

Биткін Сергій Віталійович, докторант, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3583-3371

Критська Тетяна Володимирівна, професор, доктор технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-001-6933-0460

Литвиненко Володимир Вікторович, доктор технічних наук, інститут електрофізики і радіаційних технологій НАНУ, ORCID: 0000-0003-4850-2555

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ЗМІНИ РАДІАЦІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛІ 45ХН2МФА ПРИ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ РЕЛЯТИВІСТСЬКИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

Запропоновано методику обробки експериментальних даних (моделювання окремих ділянок дозової залежності з застосуванням MathCAD і OriginPRO) для наочного опису і прогнозу можливості технологічного застосування потоку релятивістських електронів з енергією $\cong 5$ МеВ для підвищення ударної в'язкості (КСУ) 45ХН2МФА. Показано, що зміна радіаційно-механічних властивостей є суттєво нелінійною – з ростом дози опромінення спостерігається кілька ділянок зміни радіаційно-механічних властивостей металопрокату. Запропоновано ймовірний механізм фізичних процесів, що змінюють властивості 45ХН2МФА при опроміненні релятивістськими електронами.

Ключові слова: релятивістські електрони, дозова залежність, ударна в'язкість, моделювання

Аналіз публікацій. Пластини з гарячекатаної низьковуглецевої легованої сталі 45ХН2МФА з товщиною 6 мм можуть використовуватися в якості елементів конструкції бронезилетів, що піддаються локальній високоенергетичній дії ударником складної конструкції [1]. Використання бронепластин з конструкційних легованих сталей є технологічним трендом, внаслідок відносної простоти виготовлення і порівняно низької вартості [2]. Потрібна розробка методів істотного зміцнення бронесталей, що спрощують технологію виготовлення матеріалу елементів бронезилетів. Фізика процесу взаємодії ударника і бронепластины, а також методи зміцнення матеріалів, призначених для використання в якості гальмівних пластин бронезилета запропоновані в [3], зокрема, метод вибухової обробки металевих заготовки, який забезпечує надглибоке проникнення легуючих часток (об'ємне мікролегування), що використовується для зміцнення і підвищення зносостійкості крупногабаритного бурильного і горнорудного інструмента, зміцнення деталей машин і транспорту і рішення аналогічних завдань (зміцнення бронесталей). Показано, що основним способом підвищення опору металевих пластин є створення градієнтних (неоднорідних) структур, тобто зміцнених шарів на їх лицьовій поверхні методами осадження і/або наплавлення покриттів [4], обробка сталі виробу поверхнево-пластичною деформацією [5].

Альтернативою традиційним технологіям зміцнення являється промислове застосування потоків γ -квантів, нейтронів і електронів [6]. Практичне застосування має опромінення релятивістськими електронами з різними енергіями, генерованими прискорювачами з різноманітними конструкціями [7]. Для об'ємного зміцнення сталі використовують лінійні прискорювачі з енергією електронів від 3 до 5 МэВ, що забезпечують модифікуючу дію на товщині до 6 мм [8]. Перспектива застосування електронних пучків для вирішення вказаних завдань заснована на нелінійному розподілі

поглиненої дози по глибині і можливості отримання градієнтного розподілу механічних властивостей. Проте наявність експериментальних даних про застосування опромінення релятивістськими електронами з великими дозами експозиційного опромінення ($10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-2}$) для збільшення ударної в'язкості авторам не відомо.

Метою роботи є моделювання зміни ударної в'язкості і характеристик міцності сталі 45ХН2МФА при технологічній дії потоком релятивістських електронів з енергією $\cong 5 \text{ MeV}$.

Основна частина. Зразки сталі 45ХН2МФА (хімічний склад: 0,42–0,5 С; 0,10–0,18 V; 0,17–0,37 Si; 0,20–0,30 Мо; 0,50–0,80 Мп; 1,3–1,80 Ni; P < 0,025; 0,80–1,10 Cr; S < 0,025 масових %) опромінювалися на прискорювачі ЛУЭ-10 ХФТІ. Для побудови моделі одночасної зміни чисельних значень ударної в'язкості сталі 45ХН2МФА, її умовної межі плинності ($\sigma_{0,2}$), межі міцності (σ_B) використані дані, приведені в [9; 10] і структуровані згідно технології, використовуваній в MathCAD (рис. 1):

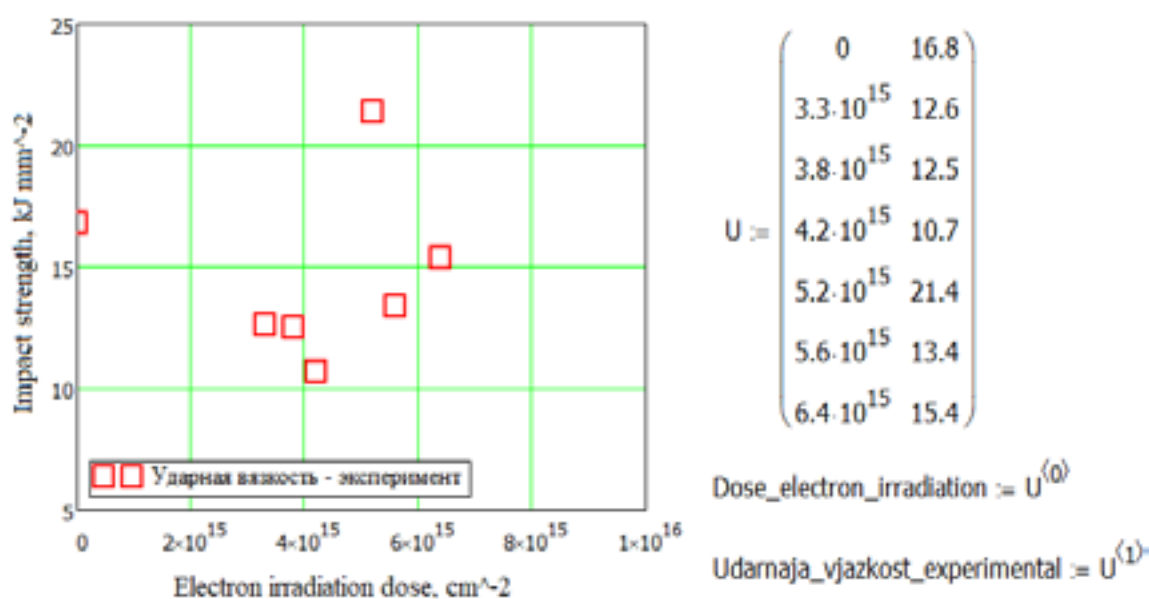


Рисунок 1 – Результати виміру ударної в'язкості сталі 45ХН2МФА при опроміненні різними дозами електронів з енергією $\cong 5 \text{ MeV}$

У загальному випадку процес опромінення об'єкту можна розглядати як послідовну зміну його станів Z [11], під якими розуміється сукупність чисельних значень ударної в'язкості, що змінюються, сталі 45ХН2МФА $f_1(\Phi_e)$, її умовної межі плинності ($\sigma_{0,2}$), межі міцності (σ_B) чи будь-яких інших фізичних властивостей $f_k(\Phi_e)$, описувану деякою функцією F чисельного значення дози опромінення релятивістськими електронами Φ_e :

$$Z(\Phi_e) = F(f_1(\Phi_e), f_2(\Phi_e), \dots, f_k(\Phi_e)).$$

Під функцією F розуміється аналітична залежність, яка показує, що кожній дозі опромінення відповідає поєднання значень k параметрів опромінюваного об'єкту. Наприклад, для певного діапазону доз опромінення електронами, зокрема, від 0 до $\Phi_e \leq 4,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ для спрощення подальшого викладу назвемо цей діапазон «ділянка І») спостерігається деградація ударної в'язкості сталі 45ХН2МФА відповідно до залежності «доза-відгук» (опис моделі приведений на графіці, залежність побудована в OriginPro 2019b 9.6.5.169 (64-bit)), форма якої змінюється зі збільшенням дози опромінення, рис. 2:

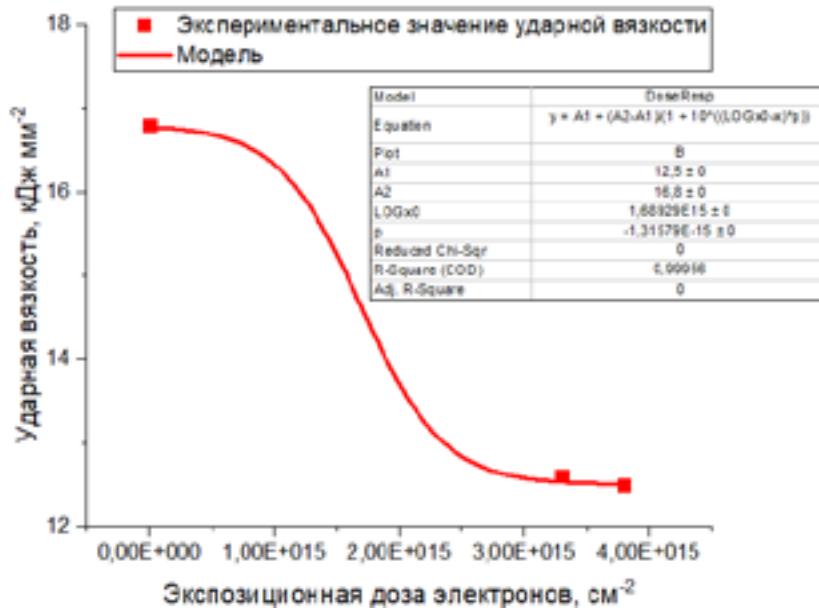


Рисунок 2 – Зменшення чисельного значення ударної в'язкості сталі 45ХН2МФА при опроміненні електронами з енергією $\cong 5 \text{ MeV}$ для Φ_e від 0 до $4,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

З метою збільшення точності моделі використовуємо інший діапазон доз («ділянка II»), Φ_e від $3,3$ до $4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (рис.3).

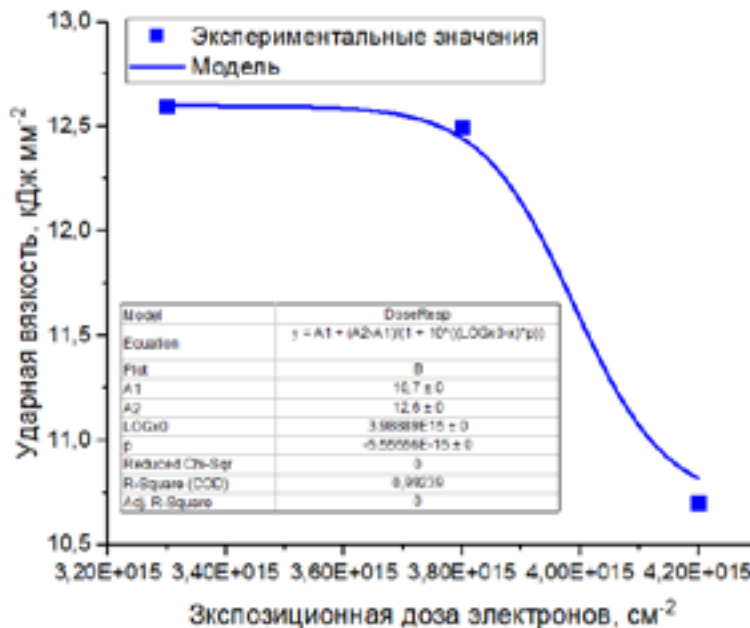
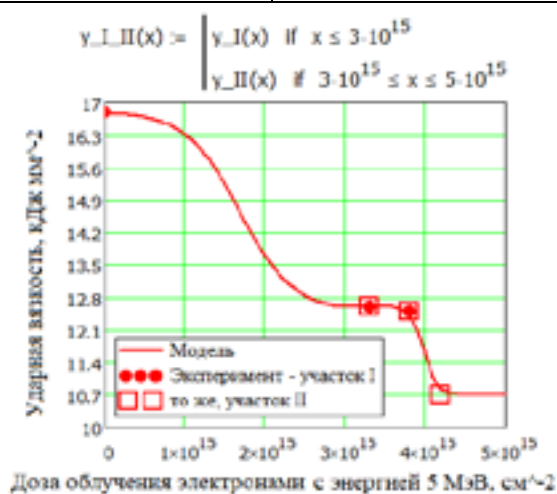


Рисунок 3 – Зміна виду апроксимуючої функції при використанні діапазону доз Φ_e від $3,3$ до $4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ («ділянка II»)

Основна мета зміни діапазону – не використовувати значення КСУ для $\Phi_e = 0$ забезпечити певне «перекриття» діапазонів доз. Збільшення дози опромінення до $4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ призводить до зміни чисельних значень коефіцієнтів моделі, не міняючи саму модель. Враховуючи, що залежність ударної в'язкості від величини дози – безперервна функція, обидві ділянки («ділянка I» і «ділянка II») слід об'єднати, використовуючи методику, запропоновану в [15]. Для різних значень Φ_e тут і далі в листингах,

що описують розрахунки в MathCAD, $x \equiv \Phi_e$ ударна в'язкість позначається y) зручно провести «зшивання» функцій для ділянок залежності I і II в MathCAD (лістинг 1).

Ділянка I	Ділянка II
$x_{I_experiment} := \begin{pmatrix} 0 \\ 3.3 \cdot 10^{15} \\ 3.8 \cdot 10^{15} \end{pmatrix}$ $y_{I_experiment} := \begin{pmatrix} 16.8 \\ 12.6 \\ 12.5 \end{pmatrix}$	$x_{II_experiment} := \begin{pmatrix} 3.3 \cdot 10^{15} \\ 3.8 \cdot 10^{15} \\ 4.2 \cdot 10^{15} \end{pmatrix}$ $y_{II_experiment} := \begin{pmatrix} 12.6 \\ 12.5 \\ 10.7 \end{pmatrix}$
$A1_I := 12.5$ $LOGx0_I := 1.68929 \cdot 10^{15}$	$A1_{II} := 10.7$ $LOGx0_{II} := 3.98889 \cdot 10^{15}$
$A2_I := 16.8$ $\rho_I := -1.31579 \cdot 10^{-15}$	$A2_{II} := 12.6$ $\rho_{II} := -5.55556 \cdot 10^{-15}$
$y_{I}(x) := A1_I + \frac{(A2_I - A1_I)}{[1 + 10^{(LOGx0_I - x) \cdot \rho_I}]}$	$y_{II}(x) := A1_{II} + \frac{(A2_{II} - A1_{II})}{[1 + 10^{(LOGx0_{II} - x) \cdot \rho_{II}}]}$

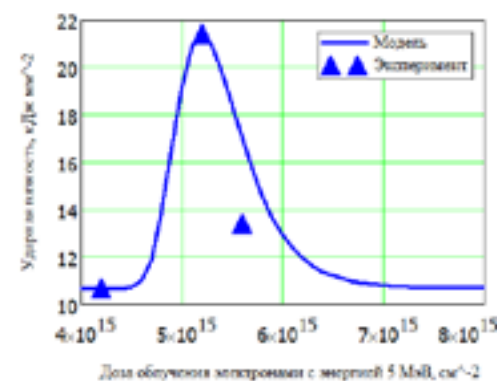


Лістинг 1 – «Зшивання» фрагментів (ділянок) залежності I і II Φ_e від 0 до $\cong 4,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

Для $4 \cdot 10^{15} \leq \Phi_e \leq 6 \cdot 10^{15}$ (ділянка III) моделювання проводиться із застосуванням функції extreme програми OriginPRO і переходом в MathCAD (лістинг 2).

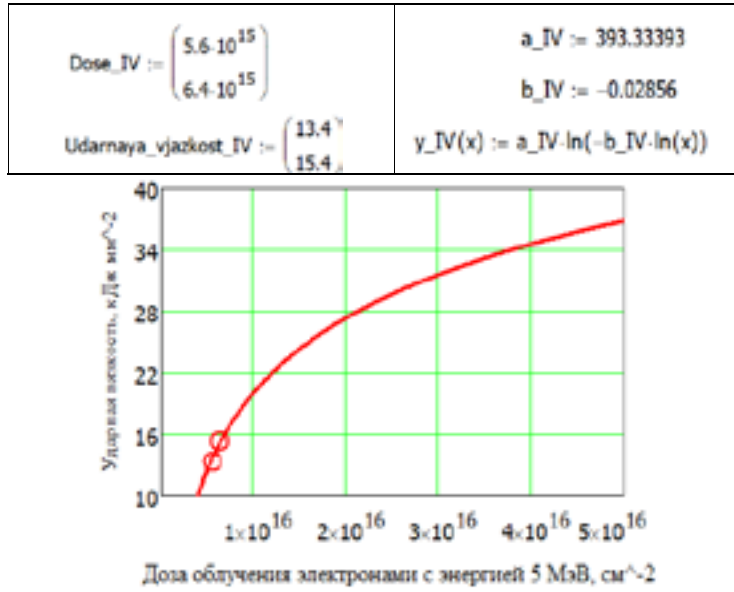
а)

$Dose_{III} := \begin{pmatrix} 4.2 \cdot 10^{15} \\ 5.2 \cdot 10^{15} \\ 5.6 \cdot 10^{15} \end{pmatrix}$	$Udarnaya_v'язkost_{III} := \begin{pmatrix} 10.7 \\ 21.4 \\ 13.4 \end{pmatrix}$
$A_{III} := 10.7$ $x_{c_III} := 5.2 \cdot 10^{15}$ $y_{0_III} := 10.7$	
$w_{III} := 3.2235 \cdot 10^{14}$	
$z_{III}(x) := \frac{x - x_{c_III}}{w_{III}}$	
$y_{III}(x) := y_{0_III} - A_{III} \cdot \exp(-\exp(-z_{III}(x)) - z_{III}(x) + 1)$	

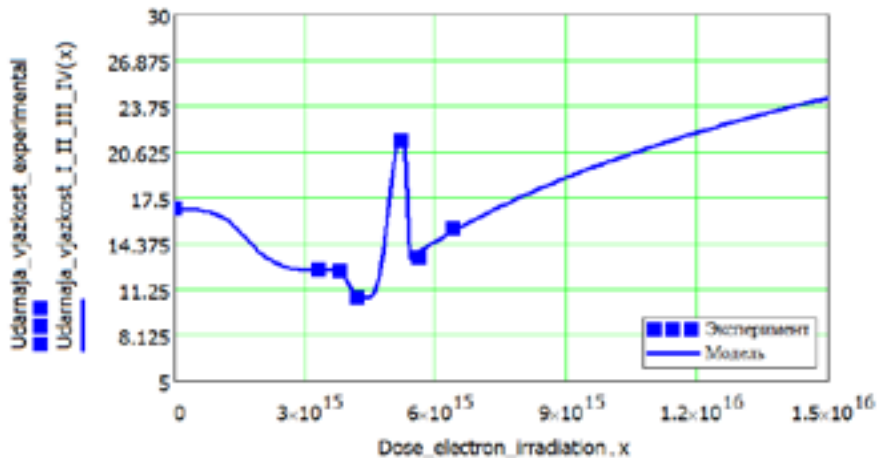


Лістинг 2 – Моделювання «перехідної» ділянки зміни ударної в'язкості $\leq 4 \cdot 10^{15} \Phi_e \leq 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$: а) модель, б) порівняння «модель-експеримент»

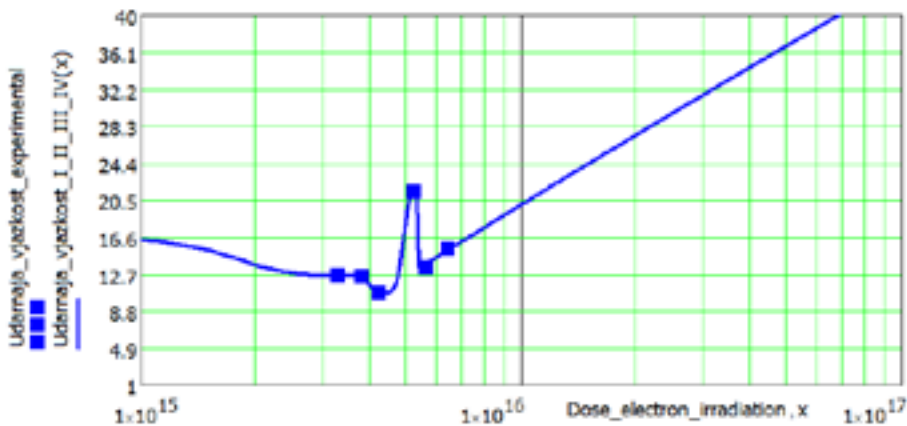
Для ділянки IV ($\Phi_e \geq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) прогнозована залежність матиме вигляд, що описується рівнянням Bradley (лістинги 3, 4).



Лістинг 3 – Прогноз збільшення чисельного значення ударної в’язкості сталі 45ХН2МФА при опроміненні електронами з енергією $\cong 5\text{MeV}$ для $\Phi_e \geq 1 \cdot 10^{16}\text{cm}^{-2}$



а)



б)

Лістинг 4 – Порівняння моделі зміни ударної в’язкості сталі 45ХН2МФА з експериментальними даними при опроміненні різними дозами електронів:
 а) діапазон Φ_e від 0 до $6,5 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-2}$ тобто для області, для якої є експериментальні дані
 б) прогнозоване збільшення ударної в’язкості при використанні високих доз опромінення, тобто $10^{16} \leq \Phi_e \leq 10^{17}\text{cm}^{-2}$

Об'єднуємо апроксимуючі залежності для ділянок I, II, III, IV:

$$Udarna\ vjzkost_I_II_III_IV(x) := \begin{cases} y_I_II(x) & \text{if } x \leq 4.2 \cdot 10^{15} \\ y_III(x) & \text{if } 4.12 \cdot 10^{15} \leq x \leq 5.7 \cdot 10^{15} \\ y_IV(x) & \text{if } x \geq 5.32 \cdot 10^{15} \end{cases}$$

Аналіз результатів. Отримані результати можуть бути пояснені з використанням загальноприйнятих теоретичних представлень. Радіаційні дефекти (вакансії і їх комплекси) гальмують рух дислокацій, що ускладнює процес пластичної деформації, приводячи, зокрема, до зростання межі плинності [12]. З використанням описаної вище методики обробки експериментальних даних побудована залежність нелінійної зміни $\sigma_{0,2}$ від рівня впливаючої дози (рис. 4).

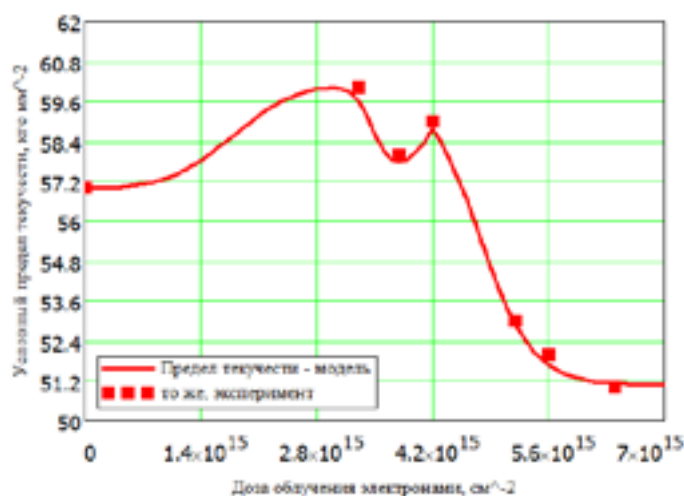


Рисунок 4 – Зміна умовної межі плинності ($\sigma_{0,2}$) сталі 45XН2МФА при опроміненні різними дозами електронів (особливість – зростання і збереження чисельного значення $\sigma_{0,2}(\Phi_e) \geq \Phi_e(0)$ у формі затухаючого колювання в діапазоні $1 \cdot 10^{15} \leq \Phi_e \leq 4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$)

Гальмування дислокацій, тобто зменшення їх рухливості, призводить до зниження пластичної деформації і зниження ударної в'язкості [13] (і, очевидно, до зворотного процесу при виникненні умов для росту рухливості дислокацій) (рис. 5).

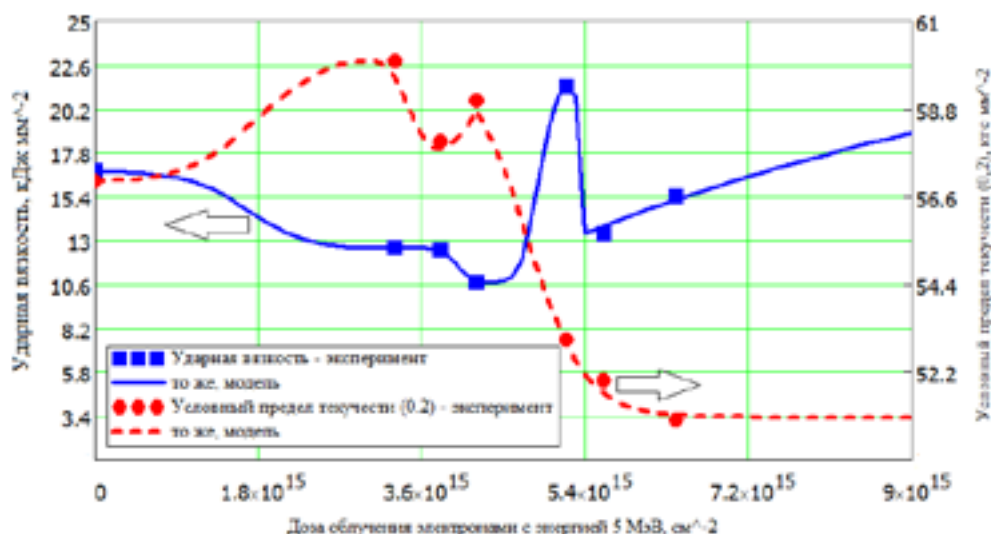


Рисунок 5 – Тренди «протифаз» зміни умовної межі плинності і ударної в'язкості сталі 45XН2МФА при опроміненні різними дозами релятивістських електронів з енергією 5 MeV

Аналогічно побудована залежність для межі міцності σ_B опромінюваної сталі (рис. 6).

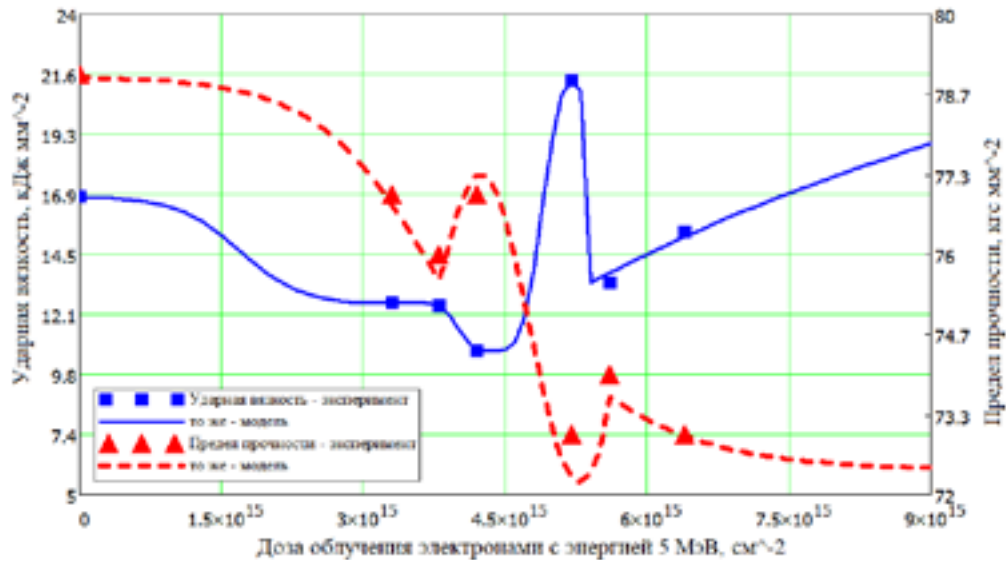


Рисунок 6 – Особливість зміни межі міцності опромінюваної електронами сталі 45ХН2МФА – наявність затримки (лаги) переходу в тренд «проти фази» з ударною в'язкістю

Чутливість сталі 45ХН2МФА до опромінення, а, отже, і можливість використання релятивістських електронів для технологічної модифікації металопродукту, визначається поєднанням швидкості зміни ударної в'язкості, $\sigma_{0,2}$, σ_B і трендом зміни їх чисельних значень (рис. 7).

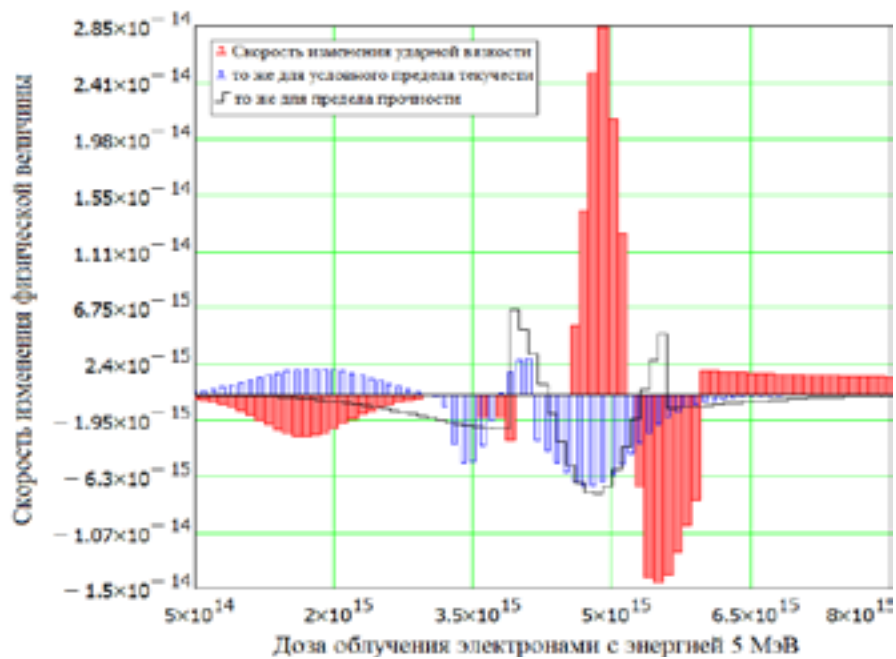
При дозах опромінення $\Phi_e \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ істотних змін фізичних властивостей сталі не спостерігається. У діапазоні $5 \cdot 10^{14} < \Phi_e \leq 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ відбувається ріст опору пластичної деформації металу, що пов'язано зі зменшенням рухливості дислокацій [14]. Швидкість зміни σ_B в цьому інтервалі незначна. При $4 \cdot 10^{15} < \Phi_e \leq 4,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ процес зниження в'язкості металу при збільшенні його міцності виражений особливо наочно. Представляється, що процес зміни КСУ, $\sigma_{0,2}$, σ_T пов'язаний з взаємодією переважаючих в умовах теплової рівноваги точкових радіаційних дефектів [15], вакансій, і домішкових атмосфер дислокацій наступним чином.

При накопиченні в сталі вакансій останні активно взаємодіють з вуглецем, для ГЦК металів розраховано і експериментально підтверджено значення енергії зв'язку атома вуглецю з вакансією в $\gamma\text{-Fe}$: 0,41–1,1 еВ, міжвузольні атоми вуглецю є «пасткою» для вакансій [16].

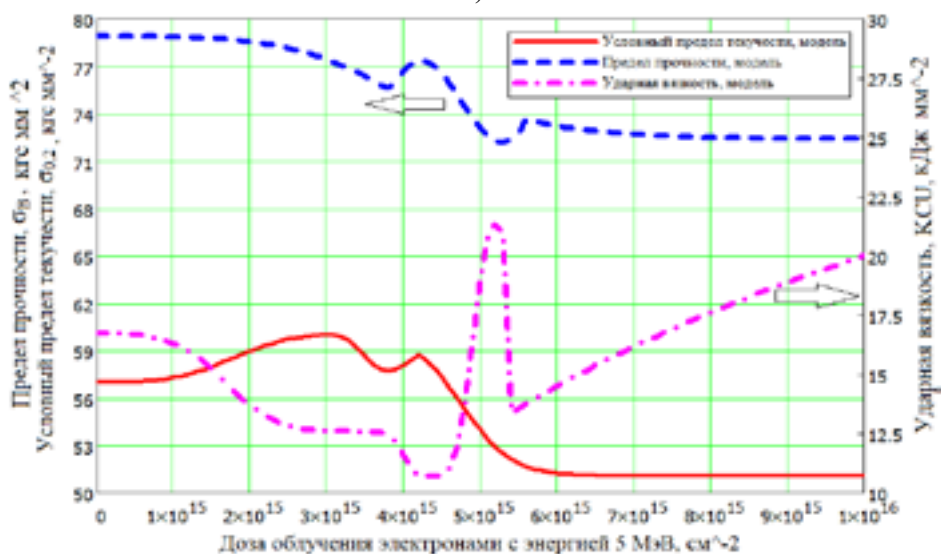
Для атома кисню отримані негативні значення, це означає, що між вакансією і домішковим атомом кисню існує відштовхування, їх об'єднання енергетично не вигідно. Атоми вуглецю, маючи позитивну енергію зв'язку, гальмують, але не зупиняють дифузію вакансій (атоми О, навпаки, прискорюють).

Домішкові атоми (С, N, O) навіть при невеликих концентраціях, істотно впливають на механічні властивості металів, що в першу чергу обумовлене їх взаємодією з дислокаціями. В результаті дифузії поблизу дислокації спостерігається скупчення домішкових атомів, які, із-за позитивної енергії зв'язку з дислокаціями, закріплюються (сегрегують) на дислокаціях, утворюючи атмосферу Коттрелла [17].

Наприклад, в результаті моделювання сегрегації атомів вуглецю на гвинтовій дислокації в Fe при 300К методом Монте Карло отримана візуалізація цього процесу (рис. 8) [18].



а)



б)

Рисунок 7 – Швидкість зміни (а) і чисельні значення фізико-механічних властивостей 45ХН2МФА (б) при опроміненні електронами з енергією 5 МеВ

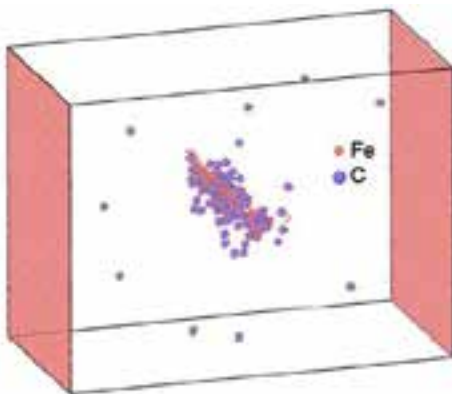


Рисунок 8 – Розподіл вуглецю в районі дислокації

Вакансії, генеровані високоенергетичними електронами в околиці дислокації, взаємодіють з міжвузольними атомами вуглецю, що знаходяться там, і дифундують до неї з подальшою сегрегацією, що і визначає ефект підвищення міцності і зменшення пластичності металу (зниження КСУ) при $5 \cdot 10^{14} < \Phi_e \leq 4,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Зниження концентрації міжвузольного вуглецю, що оточує дислокацію, дозволяє вакансіям, що накопичуються при опроміненні, «розчиняти» домішки, що сегрегують. «Вибуховий» характер зміни КСУ при $\Phi_e \cong 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ і відповідна швидка зміна $\sigma_{0,2}$, σ_T дозволяють припустити відрив дислокацій від домішкової атмосфери по механізму, запропонованому в [18]. З технологічної точки зору небажане використання Φ_e області доз, при яких спостерігається одночасна різноспрямована зміна основних фізичних властивостей металу, що приведе до нестійкості відгуку твердотілої структури на радіаційну дію (випадкова незначна девіація флюенса електронів викликатиме підвищення дисперсії експериментальних значень ударної в'язкості, $\sigma_{0,2}$, σ_B). Такою областю є $3,4 \cdot 10^{15} \leq \Phi_e \leq 6,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Стабілізація умовної межі плинності, межі міцності і тренд до підвищення ударної в'язкості при $\Phi_e \geq 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ дозволяють розглядати діапазон $1 \cdot 10^{16} \leq \Phi_e \leq 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ як перспективний для застосування радіаційної технології підвищення ударної в'язкості 45ХН2МФА з використанням опромінення електронами з енергією $\cong 5 \text{ MeV}$ при стабільній її міцності.

Висновки.

1. Запропонована методика обробки експериментальних даних дозволяє наочно описати, запропонувати пояснення і прогнозувати можливість технологічного застосування потоку релятивістських електронів з енергією 5 MeV для підвищення ударної в'язкості сталі 45ХН2МФА.

2. Зміна радіаційно-механічних властивостей 45ХН2МФА при технологічному застосуванні електронів з енергією $\cong 5 \text{ MeV}$ є істотно нелінійним. З ростом дози опромінення спостерігається декілька ділянок зміни радіаційно-механічних властивостей металопрокату.

3. Потрібне проведення додаткового експериментального дослідження властивостей 45ХН2МФА при опроміненні електронами з енергією $\cong 5 \text{ MeV}$ у області яскраво виражених перехідних процесів ($3,4 \cdot 10^{15} \leq \Phi_e \leq 6,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) і в діапазоні прогнозованого підвищення ударної в'язкості 45ХН2МФА ($1 \cdot 10^{16} \leq \Phi_e \leq 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$).

Бібліографічний перелік

1. Форенталь М. В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростном нагружении ударниками со сложной структурой : автореф. дис. ... кандидата технических наук. Специальность : 01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры / Юж.-Ур. гос. ун-т. Челябинск, 2010. 174 с.

2. Бабинец А. А. Материалы для индивидуальной бронезащиты : обзор / А. А. Бабинец, И. А. Рябцев, А. И. Панфилов. *Автоматическая сварка*. 2018. № 8. С. 45–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.08.07>

3. Алексенцева С. Е. Ударно-волновые процессы взаимодействия высокоскоростных элементов с конденсированными средами : дис. ... доктора технических наук. Специальность : 01.04.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» / Самарский государственный технический университет. Самара, 2015.

4. Поболь И. Л. Методы высокоэнергетической обработки материалов. Опыт освоения в промышленности. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2018. № 4. С. 64–68

5. Бобровский, Н. М. Инновационные технологии механической обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием : учеб. пособие / Н. М. Бобровский, И. Н. Бобровский. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. 80 с.

6. Морев А.А. Способы объёмного упрочнения породоразрушающего инструмента и оценка перспективности их дальнейших исследований / А.А. Морев, С.Я. Рябчиков. *Горный информационно-аналитический бюллетень* : научно-технический журнал. 2014. С. 96–101. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-obemnogo-uprochneniya-porodorazrushayuschego-instrumenta-i-otsenka-perspektivnosti-ih-dalneyshih-issledovaniy-1>
7. Industrial Radiation with Electron Beams and X-rays. *International Irradiation Association*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://iiaglobal.com/uploads/documents/Industrial_Radiation_eBeam_Xray.pdf
8. Industrial Accelerators and Their Applications / edited by Robert W. Hamm and Marianne E. Hamm. California, USA : R&M Technical Enterprises, 2012. Chapt. 7. Pp. 311.
9. Биткін С.В. Фізико-технологічні проблеми впровадження радіаційних процесів в металургійне виробництво / С.В. Биткін, С.Є. Донець, О.О. Ісаєнко, В.В. Литвиненко, П.О. Фролов. *Журнал фізики та інженерії поверхні*. 2017, Т. 2, № 4, С. 254–260.
10. Влияние радиационно-технологической обработки низкоуглеродистых сталей на их физико-механические свойства / С.В. Быткин, А.А. Исаенко, В.В. Литвиненко, М.В. Авраменко. *Металургія*. 2017. Вип. 1(37). С. 59–65.
11. Ходырев А.И. Компьютерное моделирование работы оборудования с применением пакета MathCAD : учебное пособие по дисциплине «Основы компьютерного моделирования». М. : РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. 139 с.
12. Кирсанов В.В. Радиационные дефекты и связанные с ними эффекты. *Соросовский образовательный журнал*. 2001. Т. 7. № 10, С. 88–93.
13. Конструкционные материалы для транспортных средств специального назначения : учеб. пособие / О.В. Чудина, М.П. Малиновский. М. : МАДИ, 2020. 232 с.
14. Чудина, О.В. Выбор материалов и методов упрочнения деталей транспортного машиностроения : учеб. пособие / О.В. Чудина, Г.В. Гладова. М. : МАДИ, 2015. 120 с.
15. Пашаев А.М. Авиационное материаловедение : учебник для вузов / А.М. Пашаев, А.Х. Джанахмедов, Т.Г. Джаббаров. Баку : АПОСТРОФ, 2016. 656 с.
16. Зоря И.В. Взаимодействие примесных атомов лёгких элементов (С, N, О, Н) с дефектами кристаллической решётки в ГЦК металлах на примере Ni, Ag, Al : дис. ... доктора физико-математических наук : спец. 01.04.07 – физика конденсированного состояния / Алтайский гос. технич. университет им. И.И. Ползунова, Сибирский гос. индустриальный университет. Барнаул, 2020.
17. Бараз, В.Р. Физические основы упрочнения и разрушения материалов : учебное пособие / В.Р. Бараз, М.А. Филиппов. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 192 с.
18. Veiga R.G.A., Goldenstein H., Perez M., Becquart C.S.. Monte Carlo and molecular dynamics simulations of screw dislocation locking by Cottrell atmospheres in low carbon Fe-C alloys. *Scripta Materialia*. 2015. Vol. 108. Pp. 19–22.

References

1. Forental M.V. Dynamics of deformation and destruction of plastins at a high-speed lading shock-workers with a difficult structure : abstract of thesis of dissertation candidate of engineering sciences. Speciality : 01.02.06 – “Dynamics, durability of machines, devices and apparatus” / South.-Ur. state un-t. Chelyabinsk, 2010. 174 p.
2. Babinets A.A. Materials for individual to the armour of defence : review / A.A. Babinets, I.A. Ryabtsev, A.I. Panfilov. *The Automatic Welding*. 2018. № 8. Pp. 45–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.08.07>.
3. Aleksentseva S.E. Shock-wave processes of co-operation of high-speed elements with the condensed environments : dissertation doctors of engineering sciences. Speciality : 01.04.17 – “Chemical physics, burning and explosion, physics of the extreme states of substance” / Samara state technical university. Samara, 2015
4. Pobol A.L. Methods of high-energy treatment of materials. Mastering experience is in industry. *Announcer of the Brest state technical university*. 2018. № 4. Pp. 64–68.
5. Bobrovsky, N.M. Innovative technologies of tooling of details of machines superficially – by a flowage : studies. manual / N.M. Bobrovsky, I.N. Bobrovsky. Tolyatti : TSU Publishing House, 2013. 80 p.

6. Morev A.A. Methods by volume work-hardening of breed of destroying instrument and estimation of perspective of their further researches / A.A. Morev, C. I. Hazelhens. *Mountain informatively-analytical bulletin* : scientific and technical magazine. 2014. Pp. 96–101 [Electronic resource] Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-obemnogo-uprochneniya-porodorazrushayuschego-instrumenta-i-otsenka-perspektivnosti-ih-dalneyshih-issledovaniy-1>
7. Industrial Radiation with Electron Beams and X-rays. *International Irradiation Association*. [Electronic resource]. Access mode: http://iiaglobal.com/uploads/documents/Industrial_Radiation_eBeam_Xray.pdf
8. Industrial Accelerators and Their Applications / edited by Robert W. Hamm and Marianne E. Hamm. California, USA : R&M Technical Enterprises, 2012. Chapt. 7. Pp. 311.
9. Bytkin S.V. Physico-technological problems of introduction of radiation processes in the metallurgical production / S.V. Bytkin, S.I. Donets, O.O. Isaenko, V.V. Litvinenko, P.O. Frolov. *Magazine of physics and engineering of surface*. 2017. Vol. 2. № 4. Pp. 254–260.
10. Influence of radiation-technological treatment of low-carbon steels on their physicomechanical properties / of S.V. Bytkin, A.A. Isaenko, V.V. Litvinenko, M.V. Avramenko. *Metallurgy*. 2017. Vol. 1(37), Pp. 59–65.
11. Khodyrev A.I. Computer design of work of equipment with the use of package of MathCAD : the Train aid on discipline of “Basis of computer design”. M. : RSU of oil and gas (NIU) of the name of I.M. Gubkina, 2017. 139 p.
12. Kirsanov V.V. The Radiation defects and effects related to them. *Sorosovsky educational magazine*. 2001. Vol. 7. № 10, C. 88–93.
13. Construction materials for the transport vehicles of the special setting : studies. manual / O.V. Chudina, M.P. Malinovsky. M. : MADI, 2020. 232 p.
14. Chudina, O.V. Choice of materials and methods of work-hardening of details of a transport engineer : studies. manual / O.V. Chudina, V. Gladova. M. : MADI, 2015. 120 p.
15. Pashaev A.M. Aviation materials science : textbook for the institutes/ A.M. Pashaev, A.Kh. Dzhankhmedov., T. Dzhabbarov. Baku: APOSTROPHE, 2016. 656 p.
16. Zorya I.V. Co-operating of admixture atoms of easy elements (C, N, O, H) with the defects of crystalline grate in ПЦК metals on the example of Ni, Ag, Al : dissertation doctors of physical and mathematical sciences. Special : 01.04.07 – “Physics of the condensed state” / Altaian state tech university the name of I.I. Polzunova, Siberian state industrial university. Barnaul, 2020.
17. Baraz, B. Physical bases of work-hardening and destruction of materials : train aid / B. Baraz, M.I. Filippov. Ekaterinburg : Ural, 2017. 192 p.
18. Veiga R.G.A., Goldenstein H., Perezb M., Becquart C.S.. Monte Carlo and molecular dynamics simulations of screw dislocation locking by Cottrell atmospheres in low carbon Fe-C alloys. *Scripta Materialia*. 2015. Vol. 108. Pp. 19–22.

Bytkin Sergey, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporozhe National University
Krytskaya Tatiana, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporozhe National University
Lytvynenko Vladimir, Doctor of Technical Sciences, Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS

MODELING OF NONLINEAR CHANGE OF RADIATION-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STEEL 45XH2MΦA AT TECHNOLOGICAL IRRADIATION WITH RELATIVISTIC ELECTRONS

A technique for processing experimental data (modeling of individual sections of the dose dependence using MathCAD and OriginPRO) was proposed for a clear description and prediction of the possibility of technological application of a flow of relativistic electrons with an energy of $\cong 5$ MeV to increase the impact strength (KCU) of 45KhN2MFA. It was shown that the change in the radiation-mechanical properties is essentially nonlinear. With an increase in the radiation dose, several areas of change in the physical (radiation-mechanical) properties of rolled metal was observed. The obtained results were explained using generally accepted theoretical concepts. At radiation doses $\Phi_e \leq 5 \cdot 10^{14}$ cm⁻² no significant changes in the physical

properties of steel were observed. In the range $5 \cdot 10^{14} < \Phi_e \leq 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ the numerical value of $\sigma_{0,2}$ was growing and KCU was decreasing, the rates of their change are opposite (have different signs with practical equality of amplitudes). The σ_B change rate in this interval was insignificant. At $4 \cdot 10^{15} < \Phi_e \leq 4,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ the process of the impact strength reducing of the metal with an increase in its strength was expressed especially clearly. It seems that the process of KCU, $\sigma_{0,2}$, σ_T change is associated with the interaction of point radiation defects (vacancies, prevailing in the conditions of thermal equilibrium) and impurity atmospheres of dislocations. Near the dislocation, there is a cluster of impurity atoms, fixed (segregated) on dislocations, forming the Cottrell atmosphere. Reducing the concentration of interstitial carbon surrounding the dislocation allows vacancies accumulating during irradiation to "dissolve" segregated impurities (not only carbon, but also alloying). The "explosive" nature of the KCU change at $\Phi_e 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ and corresponding rapid change of $\sigma_{0,2}$, σ_T suggest the separation of dislocations from the impurity atmosphere and the creation of conditions for the growth of toughness with an increase in the radiation dose.

Keywords: relativistic electrons, dose dependence, impact strength, modeling

Стаття надійшла: 20.10.2021 р.