# Фазовый состав и дефектная субструктура двойной наплавки, сформированной С – V – Cr – Nb – W порошковой проволокой на стали Hardox 450

С. В. Коновалов, В. Е. Кормышев, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Е. В. Капралов

Методами современного физического материаловедения выполнен анализ фазового состава, дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств стали Hardox 450 после одинарной и двойной наплавки C-V-Cr-Nb-W содержащей проволоки. Установлено увеличение износостойкости материала по сравнению с исходной сталью в 140 – 150 раз и уменьшение коэффициента трения в 2-2,5 раза. Проанализировано изменение тонкой структуры и фазового состава наплавленного металла. Показано, что установленные эффекты могут быть объяснены формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой связано с образованием мартенситной структурой  $\alpha$ -матрицы и наличием высокой объемной доли включений карбидной фазы на основе Fe, Cr, W и Nb. Формирование повторной наплавки приводит к многократному увеличению объемной доли карбидной фазы и отсутствию оксидной фазы.

**Ключевые слова:** сталь Hardox 450, наплавка, структура, фазовый состав, износостойкость, коэффициент трения, микротвердость.

## Введение

Одним из способов увеличения срока службы машин и механизмов, детали которых подвержены абразивному изнашиванию и ударным нагрузкам в процессе эксплуатации, является нанесение на них различными методами покрытий, содержащих износостойкие элементы [1]. Это приводит к существенному увеличению срока службы всего изделия. В частности, опытное нанесение сварочными методами покрытий, упрочненных частицами карбидов, боридов и других высокотвердых фаз на ковши экскаваторов и кузова самосвалов приводит к продлению срока межремонтного интервала почти в 1,5 раза [2, 3].

Ранее в наших работах [3 – 5] установлены закономерности изменения структурно-фазовых состояний и трибологических свойств стали Hardox 400 при нанесении на нее износостойких покрытий, по своему составу соответствующим средне- и высоколегированным сталям и высоко-

хромистым чугунам. Показано, что наплавка является многофазным материалом и представлена зернами твердого раствора на основе α-железа, субмикро- и наноразмерными частицами карбидных и боридных фаз — карбидов железа (Fe<sub>3</sub>C), ниобия (NbC) и хрома  $(Cr_3C_2, Cr_7C_3)$ , боридов железа (FeB, Fe<sub>3</sub>B), боросилицидов железа (В(Fe, Si)3) и карбоборидов хрома (Ст<sub>7</sub>ВС<sub>4</sub>). Выявлено более чем в 2 раза увеличение износостойкости наплавленного слоя по отношению к объему стали, что обусловлено формированием субмикро- и наноразмерной структуры кристаллизации α-фазы и выделением большого объема высокопрочных частиц карбидных и боридных фаз. Однако, как показали предварительно проведенные исследования, возможно достижение больших показателей по повышению износостойких свойств стальных изделий, особенно при проведении не только одинарной, но и двойной наплавки.

Сталь марки Hardox 450 предназначена для использования в условиях, где предъявляют особые требования к износостойкости в сочетании с хоро-

шими свойствами холодной гибки и свариваемостью. Область применения Hardox 450: кузова самосвалов, контейнеры, дробилки, просеиватели, загрузочные устройства, мерные бункеры, скиповые подъемники, кромки режущего ножа, конвейеры, ковши, ножи, шестерни, колеса цепной передачи и т.д. [6].

Цель настоящей работы — анализ фазового состава, дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств стали Hardox 450 после одинарной и двойной наплавки C-V-Cr-Nb-W содержащей проволоки.

### Материалы и методики исследования

В качестве материала основы использовали сталь марки Hardox 450. Элементный состав стали марки Hardox 450, в масс. %: С — 0,19-0,26; Si — 0,70; Mn — 1,6; P — 0,025; S — 0,010; Cr — 0,25; Ni — 0,25; Mo — 025; В — 0,004; Fe — остальное. Наплавку (одинарную и двойную) осуществляли проволокой следующего химического состава, в масс. %: С — 1,4; V — 1,0; Cr — 7,0; Nb — 8,0; W — 1,2; Fe — остальное. Двойную наплавку наносили перпендикулярно одинарной. Наплавку проводили в среде защитного газа состава Ar — 82 %, CO<sub>2</sub> — 18 % при сварочном токе 250-300 A и напряжении на дуге 30-35 B.

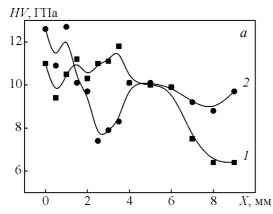
Исследования фазового состава и дефектной субструктуры стали и наплавляемого металла осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Shimadzu XRD 6000) и просвечивающей электронной микроскопии (метод тонких фольг) на микроскопе JEM-2100. Фольги изготавливали методом электролитического утонения пластинок, вырезанных из наплавленного металла (слой, расположенный на половине толщины наплавленного металла), зоны контакта наплавленного

металла и стали и на расстоянии ≈ 15 мм от зоны контакта в объеме образца стали. Механические свойства наплавленного металла и стали характеризовали величиной микротвердости на микротвердомере HVS-1000A (метод Виккерса, нагрузка на индентор 5 H). Трибологические свойства наплавленного металла и стали анализировали, определяя износостойкость и коэффициент трения. Объем износа поверхностного слоя определяли после проведения профилометрии образовавшегося трека с помощью лазерного оптического профилометра MicroMeasure 3D Station.

### Результаты исследования и обсуждение

Результаты исследования микротвердости (поперечный шлиф, профиль микротвердости) представлены на рис. 1. Одинарная наплавка приводит к формированию высокопрочного поверхностного слоя толщиной  $\approx 6$  мм, микротвердость которого изменяется в пределах 9.5-11.5 ГПа (рис. 1, кривая I). При большем удалении от поверхности наплавленного слоя микротвердость материала быстро падает, выходя на уровень 6.5 ГПа. Следовательно, твердость наплавленного слоя почти в 2 раза превышает твердость металла основы (сталь Hardox-450).

Формирование второго наплавленного слоя сопровождается увеличением твердости поверхностного слоя толщиной  $\approx 1$  мм до 12,5 ГПа и формированием разупрочненного подповерхностного слоя, расположенного на глубине 2,5 – 3,5 мм (рис. 1a, 16, кривая 2). На большей глубине твердость наплавленного слоя вновь увеличивается до значений 9,5 – 10 ГПа. Можно предположить, что существенное снижение микротвердости слоя, расположенного на глубине 2,5 – 3,5 мм соответствует зоне контакта металла первой и второй наплавки; повторное увели-



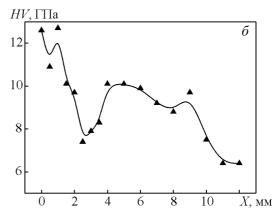


Рис. 1. Профиль микротвердости системы "наплавленный слой/сталь" (a) и "двойной наплавленный слой" ( $\delta$ ); 1- одинарная наплавка; 2- двойная наплавка.

Таблица 1 Результаты трибологических испытаний стали Hardox 450 и наплавленных на нее слоев металла

Режим	$V$ , $10^{-6}$ , $\text{mm}^3/(\text{H}\cdot\text{m})$	<μ>	$\mu_{\text{min}}$	$\mu_{max}$
Сталь Hardox 450	95,1	0,259	0,03	0,58
Наплавка одинарная	0,69	0,104	0,08	0,14
Наплавка двойная	0,62	0,132	0,11	0,27

Примечание: V — параметр, характеризующий степень изнашивания материала; < $\mu$ > — среднее значение коэффициента трения;  $\mu_{\min}$  — минимальное значение коэффициента трения;  $\mu_{\max}$  — максимальное значение коэффициента трения.

чение твердости, выявленное на глубине  $4-6\,\mathrm{mm}$  обусловлено присутствием первого наплавленного слоя.

Результаты трибологических испытаний стали, металла, формирующегося при одинарной и двойной наплавках, приведены в табл. 1. Испытанию подвергали слой наплавки, расположенный на половине ее толшины.

Анализируя результаты, представленные в табл. 1, можно отметить, что износостойкость наплавленного металла превышает износостойкость стали в 140-150 раз; коэффициент трения наплавленного металла ниже в 2-2,5 раза коэффициента трения стали. Формирование второго наплавленного слоя практически не влияет на трибологические характеристики материала.

Очевидно, что повышенные прочностные и трибологические свойства металла наплавки обусловлены ее фазовым составом и состоянием дефектной субструктуры. Фазовый состав одинарного и повторно наплавленного слоев изучали методами рентгеноструктурного анализа. Исследованиям подвергали слой наплавки, расположенный на половине ее толщины. Участок рентгенограммы, полученной собразца металла повторной наплавки, представлен на рис. 2. Результаты исследований структурно-фазового состояния материала представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица
Фазовый состав и характеристики кристаллической 
структуры фаз одинарной наплавка

-	Параметры фаз					
Фаза	$\Delta V$ ,	<i>a</i> ,	c,	D (OKP),	$\Delta d/d$ ,	
	масс. %	HM	НМ	HM	$10^{-3}$	
α-Fe	63,2	0,28836		24,53	2,03	
$Fe_3O_4$	28,8	0,28992	0,93832	9,85	7,254	
Fe <sub>3</sub> C	6,0	0,47146	0,44300	14,04	3,395	
CrC	2,0	0,40610		10,55	2,914	

 $\Delta V$  — массовая доля, a, b, c — параметры элементарной ячейки, D (OKP) — размер областей когерентного рассеяния,  $\Delta d/d$  — микроискажения кристаллической решетки.

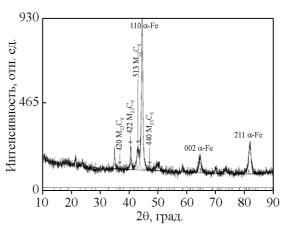


Рис. 2. Участок рентгенограммы, полученной с образца металла повторной наплавки.

Таблица 3 Фазовый состав и характеристики кристаллической структуры фаз повторно наплавленного слоя

	Параметры фаз					
Фаза	$\Delta V$ ,	a,	b,	с,	D (OKP),	$\Delta d/d$ ,
	масс. %	HM	НМ	HM	HM	$10^{-3}$
$M_{23}C_6$	52,3	1,09122			21,93	9,102
α-Fe	46,7	0,28838			38,89	4,71
$Nb_6C_5$	1,0	0,54470	0,9435	0,5447		

Анализируя результаты, представленные в табл. 2 и табл. 3, можно отметить, что в обоих случаях (одинарная и двойная наплавки) выявляется многофазная структура. Основной фазой (не считая  $\alpha$ -фазы — твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа) в одинарной наплавке являются оксид железа состава  $\mathrm{Fe_3O_4}$ . Основной фазой повторно наплавленного слоя являются карбиды на основе специальных элементов (карбиды ниобия, вольфрама и хрома). Следует также отметить, что формирование повторной наплавки приводит к многократному увеличению объемной доли карбидной фазы и полному отсутствию оксидной фазы.

Дефектную субструктуру стали и повторно наплавленного металла анализировали методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Исследования стали выявили структуру, характерную для "мартенсита отпуска" [7, 8], то есть структуру, сформировавшуюся в результате закалки и последующего отпуска стали (рис. 3).

Анализ представленных на рис. 3 изображений структуры стали, полученных методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг на просвет, свидетельствует о присутствии в объеме зерен α-фазы (твердый раствор на основе железа, ОЦК кристаллическая решетка) кристаллов плас-

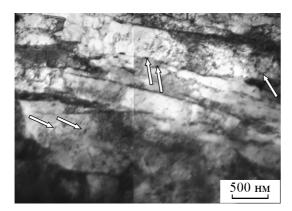
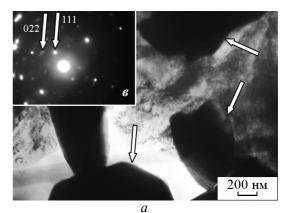


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали; стрелками указаны частицы карбидной фазы.

тинчатой морфологии, сформировавшихся, очевидно, вследствие мартенситного  $\gamma \to \alpha$  превращения. В объеме и по границам кристаллов  $\alpha$ -фазы выявляются частицы карбидной фазы (карбид железа, цементит). Кристаллы  $\alpha$ -фазы фрагментированы, то есть разбиты на слаборазориентированные объемы (рис. 3). На границах фрагментов также располагаются частицы карбидной фазы.

Характерные электронно-микроскопические изображения структуры повторно нанесенной наплавки, представлены на рис. 4. Отчетливо видно, что сформированный материал является многофазным. Одна из фаз представлена включениями субмикронных размеров, плохо поддающихся электролитической полировке (рис. 4а, включения указаны стрелками). Следуя результатам, полученным методами рентгенофазового анализа (табл. 3), можно заключить, что данные включения являются карбидной фазой, а именно карбидами состава



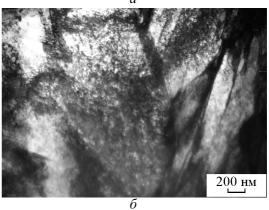


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение многофазной структуры повторной наплавки на стали; на (в) указаны индексы рефлексов карбида ниобия NbC.

 $M_{23}C_6$  ((Сг, Fe, W)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>). Вторая фаза хорошо полируется и очевидно является твердым раствором на основе  $\alpha$ -железа (ОЦК кристаллическая решетка) (рис.  $4\delta$ ).

Характерное электронно-микроскопическое изображение структуры α-фазы повторной наплавки

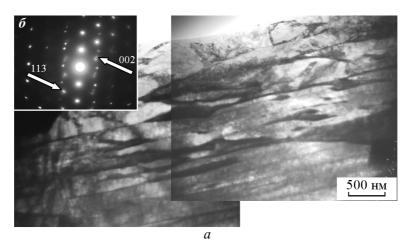


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры  $\alpha$ -фазы повторной наплавки на стали (a); на ( $\delta$ ) указаны индексы рефлексов  $\gamma$ -фазы.

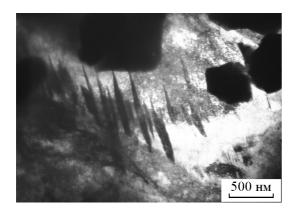
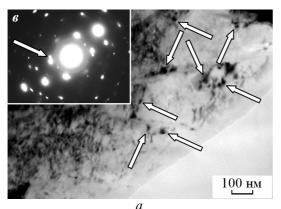


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение мартенситной структуры повторной наплавки на стали



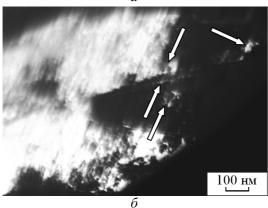


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры повторной наплавки на стали; a — светлое поле;  $\delta$  — темное поле, полученное в рефлексе [110] $\alpha$ -Fe + [002]NbC (рефлексы указаны на ( $\beta$ ) стрелкой);  $\delta$  — микроэлектронограмма к рис. 7 $\alpha$ . Стрелками на ( $\alpha$ ) и ( $\delta$ ) указаны частицы карбидной фазы.

приведено на рис. 5. Отчетливо видна пластинчатая структура, сформировавшаяся по мартенситному механизму  $\gamma \to \alpha$  превращения. Индицирование микроэлектронограмм, полученных с такой струк-

туры, позволило выявить рефлексы  $\alpha$ -фазы и  $\gamma$ -фазы (остаточный аустенит, твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки железа) (рис. 5 $\delta$ , указаны рефлексы  $\gamma$ -фазы).

В объеме кристаллов мартенсита обнаруживается дислокационная субструктура в виде многомерных сеток (рис. 46); скалярная плотность дислокаций превышает значение  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>. В отдельных случаях в объеме кристаллов мартенсита обнаруживаются двойники превращения (рис. 6).

В объеме и на границах кристаллов мартенсита обнаружены наноразмерные частицы второй фазы (рис. 7, частицы указаны стрелками). Индицирование микроэлектронограмм, полученных с таких участков материала, показало, что данные частицы — карбид ниобия состава NbC.

В отдельных случаях удается получить микроэлектронограммы частиц субмикронных размеров. Индицирование таких микроэлектронограмм позволило выявить как рефлексы карбида  $M_{23}C_6$  ((Cr, Fe, W) $_{23}C_6$ ), так и рефлексы карбида NbC (рис.  $4_\theta$ ). Следовательно, частицы субмикронных размеров в исследуемой нами наплавке могут быть как карбидами ниобия, так и карбидами более сложного состава.

Структура зоны контакта металла наплавленного слоя и основного материала характерная для мартенсита отпуска — кристаллы мартенсита с относительно низкой скалярной плотностью дислокаций; в объеме и по границам кристаллов располагаются частицы карбида железа.

### Выводы

Выполнены исследования фазового состава, дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств двойной наплавки, выполненной на стали Hardox 450 наплавочной проволокой. Установлено, что износостойкость наплавленного металла превышает износостойкость стали Hardox 450 в 140-150 раз; коэффициент трения наплавленного металла ниже в 2-2,5 раза коэффициента трения стали.

Показано, что формирование второго наплавленного слоя практически не влияет на трибологические характеристики материала. Установлено, что повышенные механические и трибологические свойства наплавленного слоя обусловлены формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой связано с формированием мартенситной структурой α-матрицы и наличием высокой (более 50 %) объемной доли включений карбидной фазы на основе железа, хрома, вольфрама и ниобия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00065). При выполнении исследований задействовано оборудование центра коллективного пользования "Материаловедение" СибГИУ.

### Литература

- Полетика И.М., Макаров С.А., Тетюцкая М.В., Крылова Т.А. Электронно-лучевая наплавка износостойких и коррозионно-стойких покрытий на низкоуглеродистую сталь. Известия Томского политехнического университета, 2012, т. 321, № 2, с. 86 – 89.
- Соколов Г.Н., Лысак В.И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы для горячего деформирования сталей. Волгоград: РПК "Политехник", 2005. 284 с.
- 3. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Райков С.В., Иванов Ю.Ф. Структура и свойства композиционных износостойких наплавок на сталь. Новокузнецк: СибГИУ, 2014, 108 с.
- Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Райков С.В., Глезер А.М., Иванов Ю.Ф. Структура и свойства износостойкой наплавки на сталь Хардокс 400. Проблемы черной металлургии и материаловедения, 2015, № 1, с. 80 – 86.
- Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Наноструктурные состояния и свойства наплавки, сформированной на стали порошковой проволокой. Известия высших учебных заведений. Физика, 2015, т. 58, № 4, с. 39 – 45.
- 6. Грнеж Б. Применение стали марки Hardox в горной промышленности. Горная промышленность, 2008, № 3 (79), с. 34 38.
- 7. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л. Структура термически обработанной стали. М.: Металлургия, 1994, 288 с.
- 8. Бернштейн М.Л., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д. Отпуск стали. М.: МИСИС, 1997, 336 с.

### References

- Poletika I.M., Makarov S.A., Tetyuckaya M.V., Krylova T.A. Elektronno-luchevaya naplavka iznosostojkih i korrozionno stojkih pokrytij na nizkouglerodistuyu stal' [Electron beam welding of wear-resistant and corrosionresistant coatings on mild steel]. *Izvestiya Tomskogo* politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 86 – 89.
- 2. Sokolov G.N., Lysak V.I. *Naplavka iznosostojkih splavov na pressovye shtampy dlya goryachego deformirovaniya stalej* [Surfacing wear-resistant alloys on pressing stamps for hot deformation of steel]. Volgograd, RPK Politekhnik Publ., 2005, 284 p.
- 3. Kapralov E.V., Budovskih E.A., Gromov V.E., Rajkov S.V., Ivanov Yu.F. *Struktura i svojstva kompozicionnyh iznosostojkih naplavok na stal'* [The structure and properties of the wear-resistant composite steel claddings]. Novokuzneck, SibSIU publ., 2014, 108 p.
- Kapralov E.V., Budovskih E.A., Gromov V.E., Rajkov S.V., Glezer A.M., Ivanov Yu.F. Struktura i svojstva iznosostojkoj naplavki na stal' Hardox 400 [Structure and properties of wear-resistant surfacing on steel Hardox 400]. Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya — The problems of ferrous metallurgy and materials science, 2015, no. 1, pp. 80 – 86.
- 5. Kapralov E.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Nanostructural states and properties of the surfacing formed on steel by a cored wire. Russian Physics Journal, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 471 477.
- Grnezh B. Primenenie stali marki Hardox v gornoj promyshlennosti [The use of steel Hardox brand in the mining industry]. Gornaya promyshlennost' — Mining Industry Journal, 2008, no. (79), pp. 34 – 38.
- Schastlivcev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L. Struktura termicheski obrabotannoj stali [The structure of the thermally treated steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994, 288 p.
- 8. Bernshtejn M.L., Kaputkina L.M., Prokoshkin S.D. *Otpusk stali* [Tempering of steel]. Moscow, MISIS Publ., 1997, 336 p.

Статья поступила в редакцию 17.02.2016 г.

Коновалов Сергей Валерьевич — Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42), доктор технических наук, доцент, профессор, специалист в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий. E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru.

**Кормышев Василий Евгеньевич** — Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42), инженер, специалист в области физики упрочнения поверхности металлических изделий. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

Громов Виктор Евгеньевич — Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42), доктор физикоматематических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области плазменного упрочнения и защиты поверхности металлов, физики конденсированного состояния, физического материаловедения, модификации металлов и сплавов потоками плазмы и пучками заряженных частиц. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

**Иванов Юрий Федорович** — Институт сильноточной электроники СО РАН (634021, г. Томск, проспект Академический, 4), доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, специалист в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий, модификации металлов и сплавов потоками плазмы и пучками заряженных частиц. E-mail: yufi55@mail.ru.

Капралов Евгений Владимирович — Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42), аспирант, специализируется в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

# Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V - Cr - Nb - W powder wire on steel

# S. V. Konovalov, V. E. Kormyshev, V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, E. V. Kapralov

The analysis of phase composition, defect substructure, mechanical and tribological properties of Hardox 450 steel after single and double surfacing of C - V - Cr - Nb - W containing wire was carried out by methods of modern physical material science. The increase of the wear resistance of the material compared to the original steel by 140 - 150 times and reduction of friction coefficient by 2 - 2.5 times was established. The change of the fine structure and phase composition of the surfaced metal was analyzed. It was shown that the established effects might be associated with the formation of a multiphase nanoscale and submicron structure, hardening of which was associated with the formation of martensitic structure of a-martix and the presence of high volume fraction of carbide phase inclusions based on Fe, Cr, W and Nb. Formation of re-surfacing leads to repeated increase in the volume fraction of the carbide phase and the absence of the oxide phase.

Keywords: steel Hardox 450 cladding, structure, phase composition, abrasion resistance, friction coefficient, microhardness.

**Konovalov Sergey** — Siberian State Industrial University (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirova str., 42), DrSci (eng), associate professor, professor of Department of physics named prof. V. Finkel, expert in physics of strength and plasticity of materials under conditions of external radiation. E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru.

**Kormyshev Basil** — Siberian State Industrial University (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirova str., 42), engineer of V.Finkel department of physics, expert in physics of strength and plasticity of materials under conditions of external radiation. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

Gromov Victor — Siberian State Industrial University (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirova str., 42), DrSci (phys-math), professor, head of the department of physics named of professor V. Finkel, expert in the field of plasma hardening and protection of metal surfaces, solid state physics, materials science, the modification of metals and alloys plasma flows and beams of charged particles. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

**Ivanov Yury** — Institute of High Current Electronics SB RAS (634021, Russia, Tomsk, Academicheckii Av., 4), DrSci (phys-math), professor, chief researcher, expert on the physics of strength and plasticity of materials under conditions of external radiation, metals, modification alloys and plasma flows and beams of charged particles. E-mail: yufi55@mail.ru.

**Kapralov Evgeny** — Siberian State Industrial University (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirova str., 42), graduate student of the Department of the physics named after Professor V. Finkel, expert in physics of strength and plasticity of materials under conditions of external radiation. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.