

УДК 621.928:621.789

С.В. БЫТКИН<sup>(1)</sup>, начальник отдела, кандидат технических наукА.А. ИСАЕНКО<sup>(1)</sup>, ведущий специалист отделаВ.В. ЛИТВИНЕНКО<sup>(2)</sup>, заместитель директора, доктор технических наукМ.В. АВРАМЕНКО<sup>(3)</sup>, руководитель проектов

## ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

<sup>(1)</sup> ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь»; г. Запорожье<sup>(2)</sup> Институт электрофизики и радиационных технологий НАНУ, г. Харьков<sup>(3)</sup> ЧАО «Трубогосталь», г. Коростень

Выполнены экспериментальные исследования изменения физико-механических свойств низкоуглеродистых сталей после радиационно-технологической обработки облучением электронами с энергией 3,0 и 5,0 МэВ. Показана возможность использования указанной обработки для управляемого изменения свойств поверхности и объема низколегированной стали при различных режимах облучения металла.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, радиационно-технологическая обработка, облучение электронами, управляемое изменение физико-механических свойств

*Введение.* Физико-технологические основы модификации твердых тел с использованием ионизирующего излучения изучаются для создания прикладных методов воздействия на материалы, существенно изменяющие их свойства [1]. Разработка и применение радиационно-технологических процессов (РТП) характерно для всех отраслей промышленности, в том числе и металлургии [2,3].

*Литературный обзор.* В настоящее время разработаны методы радиационно-термического упрочнения стальных изделий, благодаря которым повышается износостойкость деформирующего технологического оборудования металлургических предприятий, в частности, предложена технология радиационно-термического упрочнения изношенных и новых валков холодной прокатки, позволяющая в 1,5...2,0 раза увеличить их стойкость по сравнению с валками, закаленными токами высокой частоты [4].

В металлургической промышленности важным является применение радиационно-технологических процессов для достижения технологической пластичности стали, оцениваемой по величине ударной вязкости, повышение которой позволяет подвергать ее дальнейшим деформационным переделам без предварительных технологических операций [5]. Основным сдерживающим фактором применения радиационных технологий является отсутствие достаточных данных по изменению структуры поверхностных слоев различных материалов, подвергнутых обработке электронным пучком [6].

*Постановка задачи.* Целью настоящей работы является оценка принципиальной возможности использования радиационно-технологической обработки (РТО) для управляемого изменения физико-механических свойств облученной поверхности и объема низкоуглеродистой стали при различных режимах облучения.

*Основная часть исследований.* В работе исследовали образцы из сталей 45ХН2МФА, 09ГСА и Ст3пс, которые подвергали облучению пучком электронов с различными характеристиками.

На первом этапе эксперимента (энергия электронов  $\approx 5$  МэВ, ток пучка электронов  $\approx 1,0$  мА, диаметр пучка  $\approx 400$  мм, длительность импульсов – 210...410 с) при толщине образца  $\leq 6$  мм облучали весь объем материала в зоне разрушения. Измеряли пределы текучести  $\sigma_T$ , прочности  $\sigma_B$  и ударной вязкости КСУ металлопроката стали 45ХН2МФА стандартной формы до и после облучения. Используемые методики для измерения указанных параметров, а также оборудование, описаны, например, в работе [7].

Как показали результаты испытаний [8], наблюдали существенное снижение механической прочности ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ) образцов при флюенсе электронов  $\Phi_c \geq 4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> (табл. 1).

В диапазоне облучения электронов  $\Phi = 3,3...4,2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> наблюдается заметное увеличение НВ образцов от исходного  $\approx 208$  до облученного  $\approx 220$  НВ единиц, то есть на 5,77 % при практически стабильных значениях  $\sigma_T \approx 578$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_B \approx 608$  [Н/мм<sup>2</sup>].

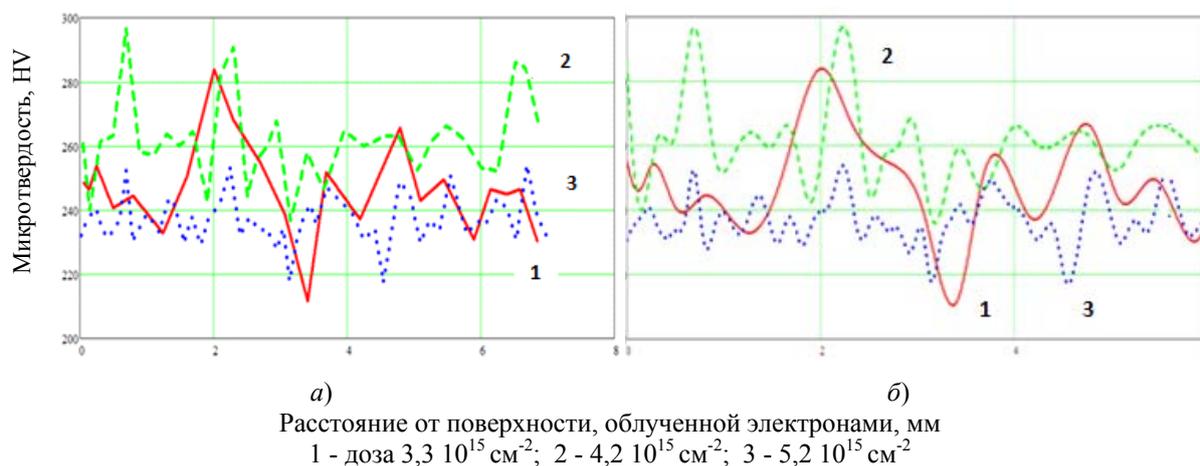
**Таблица 1** – Изменение физико-механических свойств образцов металлопроката стали 45ХН2МФА после облучения потоком электронов с энергией 5,0 МэВ

Показатель качества	Значение показателя качества металла при дозе облучения потоком электронов, $10^{15} \text{ см}^{-2}$ :					
	3,3	3,8	4,2	5,2	5,6	6,4
Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	588,4	568,8	578,6	519,8	510,0	500,2
Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>	755,1	745,3	755,1	716,0	726,02	716,0
Удельная вязкость, кДж/мм <sup>2</sup>	12,6	12,5	10,7	21,4	13,4	15,4
Твердость по Бринеллю, НВ единиц	215	214	219	203	207	207

Полученные результаты не противоречат работе [4], в которой максимально достигнутый уровень повышения упрочнения составляет 1,5...3,0 HRC для валков с поверхностной прочностью 62 HRC или 4,83 %.

Микротвердость облученного образца не монотонно изменяется по его глубине, результа-

ты измерений приведены на рис. 1,а [9]. Зафиксировано образование максимума НВ на глубине  $\approx 2,0$  мм от облученной поверхности при  $\Phi_e \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  ( $\text{HV} \approx 280$ ), образование двух пиков с  $\text{HV} \approx 300$  ( $\approx 0,5$  и  $2,0$  мм) при  $\Phi_e \approx 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . При  $\Phi_e \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  наблюдается эффективное усреднение НВ по глубине образца, рис. 1,б.



**Рисунок 1** – Влияние облучения электронами с энергией 5 МэВ на распределение микротвердости по глубине образца стали 45ХН2МФА:

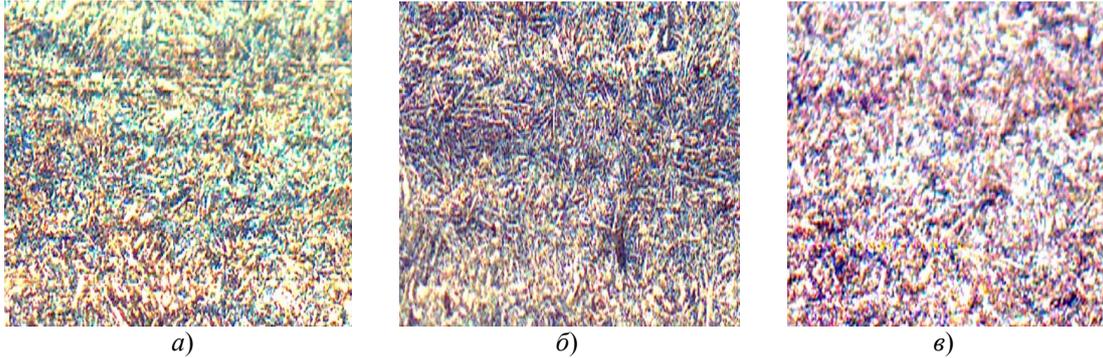
- а) экспериментальные данные без статистической обработки,  
б) результаты после применения статистической обработки (кубические сплайны)

Изменение физико-механических свойств стали не сопровождается заметным изменением ее микроструктуры (рис. 2), что свидетельствует о преобладании эффектов, связанных с накоплением радиационных дефектов при облучении, а не о термическом воздействии на сталь. Логично предположение о заметном влиянии реакции углерода раствора внедрения с образовавшимися вакансиями при  $\Phi_e \geq 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , определенном уменьшении его концентрации и, как следствие, возрастании пластичности стали, что определяет воздействие облучения и на пределы текучести и твердости материала.

Возможно, что данную реакцию лимитирует взаимодействие с вакансиями других легирующих примесей, концентрация которых в стали 45ХН2МФА соизмерима с концентрацией угле-

рода (ванадия, кремния, молибдена и марганца). Улучшение НВ при  $\Phi \approx 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  может быть связано с дополнительным образованием карбидов при участии атомов железа, компонентов френкелевской пары и междоузельного углерода.

Микроструктура стали 45ХН2МФА может быть модифицирована в приповерхностной области при уменьшении энергии пучка электронов до 0,32 МэВ, увеличении силы тока до 2000 А (длительность импульса –  $5 \cdot 10^{-6}$  с, диаметр пучка  $\approx 50$  мм). Экспериментальные результаты подтверждают, что изменение микроструктуры под действием облучения приводит к существенному возрастанию поверхностной микротвердости НВ образцов.



**Рисунок 2** – Микроструктура стали 45ХН2МФА (сорбит) [9] при облучении электронами с энергией 5МэВ: а)  $\Phi \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , б)  $\Phi \approx 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , в)  $\Phi \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Увеличение  $\times 200$

Микроструктура стали 45ХН2МФА состоит из зернистого перлита с микротвердостью 258 НВ. Возле поверхности образца, после упрочняющей обработки на глубину до 100 мкм наблюдается упрочненный слой мартенсита [10] с микротвердостью 764 НВ, что практически в три раза выше, чем микротвердость необлученного образца. Аналогичный процесс наблюдается и для других марок стали.

Для сталей 45ХН2МФА и 09Г2, содержа-

щих легирующие компоненты, изменение микротвердости имеет меньшую глубину залегания, которая снижается с увеличением содержания легирующих компонентов, а повышение микротвердости является ступенчато выраженным с резким переходом к неупрочненному (исходному) слою. Это свидетельствует о менее эффективном проникновении электронов в легированный прокат, чем в рядовой металл стали Ст3пс (табл. 2).

**Таблица 2** – Изменение микротвердости по глубине образцов для различных сталей при импульсном низкоэнергетическом облучении электронами током 2 кА

Марка стали	Микротвердость образцов стали, НВ				
	Глубина залегания упрочненного слоя, мкм				
	0	200	400	600	800
45ХН2МФА	796	313	252	251	250
09Г2	501	420	246	238	234
Ст3пс	497	422	305	240	232

С точки зрения технологического использования облучения, помимо достижения максимально высокой поверхностной микротвердости, необходимо поддержание ее на эффективно высоком уровне на возможно большей глубине от поверхности металла. В работе [11] достигнуто образование мартенсита на глубину до 2,0 мм при использовании электронов с энергией 3,5 МэВ и током пучка 500 мкА. Распределение твердости по Бринеллю (НВ) на облучаемой поверхности является неоднородным (рис. 3) и может быть описано с применением гистограммы распределения численных значений НВ функцией распределения плотности вероятности в среде «STATISTICA», а для удобства сравнения изменения физико-механических свойств различных марок сталей – переходом к вероятностным зависимостям в среде «MathCAD». Например, распределение плотности вероятности НВ для стали 09Г2 до облучения имеет вид:

$$f\rho_{\Phi_{09Г2(НВ)}} = \frac{1}{2,4} \cdot \exp\left(-\frac{HB-144,25}{2,4}\right) \cdot \exp^{-\exp\left(\frac{HB-144,25}{2,4}\right)} \quad (1)$$

После облучения экспозиционной дозой электронов  $\Phi_e \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  распределение для указанной стали можно записать как

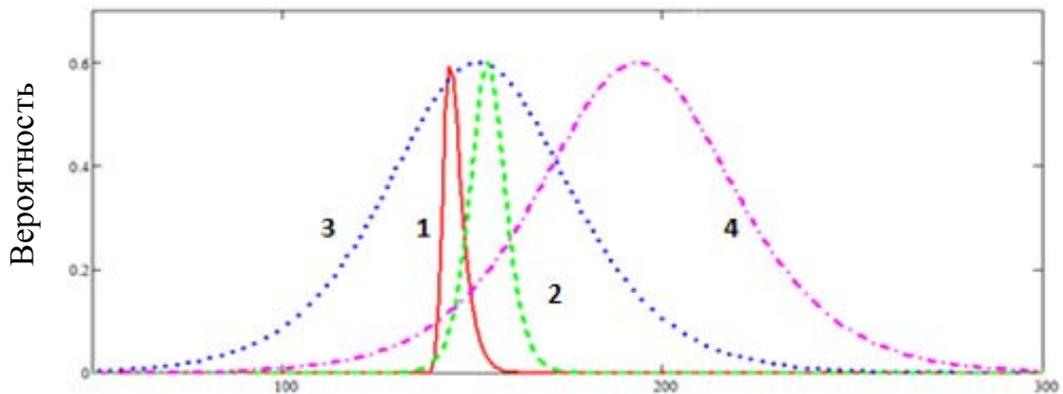
$$f\rho_{\Phi_{10^{15}09Г2(НВ)}} = \frac{1}{16} \cdot \exp\left(-\frac{HB-151,5}{16}\right) \cdot \left[1 + \exp\left(\frac{HB-151,5}{16}\right)\right]^{-2} \quad (2)$$

Обобщенные сравнительные результаты изменения НВ под действием облучения для исследованных образцов сталей представлены на рис. 3.

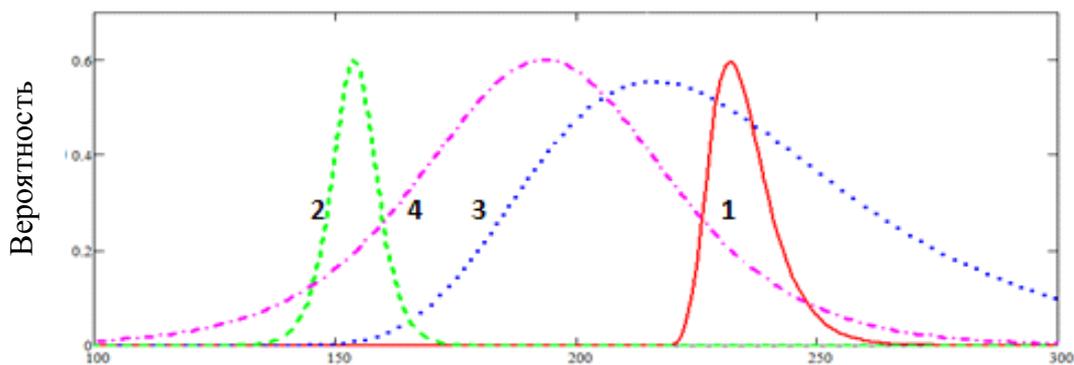
С технологической точки зрения влияния на НВ наиболее эффективной является радиационная обработка нелегированной стали Ст3пс: смещение распределения вправо – в сторону больших значений указанного параметра. Существенно слабее выражен эффект для стали 09Г2, прежде всего, вследствие более высокого со-

держания марганца (1,70 % по сравнению с 0,65 % в СтЗпс) и кремния (0,80 % по сравнению с 0,15 % в СтЗпс). Для стали 45ХН2МФА наблюдается обратный эффект, то есть смещение рас-

пределения в сторону меньших значений параметра НВ, что логично связать с наличием в указанной стали ванадия (0,18 %), молибдена (0,30 %), хрома (1,10 %) и никеля (1,80 %).



1, 3 - исходное значение для стали 09Г2 и СтЗпс; 2, 4 - значение после облучения  
а)



1, 3 - исходное значение для стали 45ХН2МФА и СтЗпс; 2, 4 - значение после облучения  
б)

**Рисунок 3** – Влияние радиационно-технологической обработки на твердость поверхности различных сталей при импульсном низкоэнергетическом облучении электронами током 2кА; а) сравнение СтЗпс и 09Г2, б) сравнение СтЗпс и 45ХН2МФА

При обосновании возможности и целесообразности применения РТО для всех исследованных видов сталей применяли следующую методику. Определяли эффективную глубину залегания упрочненного слоя путем дифференцирования в среде «MathCAD» зависимостей для исследуемых сталей (для стали 45ХН2МФА):

$$f_{1cm45.XH_2.M\Phi A(x_1)} = 233,08 + \frac{555,75}{1 + \exp\left(\frac{x_1 - 142,93}{29,48}\right)} \quad (3)$$

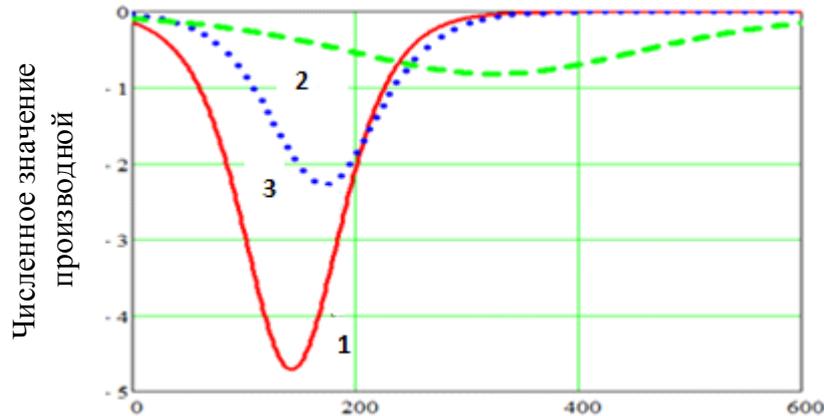
при  $x_1 = 0 \dots 1000$ .

Результаты определения приведены на рис. 4. Точка максимального значения производной ( $h_{\max}$ ) соответствует глубине, на которой максимально быстро уменьшается НВ, образуя «ступеньку».

Используя полученные значения  $h_{\max}$ , в среде «MathCAD», определяли интегральные мик-

ротвердости для сталей 45ХН2МФА, 09Г2А и СтЗпс, значения которых составляют соответственно: -273,854; -144,685 и -149,475.

Выбор энергии облучения электронами выполняли с использованием данных, представленных в работе [12] об экстраполированном пробеге электронов в среде с различной плотностью, путем их аппроксимации в среде «STATISTICA». Для приближенного выбора энергии при проведении РТО для мишени с плотностью  $7800 \text{ кг/м}^3$  достаточно энергии электронов  $E \leq 3,1 \text{ МэВ}$  электронов для достижения экстраполированного пробега  $\approx 6,12 \text{ мм}$ . Использование  $E \leq 1,0 \text{ МэВ}$  нецелесообразно из-за сильно нелинейной зависимости глубины залегания упрочненного слоя при РТО от концентрации в материале легирующих примесей, которая для исследуемых образцов стали представлена в табл. 3.



**Рисунок 4** – Смещение глубины залегания упрочненного слоя при РТП в зависимости от марки стали: для 45ХН2МФА (1)  $h_{max} = 143$  мкм, для 09Г2 (2) - 171 мкм, для СтЗпс (3) - 331 мкм

**Таблица 3** – Влияние концентрации легирующих примесей (Cr, Ni) на глубину залегания упрочненного слоя

Концентрация легирующей примеси хрома, %	Глубина залегания упрочненного слоя, мкм	Концентрация легирующей примеси никеля, %	Глубина залегания упрочненного слоя, мкм
0,20	332	0,26	331
0,31	145	0,31	145
1,11	171	1,80	167

Используя средневзвешенные значения НВ и интегральной микротвердости для образцов стали, получают следующую зависимость (табл. 4).

$$Tech_{Eff} = \frac{\int_0^{1000} f \rho_{\Phi 10^{15} 09Г2(НВ)} \cdot НВ \cdot dНВ}{\int_0^{1000} f \rho_{\Phi 0,09Г2(НВ)} \cdot НВ \cdot dНВ}, \quad (4)$$

которая практически линейно зависит от  $h_{max}$  (табл. 5).

**Таблица 4** – Влияние интегральной микротвердости (НV) облученных образцов сталей на средневзвешенную поверхностную твердость (НВ)

Интегральная микротвердость, НV	130	144	149	274
Средневзвешенная поверхностная твердость, НВ	161	171	174	231

**Таблица 5** – Влияние глубины залегания упрочненного слоя на коэффициент технологической эффективности

Глубина залегания упрочненного слоя, мкм	143	171	331
Коэффициент технологической эффективности	1	1,04	1,26

Таким образом, для получения упрочненного слоя возможно использование тока пучка электронов, точное значение которого должно подбираться исходя из требования отсутствия повреждения поверхности, но при достаточном тепловом воздействии на материал для достижения температуры мартенситного перехода при отсутствии повреждения поверхности. При выполнении этого условия необходимо выбирать энергию облучения, обеспечивающую достижение возможно более высокого  $h_{max}$  для повышения интегральной микротвердости:

*Выводы и рекомендации.*

1. Подтверждена возможность использования радиационно-технологической обработки (РТО) для технологического изменения физико-механических свойств металлов с различным уровнем легирования.

2. Предложены практически применимые технологические режимы РТО технологических режимов РТО и методы оценки с точки зрения их эффективности.

**Библиографический список**

1. **Базалеев, Н. И.** Электрофизические радиационные технологии [Текст] / Н. И. Базалеев, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко; монография. – Харьков : Акта. – 1998. – 206 с.

2. **Клепиков, В. Ф.** Розробка та впровадження радіаційних технологій модифікації твердих тіл та обробки конденсованих середовищ [Текст] / В. Ф. Клепиков, М. І. Базалєєв, В. В. Литвиненко та ін. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 2/5 (62). – С. 4-9.
3. **Мацюшенко, І. Ю.** Перспективи розвитку атомної енергетики та радіаційних технологій в Україні // БІЗНЕСІНФОРМ. – 2014. – № 12 – С. 254-266 [Електронний ресурс] / Режим доступу / <http://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-atomnoy-energetiki-i-radiatsionnyh-tehnologiy-v-ukraine>. – Выборка 22.12.2016.
4. **Александрова, Н. М.** Радиационно-термическая обработка валков сфокусированным пучком электронов [Текст] / Н. М. Александрова, В. А. Карпельев, В. В. Селин и др. // Сталь. – 1996. – № 1. – С. 63-65.
5. **Александрова, Н. М.** Материаловедческие основы новых технологий непрерывной разливки и радиационно-термической обработки труднодеформируемых сталей и сплавов [Текст] / Н. М. Александрова // Автореферат диссертации на соискание научной степени доктора технических наук. – М. : Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, 2006. – 342 с.
6. **Шапаренко, А. В.** Електронно-лучева обробка робочих валков холодної прокатки – ресурсосберегаюча технологія в прокатному виробництві [Текст] / А. В. Шапаренко // Інноваційні шляхи рішення актуальних проблем базових галузей, екології, енерго- та ресурсозбереження : збірник трудов ХХІV Міжд. науково-практ. конф., г. Харків. – 06-10.06.2016. – Харків : ГП «УкрНТЦ «Енергосталь», 2016. – 306 с.
7. **Подрезов, Н. Н.** Практические работы по курсу «Контроль и аттестация изделий тяжелого атомного машиностроения» [Текст]: учебно-методические указания / Н. Н. Подрезов. – Волгоград : ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – 48 с.
8. **Исследование № 147 от 20.10.2014., № 77 от 8.06.2015.** – Центр испытаний и аттестации продукции ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь». Лаборатория экспресс-испытаний металлопроката.
9. **Исследование № 3167 от 26.11.2014.** – Центр испытаний и аттестации продукции ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь». Лаборатория металловедения.
10. **Исследование № 4090 от 12.06.2015.** – Центр испытаний и аттестации продукции ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь». Лаборатория металловедения.
11. **Исследование № 3167 от 26.11.2014.** – Центр испытаний и аттестации продукции ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь». Лаборатория металловедения.
12. **Александрова, Н. М.** Новый метод многоциклового радиационно-термического упрочнения малоуглеродистых сталей [Текст] / Н. М. Александрова, А. В. Супов, Т. С. Скобло // Сталь. – 2011. – № 8. – С. 62-67.
13. **Ядерная физика в Интернете.** Взаимодействие частиц с веществом. Взаимодействие электронов с веществом. [Електронний ресурс] / Режим доступу / <http://nuclphys.sinp.msu.ru/partmat/pm02.htm> - Выборка 22.12.2016.

**БИТКІН СЕРГІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ**, кандидат технічних наук, начальник відділу комп'ютерно-технологічного системного аналізу ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» (Запоріжжя, Україна). E-mail: [bytkin@birmir.net](mailto:bytkin@birmir.net)

**ІСАЄНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**, ведучий спеціаліст відділу комп'ютерно-технологічного системного аналізу ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» (Запоріжжя, Україна). E-mail: [studyandwork@ukr.net](mailto:studyandwork@ukr.net)

**ЛИТВИНЕНКО ВОЛОДИМИР ВІКТОРОВИЧ**, доктор технічних наук, заступник директора Інституту електрофізики та радіаційних технологій НАНУ (Харків, Україна). E-mail: [lytvynenko@ukr.net](mailto:lytvynenko@ukr.net)

**АВРАМЕНКО МАКСИМ ВАСИЛЬОВИЧ**, керівник проектів і програм у сфері матеріального виробництва ПАТ «Трубосталь» (Коростень, Україна). E-mail: [max-zpavr@rambler.ru](mailto:max-zpavr@rambler.ru)

## ВПЛИВ РАДІАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБКИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ НА ЇХ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Виконано експериментальне дослідження змінювання фізико-механічних властивостей низьковуглецевих сталей після радіаційно-технологічної обробки опроміненням електронами з енергією 3,0 та 5,0 МеВ. Показана можливість використання зазначеної обробки для керованого змінювання властивостей поверхні й об'єму низьковуглецевої сталі за різних режимів опромінення металу.

Ключові слова: низьколегована сталь, радіаційно-технологічна обробка процес опромінення електронами, кероване змінювання фізико-механічних властивостей металу

**BYTKIN SERGEY**, Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Computer and Technological Systematic Analysis OAJ «Metallurgical Combine «Zaporizhstal'» (Zaporizhzhia Ukraine). Email: E-mail: [bytkin@birmir.net](mailto:bytkin@birmir.net)

**ISAENKO ALEXANDER**, Main Specialist of Department of Computer and Technological Systematic Analysis PAJ «Metallurgical Combine «Zaporozhstal'» (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: [studyandwork@ukr.net](mailto:studyandwork@ukr.net)

**LYTVINENKO VLADIMIR**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of Institute of Electrophysic and radiation technologie NASU (Charkov, Ukraine). E-mail: lytvynenko@ukr.net

**AVRAMENKO MAXIM**, Project and Program Manager in Sphere of Material Production PAJ «Trubostal'» (Korosten', Ukraine). E-mail: max-zpavr@rambler.ru

## **INFLUENCE OF RADIATION-TECHNOLOGICAL TREATMENT OF LOW-CARBON STEELS ON THEIR PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES**

An experimental research of changes in physical-mechanical properties of low carbon steels after radiation-technological treatment with the use of electron irradiation with energy of 3.0 and 5.0 MeV are carried out. There is possibility of using radiation-technological treatment for controlled changes of the surface properties and the volume of low carbon steel with the use of different irradiation modes.

Keywords: the low carbon steel, radiation-technological treatment, process of electron irradiation, controlled changes of physical-mechanical properties of metal

Стаття надійшла до редакції 06.01.2017 р.  
Рецензент, проф. Т.В. Критська

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>