

УДК 662.61.537.66.092

## ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВПРОВАДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО

С. В. Биткін<sup>1</sup>, С. Є. Донець<sup>2</sup>, О. О. Ісаєнко<sup>1</sup>, В. В. Литвиненко<sup>2</sup>, П. О. Фролов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПАТ «Запоріжсталь», Запоріжжя, Україна,

<sup>2</sup>Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, Україна

Надійшла до редакції 14.12.2017

В роботі аналізуються питання шляхів впровадження радіаційних ефектів у виробничі процеси металургійного виробництва. Розглядається питання створення системи прогнозування розподілу температурного поля, зумовленого розігрівом внаслідок опромінення. Виконано вимірювання залежностей механічних характеристик низьковуглецевого залізного сплаву в залежності від флюенсу. Проведено електронномікроскопічний аналіз зламів зразків, опромінених різними дозами.

**Ключові слова:** радіаційні технології, флюенс, електронний пучок, низьковуглецева сталь.

## ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

С. В. Быткин, С. Е. Донец, А. А. Исаенко, В. В. Литвиненко, П. А. Фролов

В работе анализируются вопросы путей внедрения радиационных эффектов в производственные процессы металлургического производства. Рассматриваются вопросы создания систем прогнозирования распределения температурного поля, обусловленного разогревом вследствие облучения. Выполнено измерения зависимостей механических характеристик низкоуглеродистых сталей в зависимости от флюенса. Проведен электронномикроскопический анализ изломов образцов, облученных различными дозами.

**Ключевые слова:** радиационные технологии, флюенс, электронный пучок, низкоуглеродистая сталь.

## PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF INTRODUCTION OF RADIATION PROCESSES IN METALLURGICAL PRODUCTION

S. V. Bytkin, S. E. Donets, O. O. Isaenko, V. V. Lytvynenko, P. O. Frolov

The paper analyzes the ways of introducing radiation effects into the production processes of metallurgical production. The problems of creating systems for predicting the distribution of the temperature field due to heating due to irradiation are considered. The dependence of the mechanical characteristics of low-carbon steels as a function of fluence has been measured. Electron microscopic analysis of the fractures of samples irradiated with various doses was conducted.

**Keywords:** radiation technologies, fluence, electron beam, low-carbon steel.

### ВСТУП

Серед сучасних напрямів розвитку технологічних пристроїв, що здатні стати стратегічними в розвитку провідних економік розвинених країн вирізняється неенергетичне використання джерел іонізуючого випромінювання. Незважаючи на достатньо великий досвід використання іонізуючих випромінювань в різноманітних технологічних процесах [1–3], в теперішній час відбувається переосмислення ролі механізмів, що забезпечують

досягнення заданих властивостей технологічних об'єктів при використанні джерел іонізуючого випромінювання. Якщо брати основну тезу визначення нанотехнологій, яка полягає в тому, що це є управління будовою та технологічними процесами на наномасштабному та меншому рівнях, то радіаційні технології використовують саме інструмент наномасштабного та субнаномасштабного впливу, а саме, частинки іонізуючого випромінювання, які завдяки високій проникаючій

здатності ініціюють первинні процеси, що спричиняють ланцюжок необхідних фізичних, хімічних та біологічних перетворень. Слід зазначити, що зважаючи на поатомний та помоллекулярний механізм передачі енергії, значення дози, що передається в єдиному акті взаємодії може дорівнювати кільком електрон-вольтам. Разом з тим, відзначаючи відмінність механізму передачі енергії, який відрізняється тим, що потік іонізуючих частинок миттєво занурюється значно глибше аніж за умов обробки матеріалу традиційними фізичними полями, енергія первинних часинок вище значення. А обмеження до максимальної енергії первинного випромінювання зумовлено граничними значеннями подолання кулонівського бар'єру, що може спричинити реакції ядерного поділу та утворення нестабільних елементів. Зважаючи на те, що на даний час відбувається перегляд пріоритетів розвитку галузей економіки в Україні та стратегічна зміна постачання енергоносіїв, застосування радіаційних технологій повинно розглядатись саме в такому ракурсі. По-перше, ці технології могли б стати суттєвим каталізатором, який дозволив би піднести рівень доданої вартості продукції, що постачається на експорт; по-друге, вони б дозволили вирішити низку екологічних проблем, зумовлених застосуванням вуглецевої сировини в паливно-енергетичному комплексі та металургії. Успішна практична реалізація цих задач потребує інвентаризації напрямків використання радіаційних технологій з огляду на структуру експорту України, внутрішнього ринку та наявності можливостей технічного супроводу радіаційних технологій на належному рівні.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

За основний критерій розгляду найбільш актуальних галузей для впровадження радіаційних процесів оберемо їх питому вагу в структурі експорту України, оскільки це є не тільки запорукою сталого розвитку економіки але й зоною щільного конкурентного зіткнення з постачальниками інших країн. Послугуючись даними роботи [4], бачимо що до цих галузей належать, в першу чергу, металургія та агропромисловий комплекс. Розглядаючи ці галузі, як провідні, буде

справедливим сказати, що рівень технологічного устрою, на якому вони будуть перебувати, може стати визначальним для розвитку решти напрямків економіки і тією рушійною силою, яка дасть можливість вивести їх у лідери економічного поступу держави. Радіаційні технології в зазначеному напрямку розвитку мають свою достатньо ємну нішу, і їх використання дасть можливість піднести рівень технологічного устрою низки галузей економіки. Ця задача в свою чергу має вирішуватись через визначення способів та методологій застосування різноманітних радіаційно-фізичних ефектів щодо тієї або іншої технології а також розробки розрахункових інструментів для on line діагностики радіаційних перетворень в технологічних об'єктах. З огляду на це нами ставилась задача встановлення можливості модифікації споживчих властивостей сталі — 45ХН2МФА шляхом опромінення пучком релятивістських електронів в режимі відпалу дефектів. Також здійснювалась розрахункова оцінка розподілу температури в опромінюваних об'єктах.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Зразки сталі — 45ХН2МФА, 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 Mn; 1,3–1,80 Ni; P < 0,025; 0,80–1,10 Cr; S < 0,025) опромінювались на прискорювачі ЛУЕ-10 ННЦ ХФТІ. (Енергія електронів ~8,2-8,3 МэВ, струм пучка — 0,8 мА. Товщина зразка 6 мм, ширина робочої частини 20 мм довжина робочої частини 420 мм. Під опроміненням зразки витримувались з рівномірними часовими інтервалами від 210 с до 300 с. З метою запобігання виникнення залишкової активності зразки з боку опромінення були захищені алюмінієвим екраном рис. 1. Позиціонування під пучком здійснювалось із застосуванням системи оптичного спостереження, описаної в роботі [5]. Растрова електронна мікроскопія проводилась на мікроскопі РЕМ-110. Механічні випробування проводились в лабораторії металознавства Центру досліджень та атестації продукції МК «Запоріжсталь».



Рис. 1. Фото зразків для опромінення



Рис. 2. Фото зразків після випробувань на розривній машині та установці визначення ударної в'язкості

### 3. ОБГОВОРЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Застосування електронних пучків у металургійному виробництві може ґрунтуватись на імпульсних ефектах, які передбачають одночасний перебіг сукупності процесів поверхневого переплавлення, радіаційного загартування, стимулювання твердофазних перетворень унаслідок активізації процесів дифузії та збудження електронної підсистеми. Електронний пучок при цьому виступає, ще й як унікальний інструмент просторового розподілу енергій в об'ємі технологічного об'єкту, адже максимум енерговиділення припадає на підповерхневу область. При таких режимах опромінення найбільш виразним є ефект підвищення мікротвердості, внаслідок загартування та можливого утворення низки карбідів, про що ми писали в роботах [6, 7]. Іншим радіаційним ефектом, який може бути інтегрованим до технологічного процесу в металургії є радіаційно-термічна рекристалізація сплавів. Як зазначалось в роботі [8], при опроміненні електронним пучком листова сталь набуває більш пластичних властивостей, стає більш технологічною в подальшій обробці а отже розширює ринки збуту. Така обробка замінює технологічну операцію відпалу в ковпакових печах, при цьому значно скорочується тривалість

процесу та знижується температура [8]. З метою встановлення первинних ознак модифікації властивостей матеріалу нами було обрано порівняно невеликі значення флюенсу опромінення  $\cong 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup>.

Математичне формулювання задачі має такий вигляд:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot \Delta T = p(r, z, t). \quad (1)$$

де  $c$  — теплоємність,  $\rho$  — щільність,  $k$  — теплопровідність матеріалу.  $p(r, z, t)$  — просторово часовий розподіл поглиненої енергії випромінювання

1. початкові умови  $T(r, z, 0) = T_0.$  (2)

$$T(r, H, t) = T_0,$$

2. граничні умови  $k \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0,$  (3)

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0.$$

З урахуванням осьової симетрії поля (1) можна записати у такому вигляді

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - k \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = p(r, z, t),$$

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = p(r, z, t).$$

Згідно з правилом отримання функціоналу з диференціального рівняння можна записати

$$\begin{aligned} \delta I(T) = & \int_V \left[ -k \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \left( p(r, z, t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] \times \\ & \times \delta T \cdot dV. \end{aligned} \quad (4)$$

Елемент об'єму в даному випадку має вигляд

$$dV = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr dz. \quad (5)$$

Тоді (4) перетвориться в

$$\partial I(T) = 2 \cdot \pi \cdot \int_z \int_r \left[ -k \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - k \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) - r \cdot \left( p(r, z, t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] \cdot \partial T \cdot dr \cdot dz. \quad (6)$$

Знаходячи інтеграли, отримаємо що функціонал матиме вигляд

$$I(T) = \pi \cdot \int_z \int_r \left[ k \cdot r \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + k \cdot r \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2 \cdot r \cdot \left( p(r, z, t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) \cdot T \right] \times \\ \times dr \cdot dz - 2 \cdot \pi \cdot k \int_r r \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot T \cdot dr - 2 \cdot \pi \cdot k \int_z r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot T \cdot dz. \quad (7)$$

Вираз (7) можна записати у такому вигляді

$$I(T) = \pi \cdot \int_z \int_r \left[ k \cdot r (\nabla T)^2 - 2 \cdot r \cdot \left( p(r, z, t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) \cdot T \right] \cdot dr \cdot dz. \quad (8)$$

Розіб'ємо область на  $N$  кінцевих елементів порядку  $n$ , тоді з огляду на безперервність температури функціонал окремого елемента визначається так само виразом (8).

Функція  $T(r, z)$  може бути апроксимована усередині елемента повним поліномом порядку  $n$

$$T(r, z) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot T_i, \quad (9)$$

де

$$m = \frac{1}{2}(n+1)(n+2), \quad (10)$$

де  $\alpha_i = f(r, z)$  — інтерполяційний поліном.

Формулювати задачу будемо в локальних координатах трикутника, зв'язок яких із циліндричними такий

$$r = L_1 r_1 + L_2 r_2 + L_3 r_3, \\ z = L_1 z_1 + L_2 z_2 + L_3 z_3. \quad (11)$$

Геометричний зміст локальної координати — відношення довжини перпендикуляра, опущеного із точки  $(r, z)$  на одну із граней симплекса, до довжини опущеного на ту ж грань перпендикуляра з вершини симплекса,

що протилежна до даної грані. Просторовий розподіл поглинутої енергії в одиниці об'єму потужності можна визначити за виразом

$$p(r, z, t) = P_m \cdot \exp \left[ - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 - \left( \frac{z - z_m}{\Delta z_m} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

де  $r_0$  — параметр, що характеризує поперечний розмір пучка;  $r$  — відстань від центру пучка в площині поверхні;  $z_m$  — положення максимуму розподілу енергії;  $\Delta z_m$  — його півширина;  $P_m$  — значення максимуму енергії.

Значення максимуму можна знайти за наступною формулою

$$P_m = \frac{2 \cdot (1 - W_\eta) \cdot P_e}{\Delta z_m \sqrt{\pi} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z_m}{\Delta z_m} \right) \right]}; \\ P_e = \frac{i_1 \cdot E_1}{e \cdot \pi \cdot r_0^2}; \\ W_\eta = 0,5 \cdot \eta + 0,4 \cdot \eta^2, \quad (13)$$

де  $i_1$  — струм первинних електронів;  $E_1$  — їх енергія;  $e$  — їх заряд;  $\eta$  — коефіцієнт зворотного розсіювання.

Температурний розподіл на поверхні мішені після 300 секунд опромінення з урахуванням нерівномірного розподілу густини струму пучка представлено на рис. 3.

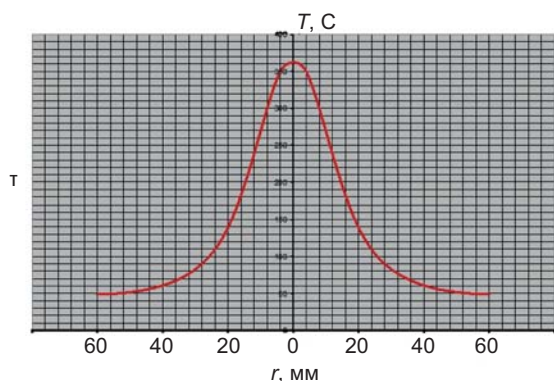


Рис. 3. Розподіл температури вздовж поперечного перетину опромінюваного зразка

Як бачимо при ширині робочої частини зразка 20 мм та з урахуванням розширення поля пучка внаслідок розсіювання на екрані, розподіл температурного поля буде достатньо рівномірним. На рис. 4, 5, 6 ми спостерігаємо очевидний тренд підвищення пластичних характеристик наших зразків по мірі збільшення флюенсу. Хоча його значення  $\cong 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup> є порівняно невеликим, в той же час, наприклад, за даним роботи [9] при низькотемпературному опроміненні Al сплавів великозарядними іонами спостерігаються первинні стадії збільшення концентрації дислокацій. За умов опромінення з наростаючим розігрівом до температури близько 500 °C буде переважати процес відпалу дефектів, які є стопорами руху дислокацій. Внаслідок цього будуть покращуватись характеристики пластичності: ударна в'язкість, часовий опір руйнуванню, межа плинності (рис. 4–6).

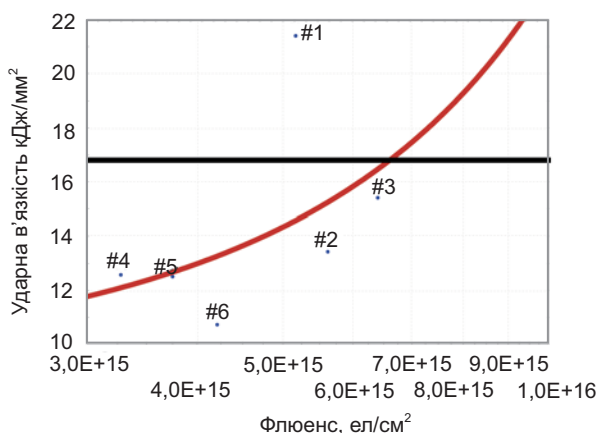


Рис. 4. Залежність ударної в'язкості від величини флюенсу

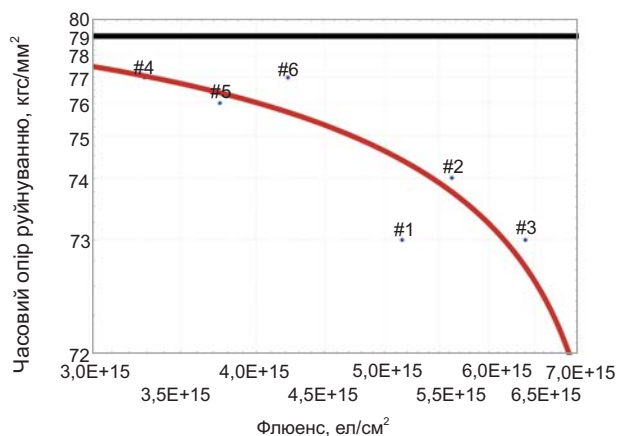


Рис. 5. Залежність часового опору руйнуванню від величини флюенсу

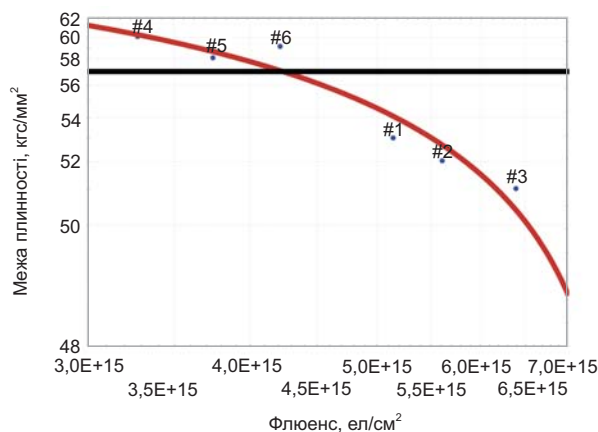


Рис. 6. Залежність межі плинності від величини флюенсу

Ці закономірності також підтверджуються аналізом фрактограм зламу зразків. На рис. 7а зображено злам неопроміненого зразка, на якому видно сліди крихкого руйнування з елементами утворення стільникової структури. По мірі збільшення флюенсу опромінення змінюється характер зламу. Так, на рис. 7б починають спостерігатися ознаки струмкової структури зламу з утворенням протяжних вихороподібних зламів, але ямкова структура замінюється тріщинуватою.

На наступному зразку, який одержав більшу поверхневу дозу опромінення, бачимо відсутність тріщинуватості, яка замінилась мережею сполучених пор, що є ознакою прояву поля концентраторів напружень [10]. Рис. 7г показує, що перехід до ще більш в'язкого механізму руйнування, демонструє прояв ротаційних мод та фазових перетворень [11], які виникали внаслідок радіаційно-термічного вивільнення енергії дефектів від первинної прокатки матеріалу. Позитивна роль цього ефекту полягає в уникненні умов подальшого розвитку дефекту та руйнування матеріалу.

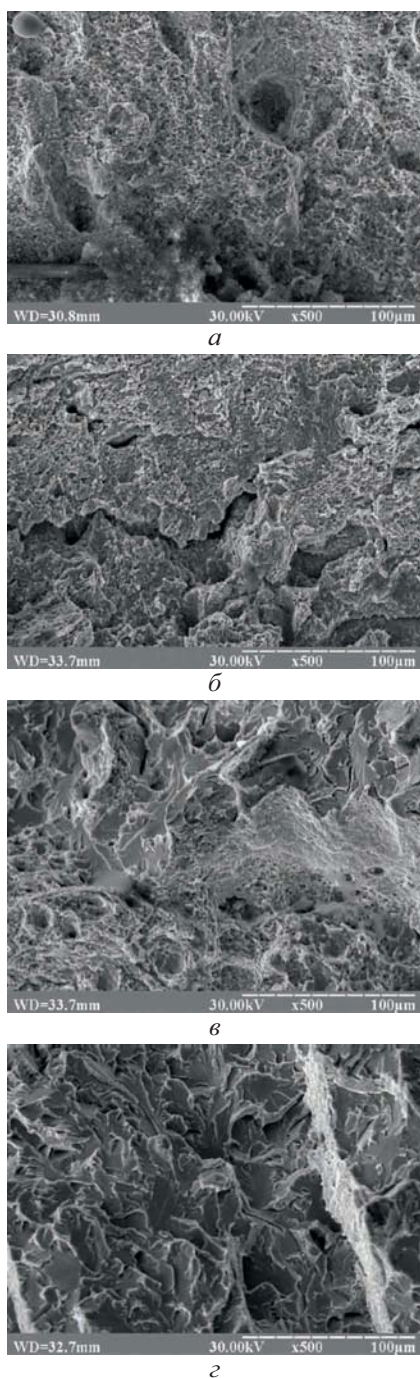


Рис. 7. Фрактогарми зламів зразків: а) неопромінений зразок; б) флюєнс  $3,3 \times 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup>; в) флюєнс  $5,2 \times 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup>; з) флюєнс  $6,4 \times 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup>

## ВИСНОВКИ

Опромінення електронним пучком здатне ініціювати процеси відпаду дефектів та відповідного покращення пластичних характеристик конструкційних сплавів на основі заліза. Шляхом регулювання значення дози опромінення можливо одержувати задані значення показників пластичності матеріалу.

Розрахункові числові моделі дозволяють прогнозувати температурний розподіл та

розподіл поля доз опромінення в опромінюваних об'єктах і перетворювати технологічний процес в керований. Прискорювачі електронів мають перспективу застосування в прокатному металургійному виробництві, як інструмент підвищення споживчих характеристик прокату.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Айзацкий Н. И., Борискин В. Н., Довбня А. Н. Радиационные технологии с применением электронного и тормозного излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия ЯФИ. — 1999. — № 1 (33). — С. 61–63.
2. Chmielewski A. G. Technological development of EB flue gas treatment based on physics and chemistry of the process // Radiat. Phys. Chem. — 1995. — Vol. 46. — P. 1057–1062.
3. Базалеев Н. И., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В. Электрофизические технологии: новая концепция обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Наука та інновації. — 2005. — Т. 1, № 1. — С. 99–109.
4. Быткин С. В. Конкурентная разведка конъюнктурно-технологических перспектив традиционного и high-tech экспорта Украины. — Запоріжжя. — Запорізька дер. інж. акад. — 2017. — 280 с.
5. Boriskin V. N., Romanovsky S. K., Momot V. A., Titarenko Yu. A., Titov D. V., Uvarov V. L., Shevchenko V. A., Shelepko S. V. Optical monitoring the temperature of object irradiate data n electron accelerator // Problems of atomic science and technologies. — 2015. — № 6 (100). — P. 105–107.
6. Быткин С. В., Исаенко А. А., Клепиков В. Ф., Донец С. Е. Особенности модифицирующей обработки низкоуглеродистых сталей сильно-точными релятивистскими пучками электронов // Журнал нано- та електронної фізики. — 2017. — Т. 9, № 4. — С. 04013 (6с).
7. Быткин С. В., Исаенко А. А., Авраменко М. В., Литвиненко В. В. / Влияние радиационно-технологической обработки низкоуглеродистых сталей на их физико-механические свойства // Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії. — 2017. — Т. 1(37). — С. 59–65.
8. Гофман Ю. И., Кирдин А. И., Коваленко Т. А., Мизик И. В., Письменецкий С. А.

Перспективные технологические применения электронных пучков в листопрокатном производстве // Весник ХНУ. Серія Ядра, частини, поля. — 2000. — № 469, вып.1. — С. 61–64.

9. Беляева А. И., Галуза А. А., Дидык А. Ю., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Робук В. Н., Скуратов В. А., Слатин К. А. Эллипсометрические исследования оптических свойств поверхности алюминиевого сплава, облученного высокоэнергетическими ионами ксенона // ФизХОМ. — 2009. — № 5. — С. 33–36.
10. Панин В. Е., Панин А. В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. — 2005. — № 8(5). — С. 7–15.
11. Olemskoi A. I., Klepikov V. F. The theory of spatiotemporal pattern in nonequilibrium systems // Physics reports. — 2000. — Vol. 338, No. 6. — P. 571–677.

## REFERENCES

1. Ajzackij N. I., Boriskin V. N., Dovbnya A. N. Radiacionnye tehnologii s primeneniem elektronного i tormoznogo izlucheniya // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya YaFI. — 1999. — No. 1 (33). — P. 61–63.
2. Chmielewski A. G. Technological development of EB flue gas treatment based on physics and chemistry of the process // Radiat. Phys. Chem. — 1995. — Vol. 46. — P. 1057–1062.
3. Bazaleev N. I., Klepikov V. F., Litvinenko V. V. Elektrofizicheskie tehnologii: novaya koncepciya obezzarazhivaniya vody ul'tra-fioletovym izlucheniem // Nauka ta innovacii. — 2005. — Vol. 1, No. 1. — P. 99–109.
4. Bytkin S. V. Konkurentnaya razvedka kon'yunkturno-tehnologicheskikh perspektiv tradicionnogo i high-tech eksporta Ukrainy. — Zaporizhzhya. — Zaporiz'ka der. inzh. akad. — 2017. — 280 p.
5. Boriskin V. N., Romanovsky S. K., Motom V. A., Titarenko Yu. A., Titov D. V., Uvarov V. L., Shevchenko V. A., Shelepko S. V. Optical monitoring the temperature of object irradiate data n electron accelerator // Problems of atomic science and technologies. — 2015. — No. 6 (100). — P. 105–107.
6. Bytkin S. V., Isaenko A. A., Klepikov V. F., Donec S. E. Osobennosti modifiziruyushej obrabotki nizkouglerodistyh stalej sil'notochnymi relyativistskimi puchkami elektronov // Zhurnal nano- ta elektronnoï fiziki. — 2017. — Vol. 9, No. 4. — P. 04013 (6cc).
7. Bytkin S. V., Isaenko A. A., Avramenko M. V., Litvinenko V. V. / Vliyanie radiacionno-tehnologicheskoy obrabotki nizkouglerodistyh stalej na ih fiziko-mehanicheskie svojstva // Metalurgiya: naukovı praci Zaporiz'koï derzhavnoï inzhenernoï akademii. — 2017. — Vol. 1(37). — P. 59–65.
8. Gofman Yu. I., Kirdin A. I., Kovalenko T. A., Mizik I. V., Pis'meneckij S. A. Perspektivnye tehnologicheskie primeniya elektronnyh puchkov v listoprokatnom proizvodstve // Vesnik HNU. Seriya Yadra, chasticy, polya. — 2000. — No. 469, vyp.1. — P. 61–64.
9. Belyaeva A. I., Galuza A. A., Didyk A. Yu., Klepikov V. F., Litvinenko V. V., Robuk V. N., Skuratov V. A., Slatin K. A. Ellipsometricheskie issledovaniya opticheskikh svojstv poverhnosti alyuminievogo splava, obluchennogo vysoko-energeticheskimi ionami ksenona // FiHOM. — 2009. — No. 5. — P. 33–36.
10. Panin V. E., Panin A. V. Effekt poverhnostnogo sloya v deformiruemom tverdom tele // Fizicheskaya mezomehanikka. — 2005. — No. 8(5). — P. 7–15.
11. Olemskoi A. I., Klepikov V. F. The theory of spatiotemporal pattern in nonequilibrium systems // Physics reports. — 2000. — Vol. 338, No. 6. — P. 571–677.