

## НАНОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКИ, ОБЛУЧЕННОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ\*

**Кормышев В.Е.<sup>1</sup>**, инженер кафедры естественнонаучных дисциплин  
им. В.М. Финкеля (8923923000@mail.ru)

**Иванов Ю.Ф.<sup>2,3</sup>**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник (yuf55@mail.ru)

**Громов В.Е.<sup>1</sup>**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин  
им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

**Коновалов С.В.<sup>4</sup>**, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии металлов  
и авиационного материаловедения (ksv@ssau.ru)

**Тересов А.Д.<sup>2,3</sup>**, ведущий электроник (tad514@sibmail.com)

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН  
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
(634036, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

<sup>4</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева  
(443086, Россия, Самара, Московское ш., 34)

**Аннотация.** Для обоснованного выбора материала покрытий, соответствующих условиям эксплуатации изделий и режимов последующей электронно-пучковой обработки, исследованы нанотвердость, модуль Юнга и дефектная субструктура слоя, наплавленного на мартенситную низкоуглеродистую сталь Hardox 450 высокоуглеродистыми порошковыми проволоками диам. 1,6 мм различного химического состава (содержащими такие элементы, как ванадий, хром, ниобий, вольфрам, марганец, кремний, никель, бор), и дополнительно двухкратно облученного импульсным электронным пучком. Формирование наплавленного слоя на поверхность стали осуществляли в среде защитного газа, содержащем 98 % Ar, 2 % CO<sub>2</sub>, при сварочном токе 250 – 300 А и напряжении на дуге 30 – 35 В. Модифицирование наплавленного слоя осуществляли путем облучения поверхности наплавленного слоя высокоинтенсивным электронным пучком в режиме плавления и высокоскоростной кристаллизации. Нагрузка на индентор составляла 50 мН. Определение нанотвердости и модуля Юнга проводили в 30 произвольно выбранных точках модифицированной поверхности наплавки. Дефектную структуру поверхности модифицированной электронным пучком наплавки изучали методами сканирующей электронной микроскопии. Выявлено кратное увеличение нанотвердости и модуля Юнга наплавленного слоя при электронно-пучковой обработке относительно материала основы. Выявлено, что максимальный упрочняющий эффект наблюдается при наплавке порошковой проволокой, содержащей 4,5 % бора. Показано, что на поверхности наплавки, сформированной проволокой, в элементный состав которой входит 4,5 % бора, и дополнительно облученной интенсивным импульсным электронным пучком, формируются системы микротрещин. Исследования наплавов, сформированных порошковыми проволоками, не содержащими бор, после импульсной обработки электронным пучком показали отсутствие микротрещин на модифицированной поверхности. Повышение прочностных свойств модифицированного электронным пучком наплавленного слоя обусловлено формированием структуры, размеры кристаллитов которой изменяются от десятых долей микрометра до единиц микрометра, и содержащей включения вторых фаз (бориды, карбиды, карбобориды). Установлен значительный разброс значений нанотвердости и модуля Юнга, что обусловлено, очевидно, неоднородным распределением упрочняющих фаз.

**Ключевые слова:** наплавка, порошковая проволока, нанотвердость, электронно-пучковая обработка, модуль Юнга, низкоуглеродистая сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-304-309

Детали машин и механизмов во многих случаях работают в условиях интенсивного износа. Продлить срок их полезного использования можно путем наплавки на поверхности трения слоев металла, обладающих повышенными свойствами [1, 2]. Формирование в поверхностном слое структурно-фазового состояния субмикро- и наноразмерной областей позволяет существенным образом изменять физико-механические

свойства не только тонкого поверхностного слоя, но детали в целом [3]. К настоящему моменту разработан целый ряд перспективных способов модифицирования поверхности металлов, сплавов, керамических и металлокерамических материалов, основанных на использовании концентрированных потоков энергии и обеспечивающих высокие физико-механические характеристики материалов [4 – 15].

Одним из перспективных способов модифицирования структуры поверхностного слоя стальных изделий с

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00065).

целью повышения их эксплуатационных характеристик в настоящее время является комплексная обработка, которая включает наплавку композиционными покрытиями, упрочненными частицами карбидов, боридов и других высокомолекулярных и высокотвердых фаз, и последующую электронно-пучковую обработку. Использование импульсных электронных пучков в качестве средства модификации металлов и сплавов приводит к существенному изменению структурно-фазового состояния поверхностных слоев и, как следствие, к увеличению коррозионной стойкости, износостойкости, микротвердости, усталостной долговечности, недостижимых при традиционных методах поверхностной обработки [11 – 16].

Как правило, при обработке поверхности металлических материалов интенсивным электронным пучком максимальные прочностные характеристики достигаются в сравнительно тонком (единицы микрометров) поверхностном слое. Для адекватной аттестации механических свойств таких поверхностей широко используются методы индентирования. Однако следует отметить, что значения микротвердости становятся выше при уменьшении нагрузки на индентор, что наиболее резко проявляется при малых нагрузках [16, 17].

Целью настоящей работы является анализ механических свойств слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой проволокой различного элементного состава и дополнительно облученного интенсивным импульсным электронным пучком.

В качестве материала основы использовали сталь марки Hardox 450 со следующим химическим составом: 0,19 – 0,26 % С; 70 % Si; 1,60 % Mn; 0,25 % Cr; 0,25 % Ni; 0,25 % Mo; 0,004 % В; 0,025 % Р; 0,010 % S (по массе) (остальное железо).

Сталь Hardox 450 характеризуется низким содержанием легирующих элементов, вследствие чего она хорошо сваривается и обрабатывается. Путем специальной системы закалки листов (суть которой заключается в быстром охлаждении прокатанного листа без последующего отпуска) формируется мелкозернистая структура стали и достигается ее высокая твердость. Благодаря этому сталь эффективно противостоит большинству видов износа.

Формирование наплавленного слоя осуществляли порошковыми проволоками диам. 1,6 мм, химический состав которых приведен ниже:

Марка проволоки	С	V	Cr	Nb	W	Mn	Si	Ni	B
ПП-1	0,7	–	–	–	–	2,0	1,0	2,0	4,5
ПП-2	1,4	1,0	7,0	8,0	1,2	–	–	–	–
ПП-3	1,3	–	7,0	8,5	1,4	0,9	1,1	–	–

Пр и м е ч а н и е. Остальное – железо.

Формирование наплавленного слоя на поверхность стали осуществляли в среде защитного газа, содержащем 98 % Ar, 2 % CO<sub>2</sub>, при сварочном токе 250 – 300 А и напряжении на дуге 30 – 35 В. Модифицирование наплавленного слоя осуществляли путем облучения поверхности наплавленного слоя высокоинтенсивным электронным пучком как и в работе [14] в режиме плавления и высокоскоростной кристаллизации. Режим облучения следующий: на первом этапе плотность энергии пучка электронов в импульсе – 30 Дж/см<sup>2</sup>; длительность импульсов – 200 мкс; количество импульсов – 20; на втором этапе плотность энергии в импульсе – 30 Дж/см<sup>2</sup>; длительность импульсов – 50 мкс; количество импульсов – 1. Режимы облучения были выбраны исходя из результатов расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое материала при облучении в одноимпульсном режиме. Механические испытания модифицированной поверхности: определение нанотвердости и модуля Юнга (ультрамикротвердомер Shimadzu DUN-211S; алмазный индентор в виде пирамиды Берковича). В ряде работ показано, что минимальной нагрузкой при наноиндентировании, когда эффект масштабной зависимости твердости (эффект малых нагрузок) существенно снижен, является нагрузка 50 мН [16 – 18]; в настоящей работе нагрузка на индентор составляла 50 мН. Нанотвердость и модуль Юнга рассчитывали по методике Оливера и Фара [19]. Определение этих характеристик материала осуществляли в 30 произвольно выбранных точках модифицированной поверхности наплавки. Дефектную структуру поверхности модифицированной электронным пучком наплавки изучали методами сканирующей (сканирующий электронный микроскоп «SEM-515 Philips») электронной микроскопии.

Средние значения (усреднение проводили по 30 выполненным измерениям) нанотвердости  $\langle H \rangle$  и модуля Юнга  $\langle E \rangle$  поверхностного слоя наплавленного металла, облученного интенсивным импульсным электронным пучком, приведены ниже (через косую приведено среднеквадратическое отклонение измеряемой величины):

Марка проволоки	$\langle H \rangle$ , ГПа	$\langle E \rangle$ , ГПа
ПП-1	20,83/2,53	347,7/26,6
ПП-2	6,17/1,48	221,3/29,0
ПП-3	13,0/2,2	260,3/33,1

Анализ результатов показывает, что наибольшей твердостью обладает металл наплавки, сформированной проволокой марки ПП-1, характерным отличием которой от двух других проволок является легирование бором. Известно, что борированные слои, сформированные на поверхности стали, обладают исключительно высокой твердостью и высоким сопротивлением абразивному износу вследствие образования на поверхности высокотвердых боридов железа FeB и Fe<sub>2</sub>B [20 – 22].

Однофазные боридные слои должны охрупчивать сталь в меньшей мере, чем двухфазные. Микротвердость боридов FeB и Fe<sub>2</sub>B в двухфазном боридном слое на армко-железе (при нагрузке на инденторе 0,98 Н) составляет 19 200 – 20 600 и 13 500 – 14 200 МПа соответственно. Микротвердость борида Fe<sub>2</sub>B в однофазном боридном слое несколько выше, чем в двухфазном, и составляет 13 700 – 16 200 МПа. Увеличение содержания углерода в стали снижает твердость борида FeB и практически не влияет на твердость борида Fe<sub>2</sub>B. Молибден, вольфрам, марганец и хром повышают твердость FeB в двухфазном боридном слое среднеуглеродистой стали; никель, алюминий и медь снижают твердость борида FeB [20 – 22].

Отрицательным свойством борированных слоев является их высокая хрупкость [20 – 22]. Действительно, выполненные в настоящей работе исследования поверхности наплавки, сформированной проволокой марки ПП-1, в элементный состав которой входит 4,5 % бора (по массе), и дополнительно облученной интенсивным импульсным электронным пучком, выявили формирование на поверхности облучения системы микротрещин, характерное изображение которых приведено на рис. 1, а. Для сравнения на рис. 1, б приведено изображение поверхности слоя, наплавленного на сталь Hardox 450 проволокой марки ПП-2, в составе которой бор отсутствует. Отчетливо видно, что дополнительная обработка наплавленного слоя интенсивным импульсным электронным пучком не привела к формированию микротрещин на модифицированной поверхности наплавки.

Средние значения величины не всегда адекватно отражают свойства материала, тем более, если материал является многофазным и многослойным, что особенно характерно для наплавленных слоев, облученных интенсивным импульсным электронным пучком. На рис. 2 приведены распределения нанотвердости и модуля Юнга поверхности слоев после комплексной обработки. Независимо от элементного состава наплавочной

проволоки сформированные на стали слои характеризуются значительным разбросом величин и нанотвердости (рис. 2, а – в), и модуля Юнга (рис. 2, г – е). Наиболее существенный разброс выявлен для наплавки, сформированной проволокой марки ПП-2; наименее существенный – слой, сформированный проволокой марки ПП-1.

Очевидно, что прочностные характеристики стали определяются состоянием дефектной субструктуры материала. На рис. 3 приведены характерные электронно-микроскопические изображения поверхности наплавки, сформированной на стали Hardox 450 наплавочной проволокой марки ПП-2 и дополнительно облученной интенсивным импульсным электронным пучком.

Поверхностный слой наплавленного металла имеет структуру, размеры кристаллитов которой изменяются от десятых долей микрометра до единиц микрометра. Следует ожидать, что при исследовании дефектной субструктуры стали приборами с большим, чем сканирующая электронная микроскопия, разрешением, можно будет выявить структурные элементы (частицы карбидной фазы) нанометрового размерного диапазона, что обусловлено сверхвысокими скоростями охлаждения поверхностного слоя материала, облученного интенсивным импульсным электронным пучком микросекундной (50 мкс) длительности воздействия.

**Выводы.** Выполнены исследования нанотвердости, модуля Юнга и дефектной субструктуры наплавленного на низкоуглеродистую сталь слоя, сформированного проволоками разного химического состава и дополнительно модифицированного путем облучения интенсивным импульсным электронным пучком двухступенчатым методом. Показано, что электронно-пучковая обработка сопровождается кратным увеличением нанотвердости и модуля Юнга поверхностного модифицированного слоя относительно основы (сталь Hardox 450). Установлено, что повышение прочностных свойств модифицированного электронным пучком наплавленного слоя обусловлено формированием суб-

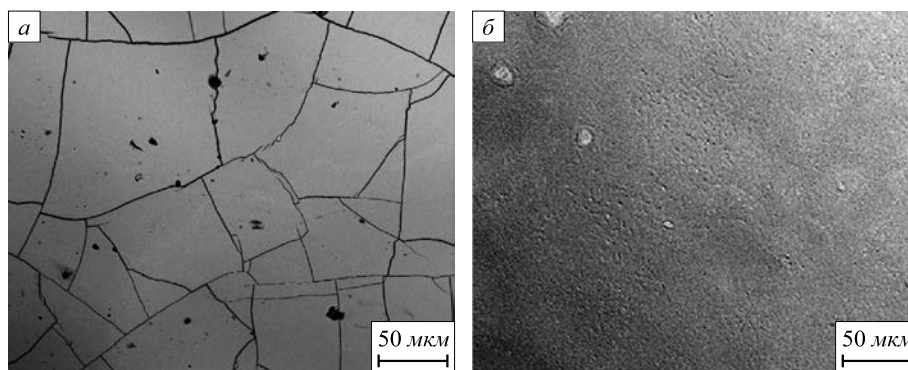


Рис. 1. Структура поверхности наплавленного на сталь Hardox 450 слоя после облучения электронным пучком при использовании наплавочной проволоки марки ПП-1 (а) и марки ПП-2 (б) (сканирующая электронная микроскопия)

Fig. 1. Surface structure of the layer surfaced on Hardox 450 steel after irradiation with an electron beam using the welding wire of PP-1 grade (a) and PP-2 grade (b) (scanning electron microscopy)

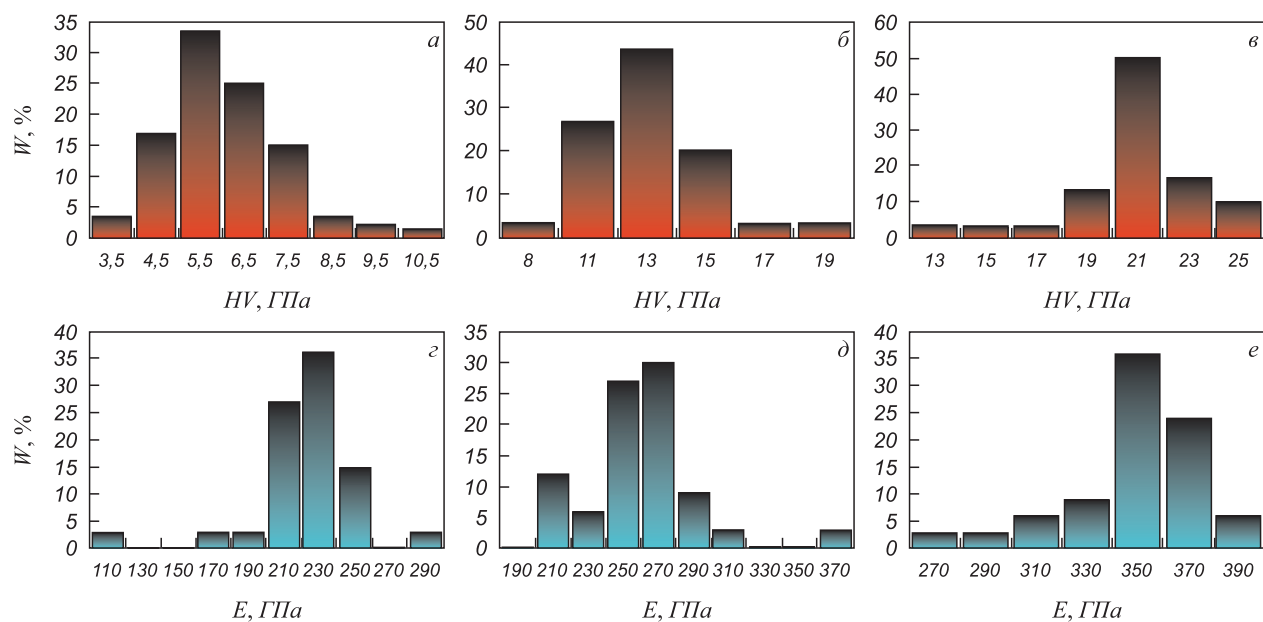


Рис. 2. Распределение нанотвердости (а – в) и модуля Юнга (z – e) по величине для наплавки, сформированной на стали Hardox 450 и дополнительно облученной электронным пучком:  
 а, z – слой сформирован наплавочной проволокой марки ПП-2; б, д – слой сформирован наплавочной проволокой марки ПП-3; в, e – слой сформирован наплавочной проволокой марки ПП-1 ( $W = N_i/N$  – относительная частота;  $N_i$  – количество измерений данного размерного класса;  $N$  – общее количество измерений)

Fig. 2. The distribution of nanohardness (a – в) and Young elastic modulus (z – e) by the volume surfacing formed on Hardox 450 steel and additionally irradiated by electron beam:  
 а, z – the layer is formed by the welding wire of PP-2 grade; б, д – the layer is formed by welding wire of PP-3 grade; в, e – the layer is formed by the welding wire of PP-1 grade ( $W = N_i/N$  – relative frequency,  $N_i$  – the number of measurements of the given dimension class,  $N$  – the total number of measurements)

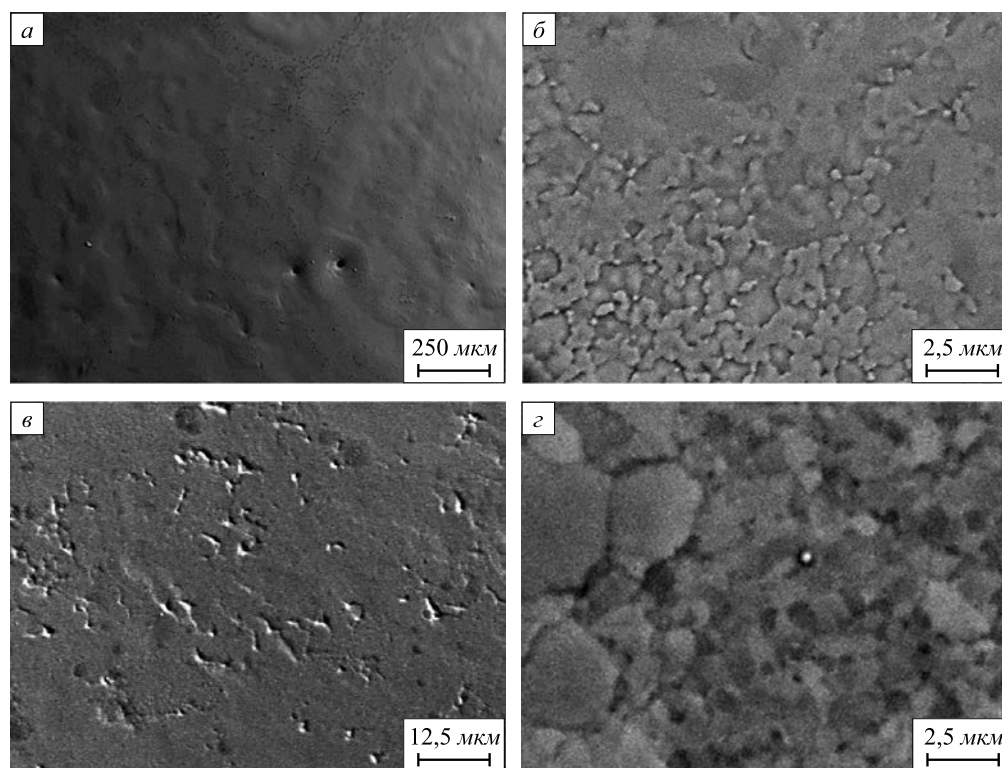


Рис. 3. Структура поверхности наплавленного слоя после облучения электронным пучком при использовании проволоки марки ПП-2 (сканирующая электронная микроскопия)

Fig. 3. Surface structure of the deposited layer after irradiation with an electron beam using wire of PP-2 grade (scanning electron microscopy)

микроразмерной структуры, упрочнение которой вызвано закалочным эффектом и наличием включений вторых фаз (бориды, карбобориды, карбиды). Выявлено, что максимальный упрочняющий эффект наплавленно-го слоя наблюдается при легировании материала бором. Одновременно с этим легирование наплавленного слоя бором приводит к его охрупчиванию. Показано, что формирующаяся структура характеризуется существенным разбросом значений нанотвердости и модуля Юнга, что, очевидно, обусловлено неоднородным распределением упрочняющих фаз.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноиванов В.И., Голубев И.Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
2. Жиркин Ю.В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2002. – 330 с.
3. Нанотехнологии поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий / Отв. ред. Н.З. Ляхов, С.Г. Псахье. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 276 с.
4. Konovalov S., Kormyshev V., Gromov V., Ivanov Yu. Metallographic examination of forming improved mechanical properties via surfacing of steel HARDOX 450 with flux cored wire // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 159 – 162.
5. Гришунин В.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция фазового состава и дефектной субструктуры рельсовой стали, подвергнутой обработке высокоинтенсивным электронным пучком // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 10. С. 82 – 88.
6. Yun H., Li J., Chen H.B., Lin C.-J. A study on the N-, S- and Cl-modified nano-TiO<sub>2</sub> coatings for corrosion protection of stainless steel // Electrochimica Acta. 2007. Vol. 52. P. 6679 – 6685.
7. Cho T.Y., Yoon J.H., Cho J.Y. etc. Surface properties and tensile bond strength of HVOF thermal spray coatings of WC-Co powder onto the surface of 420J2 steel and the bond coats of Ni, NiCr, and Ni/NiCr // Surface and Coatings Technology. 2009. Vol. 203. P. 3250 – 3253.
8. Jiang P., He X.L., Li X.X. etc. Wear resistance of a laser surface alloyed Ti-6Al-4V alloy // Surface and Coatings Technology. 2000. Vol. 130. P. 24 – 28.
9. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: Учебник / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин и др. – М.: Крутой стол, 2001. – 528 с.
10. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк и др. – М.: изд. МГУ, 2005. – 640 с.
11. Walker J.C., Murray J.W., Niewa M. etc. The effect of large-area pulsed electron beam melting on the corrosion and microstructure of a Ti6Al4V alloy // Applied Surface Science. 2014. Vol. 311. P. 534 – 540.
12. Gao Yu-kui. Influence of pulsed electron beam treatment on microstructure and properties of TA15 titanium alloy // Applied Surface Science. 2013. Vol. 264. P. 633 – 635.
13. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A. etc. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum // Materials Science and Engineering A. 2013. Vol. 578. P. 310 – 317.
14. Райков С.В., Капралов Е.В., Ващук Е.С. и др. Структура поверхностного слоя износостойкой наплавки, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 9. С. 75 – 80.
15. Ivanov Y., Alsaraeva K., Gromov V. etc. Evolution of Al-19.4Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue // Materials Science and Technology (United Kingdom). 2015. Vol. 31 (13a). P. 1523 – 1529.
16. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. 1992. Vol. 7. No. 6. P. 1564 – 1583.
17. Milman Yu.V., Golubenko A.A., Dub S.N. Indentation size effect in nanohardness // Acta Materialia. 2011. Vol. 59 (20). P. 7480 – 7487.
18. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.
19. Головин Ю.И. Нанонанодентирование и его возможности. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
20. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
21. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / Под ред. Л.С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
22. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2009. – 488 с.

Поступила 10 марта 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 4, PP. 304–309.

### SURFACE NANOHARDNESS OF WEAR RESISTANT SURFACING IRRADIATED BY ELECTRON BEAM

V.E. Kormyshev<sup>1</sup>, Yu.F. Ivanov<sup>2,3</sup>, V.E. Gromov<sup>1</sup>, S.V. Konovalov<sup>4</sup>, A.D. Teresov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>4</sup>Samara University, Samara, Russia

**Abstract.** The nanohardness, Young elastic modulus and defect substructure of the layer surfaced on the low carbon martensite Hardox 450 steel by the high carbon power wires with diameter of 1.6 mm of different chemical composition (containing such elements as V, Cr, Nb, W, Mn, Si, Ni, B) and two times additionally irradiated by the pulse electron beam were studied for the purpose of substantiated selection of coating material corresponding to the product operation conditions and the modes of subsequent electron beam treatment. The formation

of the fused layer on the steel surface was carried out in the shielding gas medium containing 98 % Ar, 2 % CO<sub>2</sub>, with a welding current of 250 – 300 A and a voltage on the arc of 30 – 35 V. Modification of the deposited layer was carried out by irradiating the surface of the deposited layer by a high-intensity electron beam in the mode of melting and high-speed crystallization. The load on the inductor was 50 mN. Determination of the nanohardness and Young elastic modulus was carried out at 30 arbitrarily chosen points of the modified surface. The defect structure of the surface modified by of an electron beam of the surfacing was studied by scanning electron microscopy. A multiple increase in nanohardness and Young elastic modulus of the welded layer was revealed during electron-beam treatment according to the base material. It was found that the maximum hardening effect is observed at surfacing by a flux-cored wire containing 4.5 % of boron. It is shown that on the weld deposit surface formed by the wire with 4.5% of boron and additionally irradiated with an intense pulsed electron beam, the

formation of a microcrack system on the surface of irradiation was revealed. Investigations of weld deposits, formed by non-boron-containing powder wires, have shown the absence of microcracks on the modified surface after pulsed electron beam treatment. The increase in the strength properties of the deposited layer modified by the electron beam is due to the formation of structures which crystallite sizes vary from tenths of a micrometer to one micrometer and contain second phases (borides, carbides, carboborides). A significant spread of the values of the nanohardness and the Young elastic modulus was established, which was apparently due to the inhomogeneous distribution of the strengthening phases.

**Keywords:** surfacing, flux cored wire, nanohardness, electron beam treatment, Young elastic modulus, low carbon steel.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-4-304-309

## REFERENCES

1. Chernouvanov V.I., Golubev I.G. *Vosstanovlenie detalei mashin (Sostoyaniye i perspektivy)* [Restoration of machine parts (Status and prospects)]. Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2010, 376 p. (In Russ.).
2. Zhirkin Yu.V. *Nadezhnost', ekspluatatsiya i remont metallurgicheskikh mashin* [Reliability, maintenance and repair of metallurgical machines]. Magnitogorsk: MG TU, 2002, 213 p. (In Russ.).
3. *Nanoinzheneriya poverkhnosti. Formirovaniye neravnovesnykh sostoyaniy v poverkhnostnykh sloyakh materialov metodami elektronno-ionno-plazmennyykh tekhnologii* [Nanoengineering of surface. Formation of non-equilibrium states in the surface layers of materials by means of electron-ion-plasma technologies]. Lyakhov N.Z., Psakh'e S.G. eds. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008, 276 p. (In Russ.).
4. Kononov S., Kormyshev V., Gromov V., Ivanov Yu. Metallographic examination of forming improved mechanical properties via surfacing of steel HARDOX 450 with flux cored wire. *Materials Science Forum*. 2016, vol. 870, pp. 159–162.
5. Grishunin V.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Kononov S.V. Evolution of the phase composition and defect substructure of rail steel subjected to high-intensity electron-beam treatment. *Journal of Surface Investigation*. 2013, vol. 7, no. 5, pp. 990–995.
6. Yun H., Li J., Chen H.B., Lin C.-J. A study on the N-, S- and Cl-modified nano-TiO<sub>2</sub> coatings for corrosion protection of stainless steel. *Electrochimica Acta*. 2007, vol. 52, pp. 6679–6685.
7. Cho T.Y., Yoon J.H., Cho J.Y., Joo Y.K., Kang J.H., Zhang S., Gon Chun H., Hwang S.Y., Kwon S.C. Surface properties and tensile bond strength of HVOF thermal spray coatings of WC-Co powder onto the surface of 420J2 steel and the bond coats of Ni, NiCr, and Ni/NiCr. *Surface and Coatings Technology*. 2009, vol. 203, pp. 3250–3253.
8. Jiang P., He X.L., Li X.X., Yu L.G., Wang H.M. Wear resistance of a laser surface alloyed Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2000, vol. 130, pp. 24–28.
9. Gribkov V.A., Grigor'ev F.I., Kalin B.A. etc. *Perspektivnyye radiatsionno-puchkovyye tekhnologii obrabotki materialov: uchebnyk* [Perspective radiation-beam technologies of material processing: Textbook]. Moscow: Izd-vo stol, 2001, 528 p. (In Russ.).
10. Kadyrzhanov K.K., Komarov F.F., Pogrebnyak A.D. etc. *Ionno-luchevaya i ionno-plazmennaya modifikatsiya materialov* [Ion-beam and ion-plasma modification of materials]. Moscow: izd. MGU, 2005, 640 p. (In Russ.).
11. Walker J.C., Murray J.W., Nica M., Cook R.B., Clare A.T. The effect of large-area pulsed electron beam melting on the corrosion and microstructure of a Ti6Al4V alloy. *Applied Surface Science*. 2014, vol. 311, pp. 534–540.
12. Gao Yu-kui. Influence of pulsed electron beam treatment on microstructure and properties of TA15 titanium alloy. *Applied Surface Science*. 2013, vol. 264, pp. 633–635.
13. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. *Materials Science and Engineering A*. 2013, vol. 578, pp. 310–317.
14. Raikov S.V., Kapralov E.V., Vashchuk E.S., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Sosnin K.V. Structure of the surface layer of a wear-resistant coating after treatment with a high-intensity electron beam. *Journal of Surface Investigation*. 2015, vol. 9, no. 5, pp. 934–938.
15. Ivanov Y., Alsaravaeva K., Gromov V., Kononov S., Semina O. Evolution of Al-19.4Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*. 2015, vol. 31 (13a), pp. 1523–1529.
16. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.* 1992, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583.
17. Milman Yu.V., Golubenko A.A., Dub S.N. Indentation size effect in nanohardness. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59 (20), pp. 7480–7487.
18. Golovin Yu.I. *Vvedeniye v nanotekhniku* [Introduction to nanotechnologies]. Moscow: Mashinostroeniye, 2007, 496 p. (In Russ.).
19. Golovin Yu.I. *Nanoindentirovaniye i ego vozmozhnosti* [Nanoindentation and its capabilities]. Moscow: Mashinostroeniye, 2009, 312 p. (In Russ.).
20. Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. *Boridy* [Borides]. Moscow: Atomizdat, 1975, 376 p. (In Russ.).
21. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical heat treatment of metals and alloys]. Lyakhovich L.S. ed. Moscow: Metallurgiya, 1981, 424 p. (In Russ.).
22. Elagina O.Yu. *Tekhnologicheskiye metody povysheniya iznoso-stoikosti detalei mashin* [Technological methods of improving the wear resistance of machine parts]. Moscow: Logos, 2009, 488 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The research was financially supported by the Russian Scientific Foundation (project No. 15-19-00065).

### Information about the authors:

**V.E. Kormyshev**, Engineer of the Chair of Science named after V.M. Finkel (8923923000@mail.ru)

**Yu.F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Researcher (yuf55@mail.ru)

**V.E. Gromov**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsib.ru)

**S.V. Kononov**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials (ksv@ssau.ru)

**A.D. Teresov**, Leading Electronic Engineer of the Laboratory of Low-temperature Plasma (tad514@sibmail.com)

Received March 10, 2017