

ОСОБЛИВОСТІ МІКРОПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ АУКСЕТИЧНОГО БЕРИЛІЮ, ОПРОМІНЕНОГО ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

М.Д. Раранський, А.В. Олійнич-Лисюк, О.Ю. Ташук
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича
Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук, Чернівці, Україна
E-mail: sashatahuk@gmail.com; тел. +38-099-170-53-13

Методом низькочастотного внутрішнього тертя (НЧВТ) (1...3 Гц), дослідженням поведінки динамічного модуля кручення (G_{ef}) та шляхом математичного моделювання руху дислокацій вивчали мікропластичну деформацію в природно зістареному та опроміненому високоенергетичними (18 MeV) електронами ауксетичному берилії. З ростом дози опромінення виявили збільшення внутрішнього тертя та швидкості руху дислокацій у 2–3 рази. Встановили стадійний характер мікропластичної деформації ауксетичного Ве. Шляхом математичного моделювання показали, що в опроміненому матеріалі деформація протікає за рахунок прискореного руху двійникових дислокацій на початковій стадії, який змінюється аномальним динамічним гальмуванням повних дислокацій при наростанні ступеню деформації на другій стадії. Показано, що теоретично оцінені величини добре збігаються з експериментально визначеними.

Берилій, добре відомий конструкційний матеріал, який широко використовується в атомній, термоядерній та космічній галузях промисловості [1], постійно працює в умовах інтенсивного високоенергетичного опромінення (нейтронного, електронного, гамма), тому проблема стабілізації його механічних характеристик у процесі експлуатації залишається першочерговим завданням матеріалознавців. Задача ускладнюється крихкістю цього гексагонального металу в області кімнатних температур, природа якої на сьогодні залишається не до кінця з'ясованою [2]. Не дивлячись на значну кількість публікацій, серед яких лівова частка належить дослідженням радіаційного впливу нейтронів на механічні властивості берилію, вивчення впливу опромінення високоенергетичними електронами свідчить про різну дію низькоенергетичного та високоенергетичного опромінення на його механічні властивості, іноді кардинально протилежну [3–5], тому продовжує залишатись актуальним. Так, автори [3] описують причини крихкого руйнування Ве після опромінення низькоенергетичними (~ 520 кеВ) сильно-струмовими потоками електронів [3], які еквівалентні флюенсам $\Phi_e \sim 1,25 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ та енергопотоків $\sigma \sim 1,04 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^2$, та вказують, що термомеханічні напруги, які виникають у Ве в процесі опромінення, можуть перевищувати його міцність. В той же час в роботах [4, 5] досліджували Ве, який опромінений високоенергетичними електронами з енергією ~ 18 MeV, флюенсом $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ та $\sigma \sim 1,44 \cdot 10^6 \text{ Дж/см}^2$, і наводять докази на користь пластифікації цього металу. Не до кінця з'ясованими на сьогодні залишаються також самі механізми пластифікації металів при опроміненні високоенергетичними електронами [6]. На сьогодні, до прикладу, в наукових колах одночасно існують кілька гіпотез, які намагаються пояснити це явище. Це і гіпотеза «електронного вітру», і гіпотеза про утворення в процесі опромінення фокусонів, які взаємодіють з тепловими коливаннями ґратки

фононами, розсіюючись на них, і уявлення про створення і поширення в кристалі радіаційно-індукованих сильнонелінійних електронних збурень – дискретних бризерів чи квудонів [7, 8], які не взаємодіють ні з фононами, ні з фокусонами, але при взаємодії з лінійними дефектами приводять до відриву дислокацій від стопорів, пластифікуючи таким чином метал. Кожна із вказаних гіпотез має свої переваги та недоліки, але жодна не може повністю пояснити спостережувані явища [8]. Слід зазначити також, що збурення електронної підсистеми в металах може протікати шляхом зміни енергетичних характеристик електронів Фермі та зміни топології поверхні Фермі і, таким чином, приводити до появи механічних аномалій [9, 10]. І, на кінець, берилій належить до матеріалів з аномальними деформаційними властивостями: в різних областях температур він проявляє схильність до ауксетичної деформації різного типу [11]. Наразі не відомо, як впливає опромінення високоенергетичними частинками на характер ауксетичності берилію, тому нашу роботу було присвячено вивченню впливу опромінення високоенергетичними електронами на мікропластичну деформацію Ве-конденсату при температурах, які відповідають неаксіальному типу ауксетичності в неопроміненому стані з метою виявлення можливих шляхів пластифікації цього металу.

ДЕЯКІ ТЕОРЕТИЧНІ МІРКУВАННЯ

Явище пластифікації металів при деформації в процесі електронного опромінення відоме з 60-х років минулого століття і дістало назву електронно-пластичної деформації (ЕПД) [6]. Водночас зміну механічних властивостей металів при опроміненні електронами можна розглядати і з позицій протікання в них струмів високої щільності, які також можуть приводити до їх пластифікації [8, 12]. Так, при пропусканні імпульсного струму густиною $50 \dots 1000 \text{ А/мм}^2$ і тривалістю 10^{-4} с через

кристалічний вісмут спостерігається перерозподіл двійників у центрах прикладання напруг. Порівняння картин деформації зразків у випадках при пропусканні струму і без пропускання показують, що при сумісній дії електричних і механічних напруг відбувається стимулювання пластичної деформації металу двійникуванням. З ростом густини струму збільшуються здвійникований об'єм і площа границь розділу двійників. Це відбувається за рахунок двох факторів: стимулювання пробігу згенерованих двійникових дислокацій, які утворюються при дії зосередженого навантаження і розвиваються під дією імпульсного струму, та збурення нових джерел двійникових дислокацій в момент проходження струму. Імпульсні струми, що проходять через кристал під час деформації, сприяють процесові трансляції двійників вздовж головних поверхонь розділу і збурюють нові дислокаційні джерела. Зі збільшенням числа імпульсів спостерігається згасання двійникування, що є достатнім ступенем релаксації внутрішніх напруг у дислокаційних скупченнях. При досягненні вершиною двійника границь кристала, де рівень напруг малий, процес двійникування припиняється [12].

Інтенсивність двійникування в умовах зовнішньої енергетичної дії супроводжується появою нового каналу реалізації двійникування, що призводить до інтенсивного розмноження дислокацій, які двійникуються на границях розділу, що, в свою чергу, веде до колективної взаємодії гвинтових складових двійникових дислокацій з перешкодами. Релаксація внутрішніх напруг відбувається за рахунок розвитку нових двійників у енергетично вигідному для них напрямку, на скупченнях двійникових дислокацій. Зароджуючись у місцях концентрації напруг, двійники послаблюють дислокаційні скупчення, що призводить до зменшення вірогідності крихкого руйнування матеріалу [12].

На відміну від високоенергетичного опромінення вісмуту, обробка берилію високоенергетичними електронами в широкому діапазоні енергій (до 2 GeV) призводить до крихкого розтріскування Be [13]. Відповідно до уявлень, що представлені в роботі [13], утворення дефектів за рахунок пружного і непружного розсіяння високоенергетичних електронів у Be подібне до радіаційного пошкодження, яке спостерігається при опроміненні нейтронами і призводить до розупорядкування і крихкості досліджуваних зразків. Радіаційне розпухання спричинене утворенням в об'ємі кристала пор, які з'являються через надлишок вакансій, що в кристалі є джерелом макроскопічних напруг розтягу, що, у свою чергу, ініціюється дифузійною вакансій та їх об'єднанням у пори. При цьому напруги, що виникають в об'ємі кристала, перевищують межу текучості Be. Це спричиняє появу тріщин у приповерхневому шарі та руйнування матеріалу [13].

В той же час дослідження пружних та непружних властивостей Be, який зазнав опромінення високоенергетичними (~ 18 MeV,

$\Phi_e = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) електронами, вказують на руйнування дислокаційно-домішкових атмосфер та значне підвищення рухливості дислокацій за рахунок їх відриву від закріплюючих дефектів [4, 5, 14], що свідчить на користь припущення про пластифікуючу дію високоенергетичних електронів. Однак механізм цієї пластифікації залишився не до кінця зрозумілим, оскільки автори [4, 5] вважали, що частина розсіяної електронами дислокаційної атмосфери «переходить в ядро дислокацій, спричиняючи осциляції на часових залежностях внутрішнього тертя» [4]. Але такий процес мав би приводити до зменшення рівня поглинання пружної енергії через зменшення рухливості обважнених дислокацій та росту ефективного модуля пружності G_{ef} . На практиці спостерігали зростання рівня поглинання пружної енергії, яке супроводжувалось повною незалежністю від часу модуля G_{ef} . Таким чином, роботи, які присвячені вивченню впливу опромінення високоенергетичними електронами на дислокаційно-домішкову структуру Be, в науковій літературі є доволі суперечливими, а дослідження можливого впливу опромінення на ауксетичні властивості цього матеріалу, наскільки нам відомо, не проводились.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Наша робота присвячена вивченню особливостей мікропластичної деформації опроміненого високоенергетичними електронами (~ 18 MeV) неаксіально ауксетичного Be методом низькочастотного внутрішнього тертя (НЧВТ) з метою виявлення можливих механізмів впливу β -променів на його механічні властивості.

Метод НЧВТ був вибраний в якості інструмента для вивчення механізмів взаємодії потоків високоенергетичних частинок з ґраткою через його високу чутливість до дислокаційно-домішкової взаємодії, можливість отримання багатопланової інформації про основні характеристики дислокаційних структур у кристалах, зокрема про динамічні властивості дислокацій [15].

Дослідження поглинання пружної енергії внутрішнього тертя (ВТ) та динамічного модуля зсуву (G_{ef}) проводили на модернізованому релаксометрі типу зворотний крутильний маятник на частотах ~ 1...3 Гц у вакуумі ~ 10^{-3} Па [16] за методиками, що описані в [16]. Відношення швидкостей руху дислокаційно-дисклінаційних структур (ДДС) у процесі мікропластичної деформації визначали за методиками, які описані в [17].

Досліджувались зразки трьох груп: №1 – зразки, природно зістарені впродовж тривалого часу після їх виготовлення з пластин магнійтермічного конденсату (МТК) Be (чистотою 99,95%Be) (контрольна група); №2 – опромінені високоенергетичними електронами ($E = 18 \text{ MeV}$, з флюенсом $\Phi_e = 6,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, що відповідає енергопотоків $\sigma \sim 1,987 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^2$) та №3 – опромінені високоенергетичними електронами ($E_e = 18 \text{ MeV}$ з $\Phi_e = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, що відповідає $\sigma \sim 1,44 \cdot 10^6 \text{ Дж/см}^2$).

На рис. 1 приведені амплітудні залежності внутрішнього тертя і квадрату частоти вільних згасаючих коливань (f^2 , пропорційного до

динамічного модуля зсуву G_{ef}) природно зістареного МТК Ве в залежності від амплітуди деформації γ .

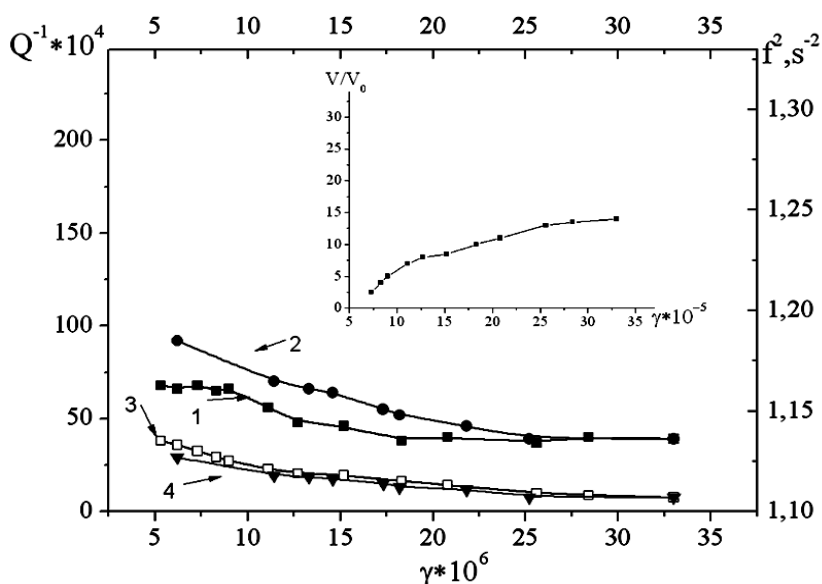


Рис. 1. Амплітудні залежності внутрішнього тертя (1, 2) і f^2 (3, 4) зістареного МТК Ве: криві 1, 3, що отримані при збільшенні відносної деформації крученням γ ; 2, 4 – при зменшенні γ . На врізці показана амплітудна залежність відношення швидкостей руху дислокацій в природно зістареному берилії

З рисунка видно, що при збільшенні амплітуди деформації в природно зістареному матеріалі значення внутрішнього тертя і f^2 спадають і повертаються до початкових при зменшенні γ . Така поведінка ВТ і динамічного модуля свідчить про те, що в зістареному зразку при збільшенні відносної амплітуди деформації не відбувається відрив дислокацій від точок закріплення. Навпаки, зменшення рівня поглинання пружної енергії з ростом γ вказує на їх гальмування, а одночасне падіння ефективного модуля пружності є еквівалентним зростанню мікропластичної складової деформації. Таку аномалію в поведінці пружних та непружних характеристик зістареного Ве при кімнатних температурах можна пояснити, виходячи з наступних міркувань. За вказаних умов берилій є неаксіальним ауксетиком з аномально низькими значеннями коефіцієнтів Пуассона (ν_{ij}), практично прямуючими до нуля, що відбивається на характері руху дислокацій і їх взаємодії з точковими дефектами [11]. Так, справді, поля напруг навколо крайових та гвинтових компонент дислокацій у Ве в районі кімнатних температур практично не відрізняються, а значить і дислокаційні атмосфери за типом атмосфери Коттрелла не утворюються [11]. Точкові дефекти, які знаходяться навколо дислокаційних ліній, чинять опір рухові таких дислокацій в напрямку прикладеної напруги, і коли сила опору перевищує деяке критичне значення, поступальний рух цих лінійних дефектів переходить у поширення збурення дислокаційної форми в

перпендикулярному напрямку – вздовж лінії дислокації [18]. В Ве такий механізм дисипації енергії при кімнатних температурах може виникати з високим ступенем вірогідності, якщо врахувати, що збільшення концентрації точкових дефектів поблизу дислокацій в процесі природного старіння може приводити до колективного характеру взаємодії атомів дислокаційної атмосфери з дислокаціями [19]. Цікаво відмітити, що при такому перебігу подій при зростанні γ і рівень тертя повинен зменшуватись, і деформація зразка зростати (f^2 зменшуватись), оскільки механічні напруги все-таки релаксують (правда, незвичним способом – вздовж дислокаційних ліній), і осциляції на часових залежностях внутрішнього тертя виникатимуть, що і спостерігали експериментально в [4]. При цьому відмітимо, що спостережуваний нами характер залежності $f^2(\gamma)$ свідчить про існування принаймні двох механізмів мікропластичної деформації, які змінюють один одного при переході через деяке критичне значення $\gamma_{кр}$. Результати розрахунку швидкості зміни динамічного модуля зі зміною ступеню деформації представлені в таблиці, та амплітудні залежності швидкості руху дислокацій (див. рис. 1, урізка) підтверджують сказане.

Інша ситуація спостерігається при вивченні амплітудних залежностей внутрішнього тертя і амплітудних залежностей f^2 в опромінених зразках 2-ї та 3-ї груп (рис. 2).

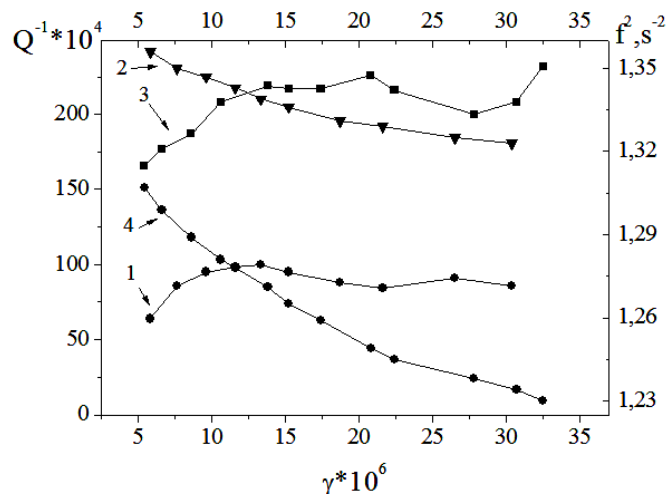


Рис. 2. Амплітудні залежності внутрішнього тертя (1, 3) і f^2 (2, 4) при зростанні γ (1, 2 – зразок із групи №2; 3, 4 – зразок із групи №3)

Із аналізу отриманих залежностей видно, що опромінення зразків високоенергетичними електронами призводить до різкої зміни поведінки $Q^{-1}(\gamma)$ і $f^2(\gamma)$ при $\gamma < \gamma_{кр}$. Одночасне зростання поглинання пружної енергії і спадання f^2 (див. рис. 2 криві 2 і 4) свідчать про те, що в опроміненіх зразках Ве характер поведінки дефектів різко змінюється. Його можна було б вважати класичним – зростання відносної деформації сприяє зменшенню дислокацій в напрямку прикладеної напруги, що, у свою чергу, приводить до збільшення дислокаційної деформації і зменшення f^2 . (Як видно з рис. 2, збільшення дози опромінення тільки підсилює цей ефект: для зразків 3-ї групи рівень поглинання пружної енергії зростає в 2–3 рази). Але при $\gamma > \gamma_{кр}$

характер залежності досліджуваних величин з ростом ступеня деформації знову стає аномальним. Відмітимо також, що зростання дози високоенергетичними електронами призводить до зміщення $\gamma_{кр}$ у сторону вищих значень (див. таблицю): перехід до іншого механізму руху дефектів у зразках 3-ї групи відбувається вже при $\sim 25 \cdot 10^{-5}$ замість $(11 \dots 20) \cdot 10^{-5}$ для зразків 2-ї групи.

Для того щоб зрозуміти, які процеси реалізуються в Ве до і після опромінення при зростанні ступеня деформації крученням із даних амплітудної залежності f^2 за методикою, яка описана в [17], було розраховано відношення швидкостей руху дислокацій в залежності від γ (рис. 3, 4).

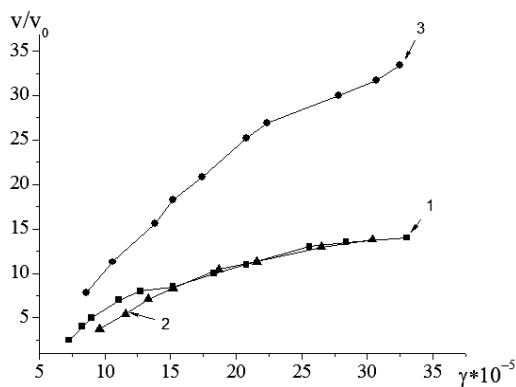


Рис. 3. Амплітудні залежності відношення швидкостей руху дислокацій у МТК Ве при зростанні γ .

Нумерація кривих відповідає номеру групи

Як видно із рис. 3, швидкості руху дислокацій в зістарених та опроміненіх меншою дозою ($\Phi_e = 6,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при енергопотоківі $\sigma \sim 1,987 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^2$) зразках при амплітудах вище $\gamma_{кр} = 17 \cdot 10^{-5}$ фактично збігаються, що свідчить про те, що на цій стадії в процесі деформації зразків 2-ї і 1-ї груп (опроміненого і зістареного матеріалу) беруть участь однакові типи дефектів, і опромінення не прискорює їх рух, а навіть дещо сповільнює (див. рис. 3, криві 1, 2). Однак це не

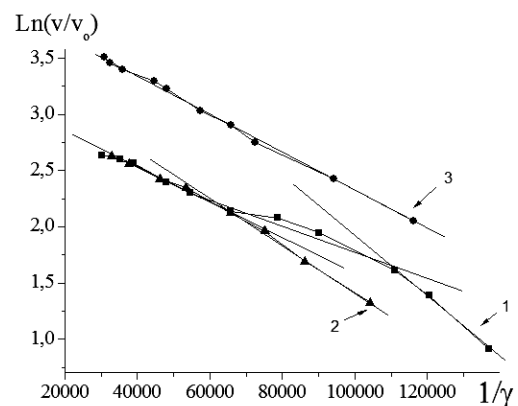


Рис. 4. Амплітудні залежності у МТК Ве в напівлогарифмічних координатах.

Нумерація кривих така ж, як і для рис. 3

повні дислокації, які закріплені на стопорах (точкових дефектах чи дислокаціях лісу), бо зменшення рівня поглинання супроводжується падінням ефективного модуля пружності. Скоріш за все, це крайові і гвинтові дислокації з дуже близькими значеннями пружних характеристик, які зумовлені близькими до нуля значеннями коефіцієнтів Пуассона, які при цих значеннях γ розсіюють пружну енергію за механізмом, що запропонований в [18], вздовж дислокаційних ліній.

А от деформації при $\gamma < \gamma_{кр}$ у зразках 2-ї та 3-ї груп відбуваються під дією прикладеного механічного напруження, вочевидь, за дещо іншим сценарієм (механізмом). Дослідження амплітудно-часових залежностей внутрішнього тертя опроміненних зразків показують, що атоми дислокаційних домішкових атмосфер ніби вітром «здуваються» електронним опроміненням і розміщуються на певній відстані від дислокації [4, 8]. При цьому слід зауважити, що опромінення електронами із енергопотокном $\sigma = 1,44 \cdot 10^6$ Дж/см² (зразки з групи №3, на відміну від зразків групи №2) призводить до значного (практично на порядок) зростання швидкості руху дефектів, які забезпечують мікропластичну деформацію крученням (див. рис. 3). Якщо припустити, що це дислокації, які звільнені в процесі опромінення від домішкових атомів, то непросто пояснити, чому однакові

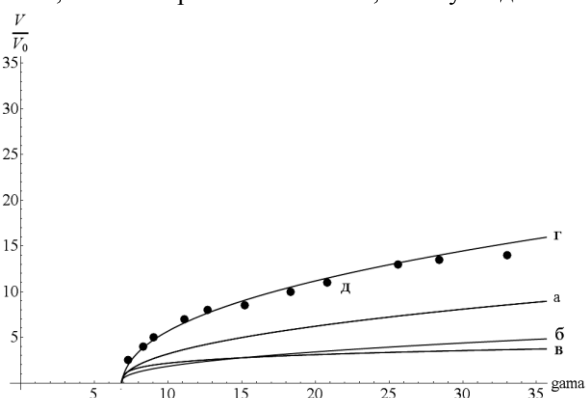


Рис. 5. Моделювання амплітудних залежностей відношення швидкостей руху дислокацій в природно зістареному берилії зі збільшенням відносної деформації γ : а – крайові; б – гвинтові; в – двійникові; г – сума; д – експериментальні значення (точки), які отримані на зразку групи №1

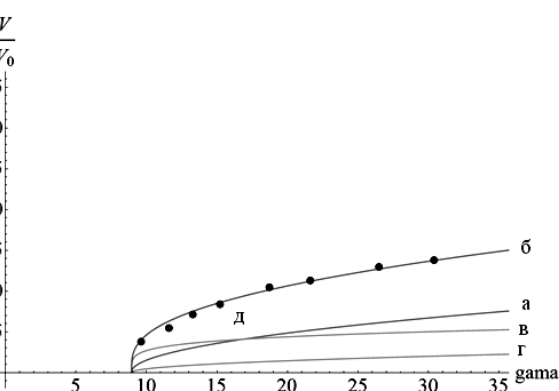
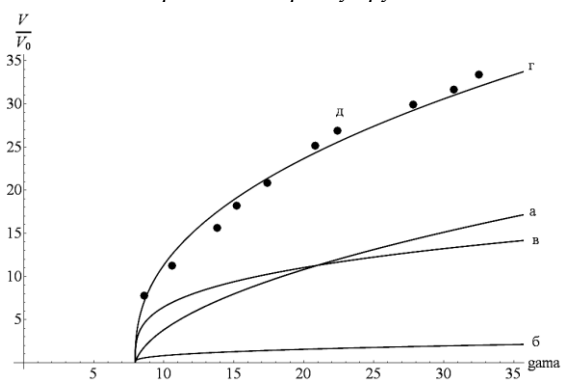


Рис. 6. Амплітудні залежності відношення швидкостей руху дислокацій в берилії зі збільшенням відносної деформації γ : а – крайові; б – гвинтові; в – двійникові; г – сума; д – експериментальні значення (точки), які отримані на зразку групи №2

Рис. 7. Амплітудні залежності відношення швидкостей руху дислокацій у берилії зі збільшенням відносної деформації γ : а – крайові; б – гвинтові; в – двійникові; г – сума; д – експериментальні значення (точки), які отримані на зразку групи №3

Як бачимо, домінуючими дефектами в зістареному Ве є крайові дислокації і двійники (див. рис. 5, криві а і в), однак при напругах $\gamma = 14 \cdot 10^{-5}$ швидкість руху двійників стає меншою за швидкість руху гвинтових дислокацій, тому при напругах $\gamma > 14 \cdot 10^{-5}$ мікропластична деформація зістареного Ве контролюється крайовими та гвинтовими дислокаціями. Відмітимо, що розраховане значення $\gamma \sim 14 \cdot 10^{-5}$, при якому змінюється характер домінування того чи іншого типу дефектів, доволі точно збігається із експериментально визначеним значенням $\gamma_{кр}$ для

зовнішні механічні напруги в зразках 2-ї та 3-ї груп призводять до такої різкої відмінності в швидкостях руху таких дислокацій та характері їх гальмування (див. рис. 4).

Для того щоб в'яснити можливі механізми мікропластичної деформації в зразках опроміненого берилію, будемо вважати, що основними дефектами, які реагують на прикладені зовнішні зусилля в берилії, є крайові і гвинтові дислокації, а також двійники. При цьому будемо розглядати двійники як сукупність великого числа двійникових дислокацій [17].

Результати моделювання руху дислокацій при зміні γ , розрахунків відношення швидкостей руху дислокацій у Ве та їх порівняння з експериментально отриманими величинами для зразків різних груп представлені на рис. 5–7.

зістареного Ве (див. таблицю). В той же час при $\gamma < \gamma_{кр}$ деформація опроміненого берилію контролюється в основному двійниками. Причому більша доза опромінення відповідає значно більшій швидкості двійників (див. рис. 7, криву в), що непогано корелює з результатами досліджень процесів двійникування обробленого електронами Ві [12]. Величина $\gamma_{кр}$ з ростом дози опромінення зростає з $17 \cdot 10^{-5}$ для зразка групи №2 до $21 \cdot 10^{-5}$ для зразка з групи №3, що також непогано збігається з експериментально визначеними $\gamma_{кр}$ для Ве.

Амплітудні залежності швидкості зміни ефективних модулів кручення в зразках МТК Ве при мікропластичній деформації

Зістарений (з групи №1)		Опромінений високоенергетичними електронами (E _e = 18 MeB) з флюенсом Φ _e = 6,9·10 ¹⁴ см ⁻² (з групи №2)		Опромінений високоенергетичними електронами (E _e = 18 MeB) з флюенсом Φ _e = 5·10 ¹⁷ см ⁻² (з групи №3)	
$\frac{\Delta f^2}{\Delta \gamma}$	$\gamma \cdot 10^5$	$\frac{\Delta f^2}{\Delta \gamma}$	$\gamma \cdot 10^5$	$\frac{\Delta f^2}{\Delta \gamma}$	$\gamma \cdot 10^5$
0,002222	5,75	0,003333	6,7	0,006667	6
0,002727	6,75	0,0015	8,6	0,005	7,6
0,003	7,8	0,002	10,6	0,004	9,6
0,002857	8,65	0,002353	12,45	0,003125	12,2
0,001905	10,05	0,001579	14,25	0,004286	14,5
0,00125	11,9	0,001429	16,95	0,002727	16,3
0,0004	13,95	0,00069	20,15	0,002941	19,1
0,000968	16,75	0,000816	24,05	0,0025	21,6
0,0008	19,55	0,000513	28,45	0,001296	25,1
0,000833	23,2	–	–	0,001379	29,25
0,000357	27	–	–	0,002222	31,6
0,000217	30,7	–	–	–	–
$\langle \frac{\Delta f^2}{\Delta \gamma} \rangle$	$\langle \gamma_i - \gamma_i \rangle$	$\langle \frac{\Delta f^2}{\Delta \gamma} \rangle$	$\langle \gamma_i - \gamma_i \rangle$	$\langle \frac{\Delta f^2}{\Delta \gamma} \rangle$	$\langle \gamma_i - \gamma_i \rangle$
0,002327	5,75...11,9	0,002032	6,7...16,95	0,003906	6...21,6
0,000596	13,95...30,7	0,000673	20,15...28,45	0,001633	25,1...31,6

Таким чином, математичне моделювання руху різного типу дислокацій в ауксетичному берилії показало, що зміну характеру мікропластичної деформації в неопромінену та опромінену матеріалах з ростом амплітуди деформації можна пояснити зміною домінування різного типу дефектів, які відповідальні за деформацію. Так, для прикладу, в зразках групи №3 при $\gamma < \gamma_{кр}$ швидкість руху двійників перевищує швидкості руху гвинтових та крайових дислокацій (домінують двійникові дислокації). При зростанні деформації вище $\gamma_{кр}$ починають домінувати крайові дислокації, які динамічно гальмуються перешкодами різного типу.

ВИСНОВКИ

1. Врахування ауксетичного характеру деформації Ве (величини та знаків коефіцієнтів Пуассона) дозволяє пояснити аномальні амплітудно-часові залежності внутрішнього тертя та динамічного модуля кручення в природно зістареному матеріалі перекачкою енергії поступального руху повних дислокацій в енергію

збурення дислокаційної форми вздовж лінії дислокації.

2. Опромінення Ве-конденсату високоенергетичними електронами (~ 18 MeB) різними дозами (від 10¹⁴ до 10¹⁷ см⁻²) з різними σ (від 2 кДж/см² до 1,5 МДж/см²) призводить до значного (на порядок) збільшення відношення швидкостей руху його ДДС у тому ж інтервалі амплітуд деформацій при зростанні дози опромінення.

3. Математичне моделювання руху різного типу дислокацій в ауксетичному Ве до і після опромінення показало, що обробка високоенергетичними електронами різними дозами при $\gamma < \gamma_{кр}$ призводить до домінування двійників над крайовими та гвинтовими дислокаціями та до зростання швидкості руху двійникових дислокацій з ростом дози опромінення.

4. Запропонована на базі методу НЧВТ методика дослідження впливу високоенергетичними електронами на характер руху дефектів у Ве в процесі мікропластичної деформації продемонструвала високу прецизійну чутливість як до змін в структурі опромінених зразків, так і до

характеру зміни динамічних властивостей дефектів, які відповідальні за деформацію.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ю.В. Тузов, Ю.Е. Маркушкин, Е.С. Краснощёков. Бериллий – состояние, возможности и перспективы применения в термоядерной технике // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2011, №2, с. 21-27.
2. И.И. Папиров, А.А. Николаенко, В.С. Шокуров, В.А. Шкуропатенко. Влияние условий деформации на образование встроенных зон в Ве // *Вестник ХНАДУ*. 2013, №60, с. 105-111.
3. Э.А. Ткаченко, Д.В. Постников. Радиационное повреждение бериллия // *Омский государственный вестник*. 2011, №3(103), с. 37-42.
4. А.В. Олейнич, Б.Г. Стронгин, Н.Д. Раранский, В.В. Лисюк, В.Т. Маслюк. Эффективный модуль сдвига и внутреннее трение в Ве, облученном электронами высоких энергий // *Металлофизика и новейшие технологии*. 1997, №1(19), с. 62-66.
5. О.С. Аvasилой, А.В. Олейнич-Лисюк, М.Д. Раранський. Особливості поглинання пружної енергії в опромінену електронами технічно чистому Ве // *Науковий вісник Чернівецького університету*. 2001, №112, с. 82-85.
6. 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, с. 43-49.
7. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Митроченко, В.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков. Воздействие высокоэнергетического пучка электронов на пластическую деформацию металлов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №3, с. 140-144.
8. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков, П.Н. Остапчук. Пластификация ГЦК-металлов в процессе электронного облучения // *Физика твердого тела*. 2012, т. 54, с. 145-149.
9. Е.В. Зароченцев, С.М. Орел. Аномальное поведение упругих постоянных при изменении топологии поверхности Ферми // *Металлофизика и новейшие технологии*. 1988, т. 10, №5, с.7-12.
10. В.В. Немошкаленко, М.Л. Миллер, В.Н. Антонов, А.В. Жалко-Титаренко. Электронная структура TiNi вблизи точки мартенситного фазового перехода // *Металлофизика*. 1987, т. 9, №3, с. 119-122.
11. М.Н. Гунько, А.В. Олейнич-Лисюк, Н.Д. Раранский, А.Ю. Ташук. Анализ особенностей деформации аумсетического бериллия // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015, №5(77), с. 13-17.
12. В.С. Савенко. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий: Автор. дис. ... докт. техн. наук. М., 2004, 42 с.
13. А.В. Бабун, А.А. Васильев, К.В. Ковтун, Г.Д. Пугачев, М.П. Старолат, Б.А. Шилияев. Накопление радиационных повреждений в бериллии при использовании ускорителей заряженных частиц // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, №3, с. 204-206.
14. А.Н. Николюк, А.В. Олейнич, Н.Д. Раранский. Особенности поглощения упругой энергии в облученном и состаренном бериллии // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2001, №9 (23), с. 1213-1219.
15. П.П. Паль-Валь, Х.-Й. Кауфман, В.И. Старцев. Изучение эволюции дислокационной структуры на начальной стадии пластической деформации монокристаллов высокочистого молибдена методом внутреннего трения // *Физика твердого тела*. 1985, т. 27, №3, с. 852-857.
16. Є.І. Курек. Вплив слабких магнітних полів на пружні та непружні властивості високочистого берилію: Автор. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Чернівці, 2015, 20 с.
17. О.Ю. Ташук, М.К. Мишилюк, М.Д. Раранський, А.В. Олейнич-Лисюк. Еволюція дефектних підсистем в аумсетичному берилії в процесі деформації // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2015, т. 37, №12, с.1595-1602.
18. В.В. Малашенко. Коллективное взаимодействие точечных дефектов с движущейся винтовой дислокацией // *Физика твердого тела*. 1997, т. 39, №3, с. 493-494.
19. В.В. Малашенко. Влияние коллективного динамического взаимодействия структурных дефектов на предел текучести облученных материалов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2012, №5, с. 27-29.

Статья поступила в редакцию 25.02.2016 г.

ОСОБЕННОСТИ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АУКСЕТИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ, ОБЛУЧЁННОГО ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Н.Д. Раранский, А.В. Олейнич-Лисюк, А.Ю. Ташук

Методом низкочастотного внутреннего трения (НЧВТ) (1...3 Гц), исследованием поведения динамического модуля кручения (G_{ef}) и путем математического моделирования движения дислокаций изучали микропластическую деформацию в естественно состаренном и облученном высокоэнергетическими

(18 МэВ) электронами ауксетического Be. С ростом дозы облучения обнаружили увеличение внутреннего трения и скорости движения дислокаций в 2–3 раза. Установили стадийный характер микродеформации ауксетического Be. Путем математического моделирования показали, что в облученном материале деформация протекает за счет ускоренного движения двойниковых дислокаций на начальной стадии, которое меняется аномальным динамическим торможением полных дислокаций при нарастании степени деформации на второй стадии. Показано, что теоретически оцененные величины хорошо совпадают с экспериментально определенными.

FEATURES MICRO PLASTIC DEFORMATION AUXETIC BERYLLIUM IRRADIATED WITH HIGH-ENERGY ELECTRONS

N.D. Raranskii, A.V. Olynych-Lysyuk, O.Yu. Taschuk

By low-frequency internal friction (LFIF) (1...3 Hz) method, the study of the behavior of the dynamic modulus of torsion (G_{ef}) and by mathematical modeling of dislocation motion studied micro plastic deformation in naturally aged and irradiated with high-energy (18 MeV) electrons auxetic beryllium. With increasing doses of radiation found an increase in IF and speed of movement of dislocations in 2–3 times. Installed stage character micro strain auxetic Be. By mathematical modeling showed that in the irradiated material the deformation occurs due to the accelerated movement of the twin dislocations in the early stages, and anomalous dynamic deceleration of complete dislocations with an increase in the degree of deformation in the second stage. It is shown that theoretically estimated values are in good agreement with the experimentally determined.