

## Особенности модифицирующей обработки низкоуглеродистых сталей сильноточными релятивистскими пучками электронов

С.В. Быткин<sup>1</sup>, А.А. Исаенко<sup>1</sup>, С.Е. Донец<sup>2</sup>, В.Ф. Клепиков<sup>2</sup>, В.В. Литвиненко<sup>2</sup>, А.А. Старцев<sup>2</sup>,  
Ю.Ф. Лонин<sup>3</sup>, А.Г. Пономарев<sup>3</sup>, В.Т. Уваров<sup>3</sup>, М.В. Авраменко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Запорожсталь», Южное шоссе, 72, 69008 Запорожье, Украина

<sup>2</sup> Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, ул. Чернышевского, 28 а/я 8812,  
61002 Харьков, Украина

<sup>3</sup> ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины, ул. Академическая, 1, 61108 Харьков,  
Украина

<sup>4</sup> ЧАО «ТЗ Трубосталь», ул. Шатрищанская, 65, 11500 Коростень, Украина

(Одержано 17.02.2017, опубліковано online 27.07.2017)

В работе изучено влияние импульсного сильноточного релятивистского электронного пучка на механические свойства ряда низкоуглеродистых сталей. Установлено, что в зоне поглощения энергии излучения наблюдается скачкообразное увеличение значений микротвердости, что связано с мартенситными превращениями. Изучено влияние облучения на значения ударной вязкости, сделано предположение, что снижение ударной вязкости связано с возникновением дополнительных внутренних напряжений.

**Ключевые слова:** Сильноточный электронный пучок, Микротвердость, Ударная вязкость, Внутренние напряжения.

DOI: [10.21272/jnep.9\(4\).04013](https://doi.org/10.21272/jnep.9(4).04013)

PACS numbers: 61.80.Fe, 61.82.Bg, 81.40.Wx

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Применение ускорителей электронов с энергиями  $\leq 200$  кэВ до  $\approx 10$  МэВ для промышленного применения и решения экологических задач является общим трендом мировой экономики, в том числе для стран, имеющих относительно невысокий уровень промышленного развития [1]. Это связано, в значительной степени, с поиском технологий термообработки поверхности низкоуглеродистой стали, применяемой, прежде всего, в оборудовании пищевой промышленности, эксплуатируемом в кислотных средах [2]. Использование энергии пучка электронов с энергией 1...10 МэВ для упрочнения поверхности стали рассматривается как одна из наиболее современных технологий её термообработки [3]. Высокая производительность и воспроизводимость радиационной термообработки (РТО) достигается нагревом приповерхностного слоя без его плавления с последующей самозакалкой [4], приводящей к образованию мартенсита. РТО возможно использовать как универсальную технологию металлообработки, в том числе и в сочетании с традиционными методами упрочнения.

Перспективность указанного направления подтверждается анализом публикаций последних десятилетий. Так в работе [5] установлено положительное воздействие на значение коэффициента трения и коррозионной стойкости сплавов на основе Mg, Al, Ti после их обработки сильноточными импульсными пучками электронов с энергией 40 кэВ, плотностью тока  $10^2$ - $10^3$  А/см<sup>2</sup>, длительностью 0.5-5 мкс. Достижение данного эффекта объясняется растворением частиц вторичных фаз вследствие быстрого затвердевания поверхностного слоя. А также рекристаллизационным перплавом зерен в поверхностном слое порядка 2-3 мкм.

В работе [6] описаны методы радиационно-термического упрочнения изделий из стали путем облучения пучком электронов с энергией частиц 1.5 МэВ и током пучка 11 мА в режиме сканирования. При этом участок облучения нагревался до 400-60 С. В результате обработки образовывался пластинчатый мартенсит, микротвердость повышалась со 150 HV до 450 HV. В этой же работе отмечается эффект увеличения сопротивления усталостному разрушению материала из Ст3. Вследствие облучения электронным пучком с энергией 3.5 МэВ и током пучка 500 мкА. Модифицирующий механизм обеспечивался, по мнению авторов, радиационно-стимулированными режимами нагрева и остывания, при которых происходили мартенситные превращения.

Облучение сильноточными пучками (сотни и тысячи ампер) делает определяющим температурный механизм превращений, вместе с тем, электронный пучок выступает в большей степени как уникальный инструмент мгновенного (длительность импульса составляет микросекунды) распределения энергии в приповерхностной области облучаемого объекта, нежели как фактор инициирования радиационных эффектов. При этом наиболее интенсивное изменение свойств наблюдается в области, получившей количество энергии, достаточное для скоростного переплава поверхности. Так в работе [7] исследовалось модификация пластинчатого перлита стали 65Г при облучении электронным пучком с плотностью энергии 25 Дж/см<sup>2</sup>, длительности импульса 2.5 мкс. При этом глубина проплавления составляла около 4 мкм. Именно в зоне жидкофазного преобразования наблюдались формирование мартенситной структуры. Тогда как в области твердофазных преобразований фиксировались фрагменты пластинчатого и пакетного мартенсита.

Рассматривая технологические перспективы применения радиационно-термических процессов, представляется интересным получать большие толщины модифицированной области, что, соответственно, предполагает использование пучков частиц с более высокими энергиями. Как отмечается в работе [8], достижение превращений на глубинах, превышающих длину пробега частиц, обеспечивается действием упругих, упруго-пластических и ударных волн. Механизм повышения твердости в области радиационного воздействия на примере материала  $\alpha$ -Fe, облучаемого сильноточным электронным пучком, согласно [8], заключается в повышении плотности дислокаций, являющихся в свою очередь стопорами движения границ зерен. При этом зерна претерпевают деформации под действием сил термоупругих напряжений. Важным фактором является также рассогласованность пространственно временной динамики температурных волн и механических напряжений, что позволяет протекать процессам рекристаллизации [8].

Многофакторность наблюдаемых явлений дает основание утверждать, что для создания основ технологий модификации материалов на определенном ускорителе необходимо проведение исследований для заданной группы сталей.

## 2. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материалов для исследования выбраны стали следующих марок (единица измерения содержания химических элементов – wt %):

- 45ХН2МФА (0,42-0,5 C ; 0,10-0,18 V ; 0,17-0,37 Si ; 0,20-0,30 Mo ; 0,50-0,80 Mn ; 1,3-1,80 Ni ; P < 0,025 ; 0,80-1,10 Cr ; S < 0,025) ;

- 09Г2 (0,12 C ; 0,008 N, 0,5-0,8 Si ; 0,3 Cu ; 0,08 As ; 1,3-1,7 Mn ; 0,3 Ni ; 0,035 P ; 0,3 Cr ; 0,04 S) ;

- Ст3пс (0,14-0,22 C ; 0,008 N ; 0,05-0,15 Si ; 0,3 Cu ; 0,08 As ; 0,40-0,65 Mn ; 0,3 Ni ; 0,04 P ; 0,3 Cr ; 0,05 S).

Были изготовлены образцы, представляющие собой пластины, соизмеримые с диаметром электронного пучка. Также были изготовлены стандартные образцы для измерения ударной вязкости.

Ставилась задача установления возможности улучшения эксплуатационных характеристик указанных марок сталей путем их обработки сильноточным пучком релятивистских электронов (СРЭП) и выяснения перспектив технологического использования сильноточных релятивистских пучков электронов. Пучок электронов с энергией 0,35 МэВ, током пучка до 2 кА, длительности фронта импульса  $5 \cdot 10^{-6}$  с, диаметр пучка  $\approx 50$  мм генерировался на ускорителе НИЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины ТЕМП-А. Образцы стальных пластин закреплялись на коллекторе ускорителя и облучались одним импульсом, образцы для измерения ударной вязкости (согласно методике по три образца) обрабатывались аналогично таким же импульсом.

Металлографические исследования проводились на микроскопе МИМ-10. Микротвердость измерялась на микротвердометре ПМТ-3. Растровая микроскопия проводилась на микроскопе РЭМ-110.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модифицирующая обработка сталей сильноточными пучками релятивистских электронов состоит в реализации ряда механизмов воздействия на облучаемый материал: радиационный, температурный и акустомеханический. Принимая во внимание, что в нашем случае мощность дозы облучения обеспечивала переплав поверхностного слоя Рис. 1, образующиеся радиационные дефекты подвергались отжигу в силу нагрева образцов и не оказывали воздействия на свойства сталей.

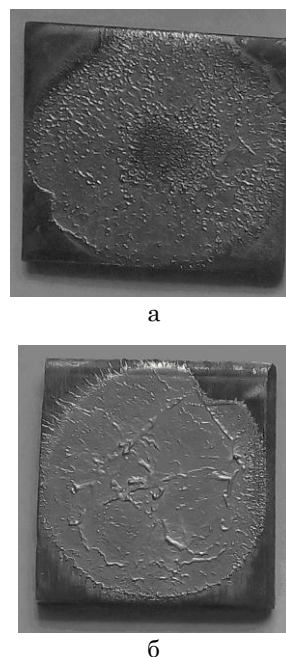
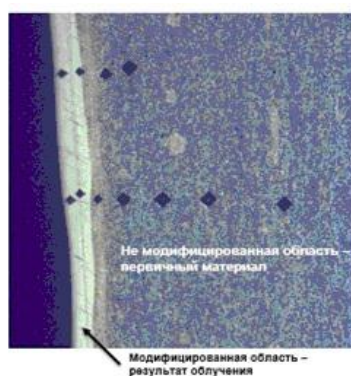


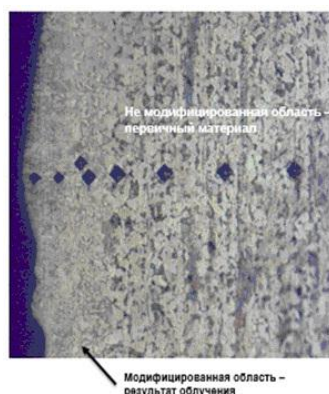
Рис. 1 – Поверхности облученных образцов: а – 09Г2; б – 45ХН2МФА

Обращает на себя внимание тот факт, что изображенные на Рис. 2 поверхности различных сталей имеют несплошный расплав. Так образцы сталей 09Г2 и Ст3пс не проплавлены в центре отпечатка пучка. Этот эффект может быть обусловлен следующими обстоятельствами. Наличие легирующих элементов смещает точку плавления в сторону более низких температур, вследствие этого перераспределяется температурный профиль вдоль направления вектора проникновения пучка в мишень, и, следовательно, зона мартенситного превращения у более легкоплавкого сплава смещается к поверхности. Это предположение подтверждается визуальным наблюдением особенностей оплавленных действием пучка поверхностей. Следует отметить, что плотность тока пучка неравномерна по сечению в пределах 20 % и у оси имеет минимум. Вместе с тем у стали 45ХН2МФА поверхность оплавлена полностью. Так на поверхности мишени из стали 09Г2 в окрестности оси пучка наблюдается нерасплавленная область, но в тоже время она меньше по диаметру, нежели у сплава Ст3пс. Также это может иметь и другое объяснение, не противоречащее первому и, возможно, его дополняющее. Оно заключается в том, что теплопроводность у сплава 45ХН2МФА меньше, чем у

09Г2, и у него в свою очередь меньше, чем у СтЗпс. Таким образом, энергия электронного пучка, трансформированная в тепловое поле, оказалась локализованной в приповерхностной области в тех сплавах, у которых ниже теплопроводность. В свою очередь это может быть подтверждено исследованием толщины слоя мартенситных и фазовых превращений, а также соответствующих им значений микротвердости. На Рис. 3 приведены результаты металлографических исследований поперечных шлифов образцов сплавов, сделанных параллельно направлению действия пучка (исследование № 4090 от 12.06.2015г. лаборатории металловедения Центра испытаний и аттестации продукции (ЦИАПК) МК «Запорожсталь»).



а



б

Рис. 2 – Шлифы поперечных пучков увеличение  $\times 300$ : а – 45XN2MFA; б – 09Г2

Исходная микроструктура образца стали 45XN2MFA представлена зернистым перлитом с микротвёрдостью 258 HV. У поверхности образца после упрочняющей обработки на глубину до 100 мкм наблюдается упрочнённый слой из мартенсита с микротвёрдостью 764 HV, что выше микротвёрдости у необлучённого образца практически в 3 раза. У других образцов максимальное значение микротвердости ниже, что может объясняться менее выраженными температурными градиентами в силу более высоких значений теплопроводности и, соответственно, меньшими температурными градиентами. Вместе с тем этот эффект скорее бы объяснял большие глубины упрочнения по сравнению с дру-

гими сталями (см. Рис. 4), тогда как достижение максимального упрочнения на легированной стали 45XN2MFA вероятнее всего обеспечивалось образованием карбидов легирующих элементов, обладающих собственной высокой твердостью и являющихся препятствием для диффузии углерода.

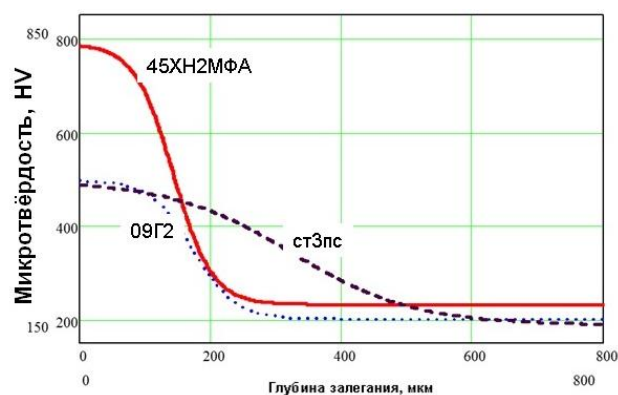


Рис. 4 – Значения микротвердости образцов сталей после облучения

У образцов, которые не содержат легирующих элементов, также наблюдается образование мартенсита в поверхностных слоях Рис. 3, причем у образца СтЗпс, содержащей больше количество углерода, глубина упрочнения оказалась большей, т.к. для закалки требовались несколько меньшие значения температурных градиентов.

Как видно из вышеприведенных результатов, скорости охлаждения оказывались достаточными для достижения мартенситных превращений, в то же время остается открытым вопрос о роли радиационно-стимулированных термо механических процессов, оказывающих влияние на конечные эксплуатационные свойства облучаемых материалов. Реализация этих процессов осуществляется через ряд явлений, среди которых важную роль играет термоупругий эффект, описываемый в облучаемых материалах выражением Воловика-Лазурика:

$$\sigma_t(r,t) = \Gamma \cdot \varepsilon(r,t) \quad (1)$$

где  $\varepsilon(r,t)$  – плотность поглощенной энергии излучения в среде,  $\Gamma$  – параметр Грюнайзена вещества. Кроме того, важно формирование импульса отдачи, возникающего вследствие абляционного выброса вещества с поверхности мишени. При этом, согласно выражению Бацанова-Демидова-Рудакова, значение импульса определяется давлением образующейся плазмы в зоне поглощения энергии электронного пучка:

$$\sigma_j = (\gamma_{эфб} - 1) \cdot \omega \quad (2)$$

где  $\gamma_{эфб} = 1,2$  – отношение удельных теплоемкостей твердого тела и плазмы;  $\omega$  – объемная плотность энергии излучения, вводимого в мишень, Дж/см<sup>3</sup>.

Генерируемые пучком механические воздействия и температурные градиенты, служили источником возникновения внутренних напряжений, на фоне высоких температур охлаждения, ограничивающих

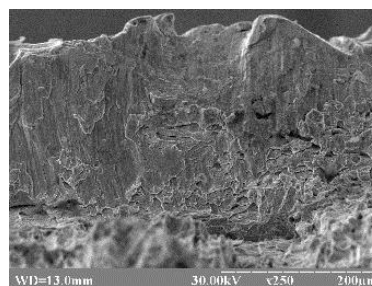
выравнивание концентрации углерода [9], что также является дополнительным механизмом модификации свойств. Набор подобного разнообразия воздействующих механизмов должен приводить, по мнению авторов работы [10], к мезоуровневым напряжениям кручения, проявление которых можно наблюдать по наличию ротационных мод в местах разрушения образцов. Именно аккумуляция скрытых ротационных мод представляется важной для понимания более глубоких перспектив использования СРЭП для модификации материалов путем придания им противоударных демпфирующих свойств. Представлялась важной также задача понимания более глубоких перспектив использования СРЭП для модификации материалов путем придания им противоударных демпфирующих свойств, о чем указывается в работе [9]. Следствием модифицирующей обработки является, несомненно, возникновение интерфейсных слоев между исходным материалом и модифицированными участками. Экспериментальным путем в работе [11] было показано, что облученный подобным образом участок мишени при повторном воздействии высвобождает запасенную внутреннюю энергию, что проявлялось на интенсивности регистрируемого акустического сигнала. Принимая во внимание, что кристаллизация происходит в условиях действия сил реактивной отдачи, согласно формулы (2), которые содержат как касательную, так и нормальную к поверхности составляющие [12], это также должно служить дополнительным механизмом возникновения самоорганизованных мезоротаций, которые в условиях сверхбыстрой кристаллизации материала служат аккумуляторами внутренних напряжений. Для проверки эффекта аккумуляции внутренней энергии были проведены измерения ударной вязкости образцов до и после облучения

**Таблица 1** – Измерения ударной вязкости образцов до и после облучения

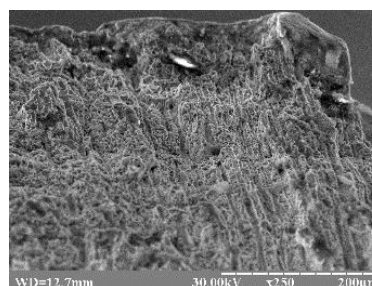
Материал	СтЗпс	09Г2	45ХН2МФА
Ударная вязкость до облучения, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	9,4	13	18,9
Ударная вязкость после облучения, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	8	12,8	17,5
Глубина упрочненной области, мкм	400	150	150
Приращение микротвердости	300	300	550

(исследования № 147 от 20.10.2014г., № 77 от 8.06.2015г. лаборатории экспресс-испытаний металлопроката ЦИАПК). Результаты приведены в Таблице 1.

Обращает внимание тот факт, что повышение микротвердости приводило к снижению ударной вязкости, причем величина прямо пропорциональна и значению микротвердости и глубине упрочненного слоя, то есть можно говорить о возникновении зоны аккумуляции энергии внутренних напряжений. Изломы на образцах, полученные при определении значений ударной вязкости приведены на Рис. 5.



а



б

**Рис. 5** – РЭМ снимки изломов сталей. Образец: а – 45ХН2МФА; б – СтЗпс

подтверждают, что модифицированная часть образца (верхняя часть на фрактограммах) разрушалась через хрупкие механизмы, образуя сколы и фасетки, местами веерообразные террасы. Учитывая, что излом происходит в результате возникновения растягивающих и сжимающих напряжений. Так по данным работы [10] значение нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений на границе раздела материала с различными свойствами описывается выражениями

$$\sigma = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \sin \frac{x+l_s}{\Delta\sqrt{2}}, \quad \tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{6}} \cos \frac{x+l}{\Delta\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  предел текучести граничного слоя в условиях растяжения или сжатия,  $\Delta$  – толщина приграничного слоя, испытывающего пластическую деформацию. Из чего следует, что разрушение граничного слоя между необлученной и облученной частью вносит дополнительный вклад к кинетической энергии маятникового копра. Вопросом отдельного рассмотрения является оценка изменения электронной плотности в зоне возникновения локальной кривизны поверхности, поскольку, как указывается в работе [13], возникновение композитной структуры, состоящей из зерен различного масштабного уровня сопровождается перестройкой электронной структуры. Изменение зеренной структуры, внутренних напряжений способно в свою очередь влиять на оптические [14] и радиационно-защитные [15] и ударно-защитные [16] свойства материала, что открывает новые перспективы использования мощных электронных пучков в технологических применениях.

#### 4. ВЫВОДЫ

Модифицирующая обработка низкоуглеродистых сталей сильноточными релятивистскими пучками



электронов является перспективным направлением для развития новых радиационных технологий. Оптимизация процессов технологической обработки должна содержать стадии исследования фазового и элементного состава модифицируемой области, поскольку механизм изменения свойств заключается в суперпозиции существенно нелинейных полей тепломассопереноса и диффузии отдельных элементов.

Требуется исследование распределения плотности дефектов, как источников аккумуляции внутренней энергии и солитонов кривизны. Повышение значенний микротвердости сопровождается снижением ударной вязкости, что объясняется высвобождением энергии внутренних напряжений, возникших вследствие сверхбыстрого охлаждения.

### Особливості модифікуючої обробки низьковуглецевих сталей сильнотривим релятивістським електронним пучком

С.В. Биткін<sup>1</sup>, О.О. Ісаєнко<sup>1</sup>, С.Є. Донець<sup>2</sup>, В.Ф. Клепиков<sup>2</sup>, В.В. Литвиненко<sup>2</sup>, О.А. Старцев<sup>2</sup>,  
Ю.Ф. Лонін<sup>3</sup>, А.Г. Пономарьов<sup>3</sup>, В.Т. Уваров<sup>3</sup>, М.В. Авраменко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ПАТ «Запоріжсталь», Южн. шосе, 72, 69008 Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup> Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, вул. Чернышевського, 28 а/с 8812, 61002 Харків, Україна

<sup>3</sup> ННЦ Харківський фізико-технічний інститут НАН України, вул. Академічна, 1, 61108 Харків, Україна

<sup>4</sup> ПАО «ТЗ Трубоасталь», вул. Шатрищанська, 65, 11500 Коростень, Україна

В роботі вивчено вплив імпульсного сильнотривимого релятивістського електронного пучка на механічні властивості низьковуглецевих сталей. Встановлено, що в зоні поглинання енергії випромінювання спостерігається стрибкоподібне збільшення микротвердості, що зумовлено мартенситними перетвореннями. Вивчено вплив опромінювання на значення ударної в'язкості, зроблено припущення, що зниження ударної в'язкості пов'язано з виникненням додаткових внутрішніх напружень.

**Ключові слова:** Сильнотривимий релятивістський електронний пучок, Опромінювання, Микротвердість, Ударная в'язкість, Внутрішні напруження.

### The Features of the Modified Treatment of the Low-Carbon Steels by the High-Current Relativistic Electron Beams

S.V. Bytkin<sup>1</sup>, O.O. Isaenko<sup>1</sup>, S.E. Donets<sup>2</sup>, V.F. Klepikov<sup>2</sup>, V.V. Lytvynenko<sup>2</sup>, O.A. Startsev<sup>2</sup>,  
Yu.F. Lonin<sup>3</sup>, A.G. Ponomarev<sup>3</sup>, V.T. Uvarov<sup>3</sup>, M.B. Avramenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PJSC «Zaporizhstal», 72, Yuzhnoe shosse, 69008 Zaporizhzhya, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine, p.o. box. 8812, 28, Chernyshevskiy Str., Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup> NSC Kharkiv Institute of Physics and Technology, NAS of Ukraine, 1, Akademichna Str., 61108 Kharkiv, Ukraine

<sup>4</sup> PJCC «Trubostal Pipe Plant», 65, Shatrychanska Str., 11500 Korosten, Ukraine

The influence of a pulsed high-current relativistic electron beam on the mechanical properties of a number of low-carbon steels is studied. It is established that in the absorption band of the radiation energy, an abrupt increase in the microhardness values is observed due to martensitic transformations. The effect of irradiation impact on the toughness is studied, it is suggested that a decrease in the toughness is associated with the appearance of additional internal stresses.

**Keywords:** High-current electron beam, Microhardness, Impact toughness, Internal stresses.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. W.A.P. Calvo, C.L. Duarte, L.D.B. Machado, *Radiation Physics and Chemistry* **81** No 8, 1276 (2012).
2. A.S. Afolabi, A.C. Muhirwa, A.S. Abdulkareem, E. Muzenda. *Int. J. Electrochem. Sci.* **9**, 5895 (2014).
3. *Introduction to Surface Hardening of Steels, Heat Treating V4, ASM Handbook*, **259** (2013).
4. R. Zenker, *Metall. Ital.* **101** No 4, 55 (2009).
5. X.D. Zhang, S.Z. Hao, T. Grosdidier, J.X. Zou, B. Gao, B. Bolle, N. Allain-Bonasso, Y. Qin, X.N. Li, C. Dong, *Journal of Metallurgy*, ID 762125 (2012).
6. N.M. Aleksandrova, A.V. Supov, T.S. Skoblo. *Stal* **8**, 62 (2011).
7. И.Б. Целлермайер, Ю.Ф. Иванов, В.П. Ротштейн, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, *Физика и химия обработки материалов* **1**, 23 (2007) (I.B. Tsellermayer, Yu.F. Ivanov, V.P. Rotshteyn, S.V. Kononov, V.Ye. Gromov, *Fizika i khimiya obrabotki materialov* **1**, 23 (2007)) [Russian].
8. A.N. Valyaev, V.S. Ladysev, A.D. Pogrebnyak, A.A. Valyaev, S.V. Plotnikov, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **161**, 1132 (2000).
9. Ю.Ф. Иванов, И.Б. Целлермаер, В.П. Ротштейн, В.Е. Громов, *Физ. мезомех.* **9** No 5, 107 (2006) (Yu.F. Ivanov, I.B. Tsellermayer, V.P. Rotshteyn, V.Ye. Gromov, *Fiz. mезomekh.* **9** No 5, 107 (2006)) [Russian].
10. В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, *Физ. мезомех.* **16** No 3, 7

- (2013) (V.Ye. Panin, V.Ye. Yegorushkin, *Fiz. mezomekh.* **16** No 3, 7 (2013)) [Russian].
11. V.V. Uvarov, V.T. Uvarov, V.N. Robuk, V.V. Lytvynenko, A.N. Nikitin, M.I. Bazaleev, V.F. Klepikov, *Physics of Particle and Nuclei Letter* **11** No 3, 274 (2014).
  12. V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, O.G. Tolstolutskiy, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov, *Probl. At. Sci. Technol.* **1** No 59, 119 (2009).
  13. Yu.I. Boyko, M.A. Volosyuk, A.V. Volosyuk, N.Ya. Rokhmanov, *Funct. Mater.* **22** No 2, 162 (2015).
  14. A.I. Belyaeva, A.A. Galuza, V.F. Klepikov, V.V. Litvinenko, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov, K.O. Slatin, *Probl. At. Sci. Technol.* **2** No 93, 191 (2009).
  15. E.M. Prokhorenko, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko, A.I. Skrypnyko, M.A. Khazhmuradov, A.A. Zakharchenko, *Probl. At. Sci. Technol.* **6** No 88, 240 (2013).
  16. V.F. Klepikov, Yu.F. Lonin, V.V. Lytvynenko, A.V. Pashenko, A.G. Ponomarev, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov, V.I. Sheremet, *Probl. At. Sci. Technol.* **5** No 50, 91 (2008).