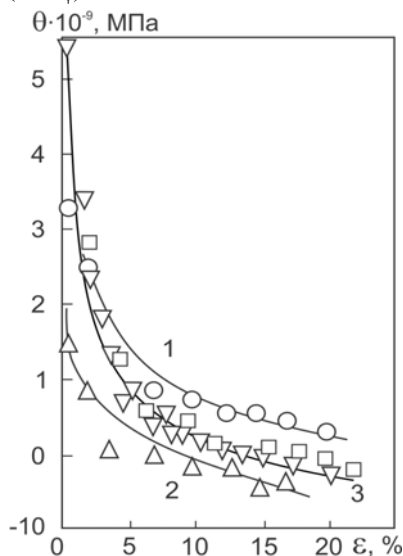


Рис.7. Зависимость коэффициента деформационного упрочнения θ от ε сплава Э110 для циклических изменений состояний с $\phi = 0$ (кр.1) и $\phi \neq 0$ (кр.2), а также при деформировании в отсутствие (\square - $\phi = 0$) и при наличии непрерывного облучения (∇ - $\phi \neq 0$) (кр. 3)

Для непрерывного режима облучения величина коэффициента деформационного упрочнения также снижается с ростом ε , но различие в θ в состояниях с $\phi = 0$ и $\phi \neq 0$ находится в пределах погрешности эксперимента (см. Рис.7).

Сопоставление коэффициентов упрочнения для деформирования образцов Э110 в разных режимах электронного облучения указывает на более низкий уровень θ_ϕ в дифференциальном режиме по сравнению с непрерывным режимом облучения.

Как следует из Рис.6, различие в уровнях деформирующего напряжения может быть связано с различными условиями формирования дефектной структуры сплава в состояниях $\phi = 0$ и $\phi \neq 0$. Тогда при дифференциальном режиме облучения изменение θ будет характеризовать скорость перехода от одной дефектной структуры к другой при циклической смене состояний с $\phi = 0$ и $\phi \neq 0$.

Температурные зависимости пределов текучести σ_0 и прочности σ_b , а также ресурса пластичности $\varepsilon_{пл}$ сплава Э110 при отсутствии ($\phi = 0$) и наличии ($\phi \neq 0$) электронного облучения показаны на Рис.8.

Независимо от наличия или отсутствия электронного облучения величины σ_0 , σ_b и $\varepsilon_{пл}$ снижаются с увеличением температуры испытания. Аналогичный ход σ_0 , σ_b , $\varepsilon_{пл}$ (Т) наблюдали в работе [6]. Однако, в работе [7] приведено возрастание ресурса пластичности с повышением температуры деформирования.

Для образцов Э110 при отсутствии электронного облучения пределы текучести (кр. 1) и прочности (кр. 2) в температурном интервале от 20 до 300°C уменьшаются соответственно от 210 до 100 МПа и от 400 до 280 МПа (см. Рис.8).

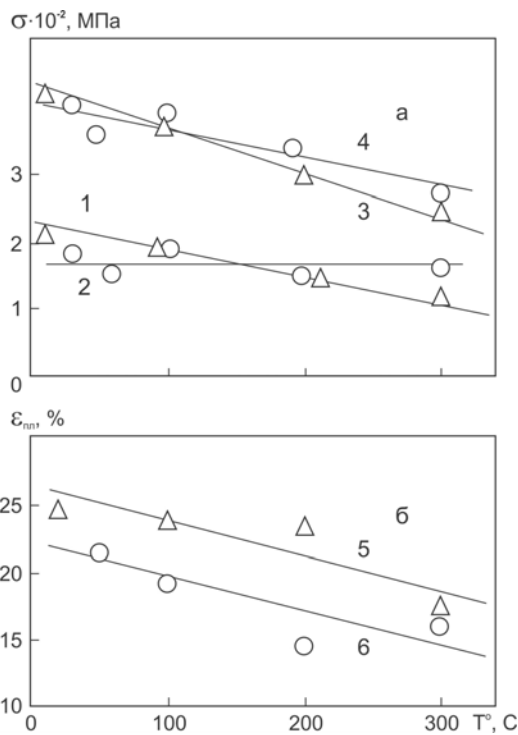


Рис.8. Температурные зависимости пределов текучести σ_0 (1,2) и прочности σ_b (кр. 3, 4) (а), а также ресурса пластичности $\varepsilon_{пл}$ (кр. 5, 6) (б) сплава Э110. Зависимости (кр. 1, 3, 5) соответствуют $\phi = 0$, а (кр. 2, 4, 6) - $\phi \neq 0$

В результате электронного облучения в температурном интервале 20...120°C σ_0 и σ_b меньше, чем в состоянии с $\phi = 0$. При $T > 150^\circ\text{C}$ возникает обратная ситуация, когда σ_0 ($\phi = 0$) $<$ σ_0 ($\phi \neq 0$) и σ_b ($\phi = 0$) $<$ σ_b ($\phi \neq 0$) (см. Рис.8,а).

В температурном интервале 20...300°C ресурс пластичности сплава Э110 также чувствителен к электронному облучению (см. Рис.8,б). Высокоэнергетичное электронное облучение снижает пластические свойства сплава (для $T = 100^\circ\text{C}$ $\Delta\varepsilon_{пл} / \varepsilon_{пл}$ ($\phi = 0$) $\approx -20\%$). Изменение пластичности сплава Э110 под действием электронного облучения существенно отличается от его действия на технически чистые Al, Cu и сплавы Al-Mg, у которых электронное облучение увеличивает $\varepsilon_{пл}$.

Приведенные экспериментальные результаты позволяют сформулировать следующие основные особенности воздействия электронного облучения с энергией $E = 0,5$ МэВ на пластическую деформацию промышленного сплава Э110 в интервале температур 20...300°C:

- в процессе активной деформации металла кратковременный поток высокоэнергетичных электронов приводит к скачкообразному снижению деформирующего напряжения и коэффициента деформационного упрочнения;

- испытания в режиме релаксации напряжения указывают на то, что движущиеся электроны уменьшают силу динамического торможения дислокаций, эффективный модуль упругости и способствуют перестройке дефектной структуры;

- температурные зависимости пределов текучести и прочности в интервале 150...300°C свидетельствуют об неаддитивности механизмов термоакти-

вированного и радиационно-индуцированного воздействия на прочностные характеристики;

- введение тяжелых атомов в кристаллическую решетку ухудшает пластические свойства материала при наличии облучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов УНТЦ-НАНУ № 4962; №5497.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.В. Никулина. Циркониевые сплавы в атомной энергетике // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004, №11, с.8-12.
2. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков. Воздействие высокоэнергетичного пучка электронов на пластическую деформацию металлов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №3(54), с.140-144.
3. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков. Пластическая деформация алюминия в режиме непрерывного электронного облучения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2010, №5(55), с.43-49.
4. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков. Воздействие элек-

тронного облучения на скачкообразную деформацию сплава Al-3%Mg // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2010, №5(55), с. 36-42.

5. Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня, В.И. Дубинко, В.Ф. Жигало, А.И. Косой, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, С.А. Пережогин, Д.Л. Степин, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев. Установка для исследования воздействия потока электронов на деформацию металлов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №3(54), с.145-149.
6. А.И. Стукалов. Особенности радиационного упрочнения и ползучести СВЧ-термообработанных сплавов Zr-Nb // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* (77). 1999, №2, с.33-41.
7. Е.В. Карасева, В.И. Соколенко, Я.Д. Стародубов, В.С. Вахрушева, Т.А. Дергач. Механические свойства и ползучесть образцов из трубокочек ТВЭЛ из сплава Zr-1Nb в температурном интервале 77...650 К // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* (86). 2005, №3, с.94-97.

Статья поступила в редакцию 18.04.2012 г.

EFFECT OF IRRADIATION WITH 0.5 MeV ELECTRONS ON PLASTIC DEFORMATION OF THE ALLOY E110 IN THE TEMPERATURE RANGE OF 10 TO 300°C

V.I. Dubinko, V.A. Kushnir, I.V. Hodak, V.M. Grytsyna, P.N. Ostapchuk, V.P. Lebedev, S.V. Lebedev

Plastic deformation of polycrystalline E110 alloy was investigated directly under irradiation with 0,5 MeV electron beam with a flux of $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Different regimes were tested: short time (10...60 s) and continuous irradiation under uniaxial tensile deformation at a rate of $2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ and the stress relaxation in the temperature range of 10 to 300°C. The yield stress and hardening coefficient was determined as well as the strength and plasticity limits.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ З ЕНЕРГІЄЮ 0,5 MeV НА ДЕФОРМАЦІЮ СПЛАВА E110 В ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР 10...300°C

В.І. Дубінко, В.А. Кушнір, І.В. Ходак, В.М. Грицина, П.М. Остапчук, В.П. Лебедев, С.В. Лебедев

Вивчено вплив електронного пучка з енергією 0,5 MeV та щільністю потоку $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на деформацію полікристалічного сплаву E110 (сплав Zr-1%Nb російського виробництва) при одновісному розтягненні зі швидкістю $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ та релаксацію напружень в інтервалі температур 10...300°C. В режимах короткочасного (10...60 с) та безперервного опромінення визначені: початкове зниження рівня деформуючого напруження, коефіцієнт зміцнення, міцнісні та пластичні характеристики сплаву.