

УДК 621.9.048

## О ПРИМЕНЕНИИ СВС-ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ ВАЛКОВ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

© 2013 г. **А. Е. Кудряшов, О. Н. Доронин, Е. А. Левашов, В. Б. Крахт**

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Научно-учебный центр (НУЦ) СВС МИСиС–ИСМАН, г. Москва

Староскольский технологический институт (СТИ) НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол

**А. Е. Кудряшов** – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (495) 955-00-26. E-mail: aekudr@rambler.ru.

**О. Н. Доронин** – ст. препод. кафедры технологий и оборудования в металлургии и машиностроении (ТОММ) СТИ НИТУ «МИСиС» (309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, микрорайон им. Макаренко, 42). Тел.: (4725) 32-98-41. E-mail: o-doronin@mail.ru.

**Е. А. Левашов** – докт. техн. наук, акад. РАЕН, проф., зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ «МИСиС», директор НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (495) 638-45-00. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

**В. Б. Крахт** – канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой ТОММ СТИ НИТУ «МИСиС».

Изучены структура, состав и свойства электроискровых покрытий, сформированных на подложках из белого чугуна с использованием СВС-электродного материала СТИМ-40НА (состав TiC–NiAl). Исследована шероховатость полученного покрытия. Применение технологии электроискрового легирования способствовало повышению стойкости прокатных валков в ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» более чем в 2 раза.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование (ЭИЛ), самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), синтетический твердый инструментальный материал (СТИМ), белый чугун, прокатный валок, износостойкие покрытия, коэффициент трения.

Structure, composition, and properties of electrospark coatings generated on substrates from white cast iron with the use of STIM-40NA SHS-electrode material (TiC–NiAl composition) have been studied. The roughness of produced coating has been investigated. Application of the electrospark allowing process facilitated the increase in mill rolls stability more than two times at Open Society «Oskolsky integrated electric iron-and-steel works».

**Key words:** electro-spark allowing, self-propagating high-temperature synthesis, synthetic hard tool material, white cast iron, mill roll, wear-resistant coatings, friction coefficient.

Прокатные валки являются основным технологическим инструментом в прокатном переделе металлургических заводов, ресурс которых во многом определяют следующие технико-экономические показатели работы прокатных цехов: производительность прокатных станов, качество готового проката и себестоимость продукции. В процессе эксплуатации рабочая поверхность валка подвергается циклическим механическому и тепловому воздействиям. Учитывая сложность процессов трения на границе металл–валок, наличие зон опережения и отставания, температуру в очаге деформации (до 1200 °С) и высокие контактные давления, моделирование процессов износа поверхности валков чрезвычайно затруднительно, в связи с чем наиболее достоверные данные об их стойкости могут быть получены в ходе испытаний в производственных условиях [1].

Для повышения ресурса работы изделий, эксплуатация которых протекает в экстремальных условиях, эффективным является применение технологии электроискрового легирования (ЭИЛ). В результате ЭИЛ достигается прирост стойкости различных тяжело

нагруженных деталей оборудования и инструмента (штампы, прокатные валки) в 2 раза и более [2–6]. К достоинствам технологии ЭИЛ относятся высокая адгезия покрытий, относительная простота процесса, его экологическая чистота и низкая энергоемкость. Организация участка электроискровой обработки на предприятии не требует высоких затрат, а внедрение этого метода в технологический процесс характеризуется быстрой окупаемостью инвестиций.

Традиционно в качестве электродных материалов используют металлы и их сплавы, графит, а также твердые сплавы, в основном на основе карбидов вольфрама [6]. Однако такие твердые сплавы не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электродным материалам, в связи с их высокой эрозионной стойкостью и низким коэффициентом переноса. Формируемые электроискровые покрытия не обеспечивают заданные эксплуатационные характеристики из-за высокого коэффициента трения покрытий, их относительно низкой твердости, недостаточной жаростойкости и окалинстойкости карбида вольфрама (WC).

Принципиально новый подход в технологическом процессе получения электродов для ЭИЛ открывается с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и ее разновидности – силового СВС-компактирования [7, 8]. В отличие от метода классической порошковой металлургии (технология прессования–спекания, горячее прессование и т. д.), технология СВС не требует применения сложного оборудования, больших энергетических затрат, высокой химической чистоты используемого сырья и не обладает длительным технологическим циклом. Высокие температуры горения способствуют самоочистке продуктов синтеза от адсорбированных на поверхности порошковых компонентов газов и легкоплавких примесей. Немаловажно, что СВС-сплавы не содержат дорогостоящих вольфрама и кобальта.

Ввиду малой толщины (до 0,2–0,3 мм) покрытий, получаемых при использовании твердосплавных электродов, максимальная эффективность возможна в случае упрочнения валков чистовых клетей, где толщина покрытия соизмерима с полем допуска профилей мелкосортного проката.

Целью работы являлась демонстрация возможностей технологии электроискрового упрочнения валков для горячей прокатки чистовой клетки № 24В среднесортно-мелкосортного стана 350, применяемых в ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (ОАО «ОЭМК»), при использовании СВС-электродных материалов.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала электрода-анода применяли СВС-сплав марки СТИМ-40НА (синтетический твердый инструментальный материал). Его состав 60%TiC–40%NiAl соответствует ТУ 1984-012-11301236-2008. Выбор алюминид никеля (NiAl) в качестве связки обусловлен его высокими жаростойкостью и жаропрочностью. Структура, фазовый состав и свойства электродного материала изучены в работе [8].

Материалом подложки служили образцы (размером 10 × 10 × 5 мм) из белого центробежно-литого чугуна (состав, %: Fe – основа, 3,1 С, 1,89 Si, 0,56 Mn, 0,4 Cr, 0,9 Ni), который используется для изготовления сортовых прокатных валков в ОАО «ОЭМК».

Электроискровую обработку образцов проводили на воздухе с помощью промышленной установки для электроискрового легирования «Alier G-53 Metal», в которой возможно изменение энергетиче-

ских режимов обработки путем варьирования силы тока, частоты и длительности импульсных разрядов. Дополнительно на каждом из 7 энергетических режимов предусмотрено дискретное изменение частоты импульсных разрядов (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0) от максимального значения. Частотно-энергетические характеристики режимов обработки (выборочно) приведены в табл. 1.

Съемку рентгеновских спектров полученных электроискровых покрытий проводили на автоматизированном дифрактометре марки ДРОН с применением монохроматических  $\text{CoK}_\alpha$ - и  $\text{CuK}_\alpha$ -излучений. Съемку вели по точкам (в режиме шагового сканирования) в интервале углов  $2\theta = 10 \div 130^\circ$ , шаг съемки составлял  $0,1^\circ$ , экспозиция – 2–4 с. Качественный фазовый анализ осуществляли сравнением набора экспериментальных межплоскостных расстояний  $d/n$  со штрих-рентгенограммами базы данных. Количественную оценку содержания выполняли путем измерения отношений интенсивностей аналитических линий согласно [9, 10]. Полученные спектры обрабатывали с помощью специального пакета программ, разработанного в НИТУ МИСИС [11].

Трибологические свойства покрытий определяли в соответствии с международными стандартами ASTM G 99-959 и DIN 50324 на высокотемпературной машине трения «High-temperature Tribometer» фирмы «CSM Instruments» (Швейцария) по схеме pin-on-disk. В качестве контртела использовали шарики из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром 6 мм. Линейная скорость скольжения образцов с покрытием выбрана равной 10 см/с при нагрузке 5,0 Н. Температура эксперимента составляла 500 °С. Зависимость коэффициента трения трущейся пары от длины пробега контртела (времени) строили с помощью программного обеспечения «InstrumX». Длина пробега контртела по покрытию составляла 150 м.

Скорость износа образца рассчитывали следующим образом:

$$W = V/(Pl), \quad (1)$$

где  $W$  – скорость износа,  $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $V$  – объем удаленного материала,  $\text{мм}^3$ ;  $P$  – нагрузка, Н;  $l$  – путь трения, м.

Объем удаленного материала находили по формуле

$$V = sL, \quad (2)$$

где  $L$  – длина окружности, мм;  $s$  – площадь сечения износа канавки,  $\text{мм}^2$ .

Шероховатость покрытий измеряли на оптическом профилометре «Veeco WYKONT 1100». Определяли следующие параметры профиля:  $R_t$  – наибольшая

**Таблица 1.** Частотно-энергетические режимы обработки (выборочно) с помощью установки «Alier G-53 Metal»

Режим обработки	Напряжение $U$ , В	Сила тока $I$ , А	Длительность импульса тока $\tau$ , мкс	Энергия единичного импульсного разряда $E$ , Дж	Частота $f$ , Гц (коэффициент изменения частоты)	Суммарная энергия за 1 мин обработки $\Sigma E$ , кДж/мин
1	20	125	25	0,0625	1200 (1,0)	4,5
					960 (0,8)	3,6
					720 (0,6)	2,7
					480 (0,4)	1,8
					240 (0,2)	0,9
2	20	175	50	0,175	600 (1,0)	6,3
					480	5,04
					360	3,78
					240	2,52
					120	1,26
3	20	200	100	0,4	400 (1,0)	9,60
					320	7,68
					240	5,76
					160	3,84
					80	1,92
4	20	200	200	0,8	300 (1,0)	14,4
					240	11,52
					180	8,64
					120	5,76
					60	2,88

Примечание.  $E = UIt$ ,  $\Sigma E = 60Ef$ .

высота ( $R_{max}$  – ГОСТ 2789-73),  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение,  $R_z$  – высота неровностей. Размер анализируемой площади составлял  $1,2 \times 0,9$  мм.

Программное обеспечение «Wyko Vision 32» позволяет строить трехмерные изображения рельефа поверхности, ее линейные профили в заданном направлении и гистограммы распределения пиков по высоте, а также рассчитывать объемные и линейные параметры шероховатости.

Динамику процесса износа поверхности калибра оценивали по изменению размеров готового профиля, так как во время эксплуатации зазор между обработанными валками оставался постоянный, прокатка осуществлялась без изменения температурного режима. Вся партия проката состояла из стали 55С2А (пробная партия – сталь 20Х).

От вышедшего из последней клетки проката ножницами отсекали технологические пробы длиной до 1,5 м и изучали их размеры и параметры поверхности.

Изменение высоты выступов на валке, образовавшихся в результате неравномерного износа покрытия, оценивали по глубине отпечатков на прокате. Для ее определения поверхность проката сглаживали (выравнивали с дном углубления) механической обработкой точением. Поверхность считали сглаженной, если при увеличении в 2,5 раза (лупа) очертания периметра дефекта и следов окалина не отличались

друг от друга. Глубину дефекта находили по разности между диаметрами проката (прутка) в месте расположения дефекта до ( $D$ ) и после ( $d$ ) сглаживания:

$$\chi = D - d. \quad (3)$$

Для измерения глубины дефектов применяли оптический микроскоп «Versamet-2» (Union) при увеличении  $400\times$ .

Максимальную глубину дефектов на прокате получали усреднением размеров трех наиболее глубоких отпечатков.

Геометрические размеры проката измеряли микрометром с погрешностью 0,01 мм.

Исследования микроструктуры покрытий и распределения элементов по ширине шлифа проводили с помощью электронного микроскопа «Quanta Inspect» с энергодисперсионной приставкой «Edax». Размер анализируемой площади составлял  $80 \times 100$  мкм.

Шлифы изготавливали на полировальной машине «Roto Pol-21» (фирма «Struers») с приставкой для работы в автоматическом режиме «Roto Force 1» с использованием наждачной бумаги «Struers» марок #120, 220, 500, 800, 1200, 4000 и суспензий с дисперсностью поликристаллических алмазов 1 мкм.

Пробы для химического анализа отбирали с поверхности ручья упрочненного калибра и, для срав-

нения, с поверхности контрольного (без покрытия) калибра. Предварительно пробы растворяли в концентрированной азотной кислоте, являющейся универсальным травителем для соединений железа и титана [12].

Для вольтамперометрического исследования жидких проб применяли анализатор АКВ-07МК. Он предназначен для качественного и количественного анализа различных объектов на содержание ионов тяжелых металлов и токсичных элементов с пределом обнаружения (по  $Cd^{2+}$ )  $5 \cdot 10^{-9}$  мг/дм<sup>3</sup> и пределом допускаемых значений среднеквадратичного отклонения 4 %.

Исследование жидких проб проводили также на сканирующем спектрофотометре СФ-201, работающем в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Спектральный диапазон измерений составлял 200–1100 нм, максимальное отклонение базовой линии  $\pm 0,002$  нм, разрешающая способность 3 нм [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для нанесения покрытия на образцы был выбран 4-й энергетический режим обработки ( $\Sigma E = 14,4$  кДж/мин). На данном режиме обеспечивается устойчивый массоперенос и формируется поверхностный слой с удовлетворительной шероховатостью поверхности:  $R_a = 12,18$  мкм,  $R_z = 108,12$  мкм,  $R_{max} = 114,98$  мкм.

Фазовый состав образца без покрытия представляет собой смесь двух фаз:  $\alpha$ -Fe и цементита  $Fe_3C$ . Состав покрытия приведен в табл. 2. Видно, что в нем присутствуют фазы карбида титана и алюминид никеля (следы), а также фазы, образовавшиеся в результате взаимодействия в дуге разряда материалов электрода и подложки с окружающей средой: твердый раствор алюминия в железе и оксинитрид алюминия  $Al_3(O,N)_4$  (последние указывают на частичный распад алюминид никеля в процессе электроискрового легирования; вероятно, часть Ni может находиться в твердом растворе алюминия в железе). Наличие в по-

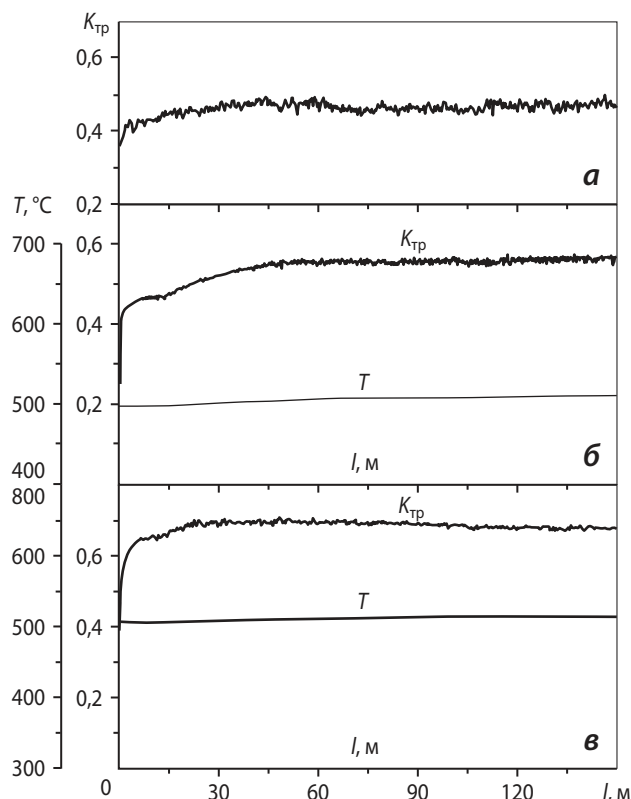


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от длины пробега контртела ( $T = 500$  °C)

**а** – образец без покрытия; **б, в** – с ЭИЛ-покрытием

**б** –  $t = 5$  мин/см<sup>2</sup>,  $I = 125$  А,  $f = 240$  Гц,  $\tau = 25$  мкс,  $\Sigma E = 0,9$  кДж/мин

**в** –  $t = 1$  мин/см<sup>2</sup>,  $I = 175$  А,  $f = 600$  Гц,  $\tau = 50$  мкс,  $\Sigma E = 6,3$  кДж/мин

крытии высокотемпературной модификации железа  $\gamma$ -Fe свидетельствует о нагреве образца в процессе обработки, а отсутствие цементита – о достаточной толщине сформированного покрытия ( $> 20$  мкм).

Для трибологических исследований с целью снижения шероховатости покрытий их осаждали на более низкоэнергетических режимах.

Зависимость коэффициента трения ( $K_{тр}$ ) пары «образец без покрытия (белый чугун) – материал контртела ( $Al_2O_3$ )» от длины пробега контртела приведена на рис. 1, а. После 150 м пробега контртела  $K_{тр} = 0,49$ . Для покрытий величина этого показателя выше. Так, у покрытия, нанесенного при минимальном

Таблица 2. Фазовый состав ЭИЛ-покрытия (электродный материал СТИМ-40НА, режим 4, время обработки 10 мин/см<sup>2</sup>)

Фаза	Структурный тип	Пространственная группа	Содержание фазы		Период решетки $a$ , Å
			об. %	мас. %	
TiC	B1	cF8/2	19	17	4,294
$\gamma$ -Fe	A1	cF4/1	2	3	3,619
$Al_3(O,N)_4$	D7.2	cF56/1	8	6	7,945
Fe-Al	A2	cI2/1	70	73	2,890
Ni-Al	B2	cP2/1	1	1	2,876

энергетическом режиме ( $\Sigma E = 0,9$  кДж/мин),  $K_{тр} = 0,57$ , а в случае более мощного ( $\Sigma E = 6,3$  кДж/мин)  $K_{тр} = 0,67$ . По-видимому, рост  $K_{тр}$  связан с повышенной шероховатостью покрытий по сравнению с неупрочненной поверхностью.

Профиль дорожки износа образцов и их 3D-вид представлен на рис. 2. Установлено, что износ неупрочненного образца из белого чугуна после проведения трибологических испытаний составил  $107,01 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(м·Н). Образцы с ЭИЛ-покрытиями характеризуются меньшей скоростью износа – соответственно  $79,7 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(м·Н) в случае использования минимального энергетического режима ( $\Sigma E = 0,9$  кДж/мин) и  $62,29 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(м·Н) – на более мощном ( $\Sigma E = 6,3$  кДж/мин).

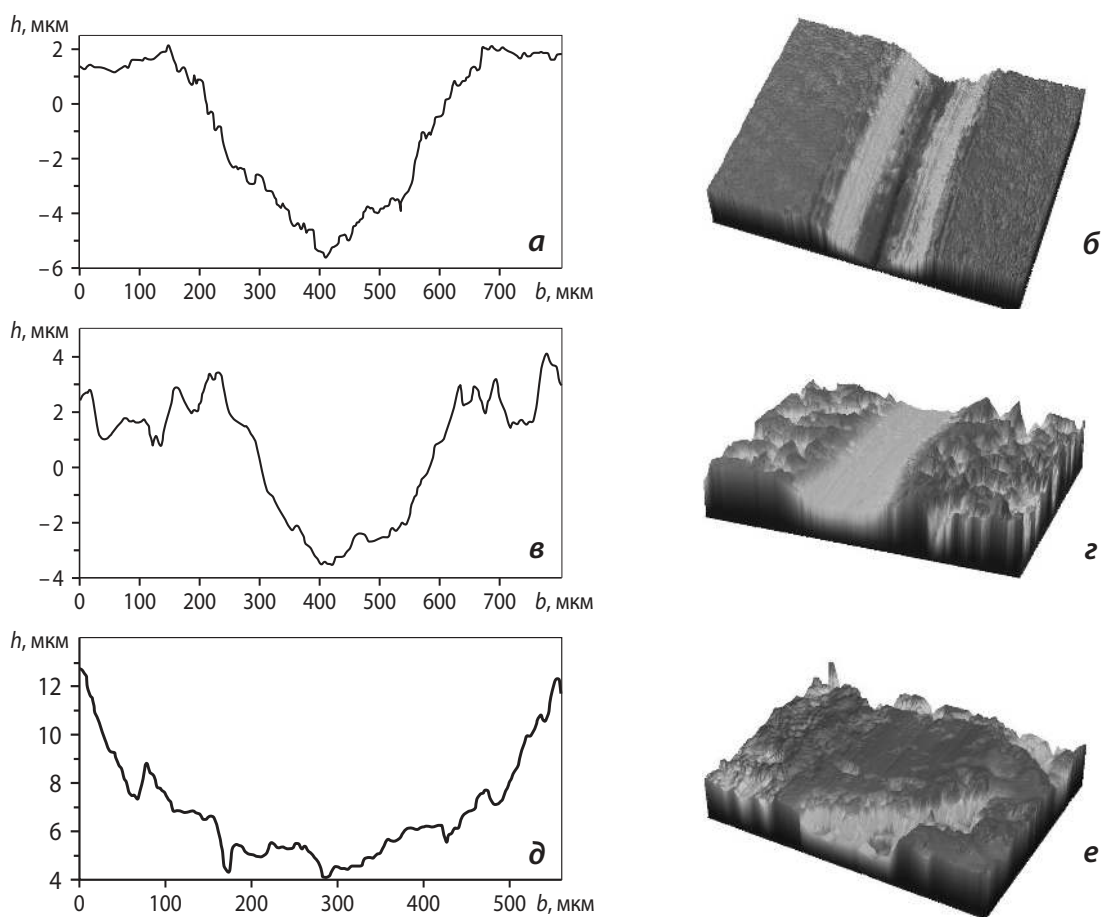
При дальнейшем увеличении энергетического режима ЭИЛ шероховатость покрытий возрастает и определение геометрических размеров дорожки износа становится затруднительным.

Условия трибологических испытаний, проводимых по стандартной методике, несколько отличаются от реальных условий в рабочей зоне прокатного

валка. Тем не менее полученные результаты характеризуют общий позитивный вклад электроискрового покрытия, заключающийся в снижении скорости износа белого чугуна в 1,7 раза.

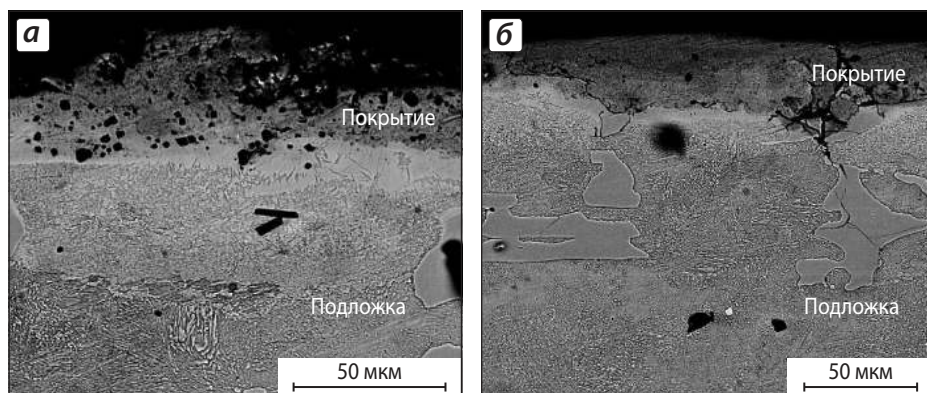
Структура сформированных покрытий при варьировании времени обработки приведена на рис. 3. Видно, что средняя толщина покрытия не превышает 40 мкм. На начальном этапе ЭИЛ (1–3 мин/см<sup>2</sup>) оно характеризуется высокой пористостью, которая при более длительном воздействии (3–5 мин/см<sup>2</sup>) снижается. По-видимому, в начальный момент обработки происходит выгорание (обезуглероживание) поверхностного слоя чугуна, вследствие чего формируется неплотное покрытие. Увеличение продолжительности ЭИЛ способствует более интенсивному нагреву материалов анода и катода, в результате чего пористость поверхностного слоя уменьшается.

Учитывая большую площадь рабочей поверхности калибра (~800 см<sup>2</sup>), производительность ЭИЛ-обработки была выбрана 3 мин/см<sup>2</sup>. Для сравнения часть поверхности калибра была обработана при  $t = 5$  мин/см<sup>2</sup>.



**Рис. 2.** Профиль дорожки износа образцов (**а, в, д**) и ее 3D-вид (**б, г, е**)  
**а, б** – образец без покрытия; **в–е** – с ЭИЛ-покрытием  
**в, г** –  $t = 5$  мин/см<sup>2</sup>,  $\Sigma E = 0,9$  кДж/мин; **д, е** –  $t = 1$  мин/см<sup>2</sup>,  $\Sigma E = 6,3$  кДж/мин





**Рис. 3.** Структура ЭИЛ-покрытия (подложка – белый чугун)  
**а** –  $t = 3$  мин/см<sup>2</sup>; **б** – 5 мин/см<sup>2</sup>

Упрочненный калибр прошел производственные испытания в чистой группе клетей мелкосортной линии мелкосортно-среднесортного стана 350 ОАО «ОЭМК» при производстве профиля «круг 23 мм». После проведения опытной прокатки партии металла в количестве 10,5 т (сталь 20Х) следов износа поверхности упрочненного калибра не установлено. При обследовании проб 1–4 (масса проката 10,5–70,5 т) дефектов на поверхности проката обнаружено не было.

На пробе 5 (90,5 т) на поверхности проката наблюдались локальные дефекты в виде углублений строчного характера, расположенных вдоль направления прокатки (рис. 4, а). Аналогичные дефекты выявлены и на пробах 6–9.

Результаты измерений и расчетов стойкости обработанной поверхности калибра приведены в табл. 3.

Учитывая, что чистовая клеть мелкосортной линии стана 350 имеет вертикальное расположение валков, можно определить среднюю величину износа калибра:

$$\Delta B = B_{\text{ср}9} - B_{\text{ср}1}, \quad (4)$$

где  $B_{\text{ср}9}$  и  $B_{\text{ср}1}$  – средняя ширина профиля соответственно 9-й и 1-й проб.

Износ каждого из ручьев калибра будет равен половине средней величины износа калибра ( $\Delta B/2$ ).

Можно предположить, что средний износ каждого из валков за время испытаний составил по ширине

$$\Delta B/2 = (23,44 - 23,1)/2 = 0,17 \text{ мм},$$

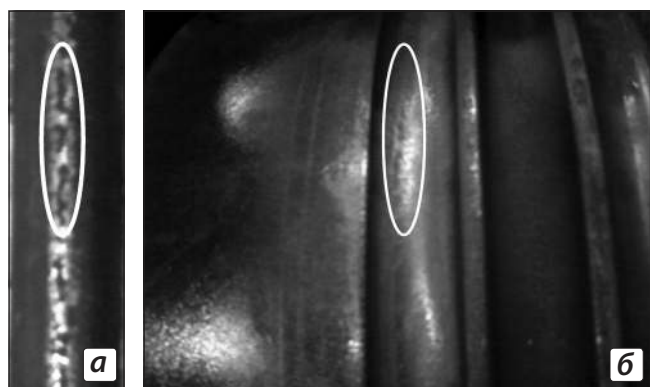
а увеличение размеров профиля по высоте равно

$$\Delta H/2 = (23,15 - 22,95)/2 = 0,1 \text{ мм}.$$

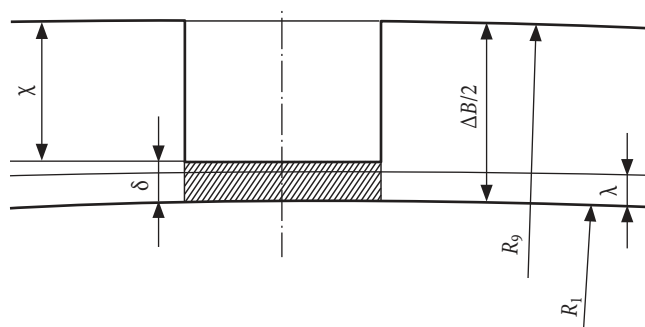
После испытания (160 т) на поверхности ручья были обнаружены локальные выступы, расположенные на площади, обработанной с максимальной производительностью (5 мин/см<sup>2</sup>), идентичные по характеру расположению и форме отпечаткам на поверхности последней пробы (см. рис. 4, б).

Высота выступов на ручье валка равна глубине отпечатков на прокате. Поэтому минимальный износ поверхности ручья по вершинам выступа можно рассчитать исходя из рис. 5:

$$t = 1/2 \Delta B - \chi, \quad (5)$$



**Рис. 4.** Дефекты на прокате и рабочей поверхности валка  
**а** – поверхность пробы 5 (с зачисткой от окалины)  
**б** – поверхность ручья валка



**Рис. 5.** Глубина дефектов на прокате

$R_1$  и  $R_9$  – радиусы профиля соответственно первой и последней (девятой) проб,  $\delta$  – износ валка по дну отпечатка,  $\lambda$  – исходная толщина покрытия

**Таблица 3.** Динамика изменения геометрических размеров профиля проката

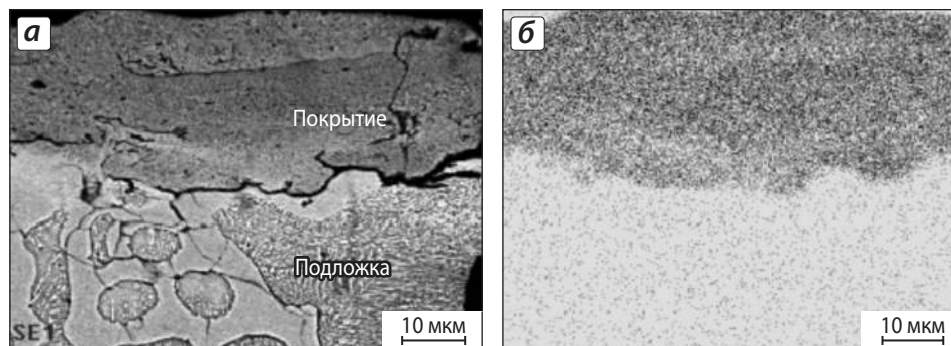
№ пробы	Масса проката, т (с учетом пробной партии)	$H_{ср}$ , мм	$B_{ср}$ , мм	$\Delta B/2$ , мкм	Размеры дефектов				$\delta$ , мкм
					$D$ , мм	$d$ , мм	$\chi$ , мм	$\chi_{ср}$ , мкм	
Прокатка (сталь 55С2А)									
9	160 (170,5)	23,15	23,44	171,67	23,31 23,40 23,39	23,18 23,27 23,27	0,13 0,13 0,12	126,7	45,00
8	140 (150,5)	23,07	23,38	141,67	23,31 23,33 23,34	23,20 23,21 23,28	0,11 0,12 0,06	96,7	45,00
7	120 (130,5)	23,14	23,38	140,00	23,36 23,28 23,36	23,24 23,22 23,25	0,12 0,06 0,11	96,7	43,33
6	100 (110,5)	23,05	23,35	125,00	23,26 23,27 23,30	23,18 23,19 23,20	0,08 0,08 0,10	86,7	38,33
5	80 (90,5)	22,97	23,27	86,67	23,25 23,35 23,24	23,21 23,20 23,22	0,04 0,15 0,02	70,0	16,67
4	60 (70,5)	22,94	23,24	70,00	Не обнаружено				
3	40 (50,5)	22,91	23,18	43,33	То же				
2	20 (30,5)	22,94	23,22	61,67	-//-				
1	0 (10,5)	22,95	23,1	0	-//-				
Пробная прокатка (сталь 20Х)									
0	10,5	-	-	-	Не обнаружено				

Примечание.  $H_{ср}$ ,  $B_{ср}$  – средние высота и ширина проката в трех сечениях по длине пробы;  $\Delta B/2$  – половина изменения ширины проката (износ ручья);  $D$ ,  $d$  – диаметры прутка в месте расположения дефекта соответственно до и после операции сглаживания поверхности;  $\chi$  – глубина дефекта;  $\chi_{ср}$  – средняя глубина трех наиболее заметных дефектов;  $\delta$  – разность между износом поверхности валка и глубиной отпечатка (высотой выступа).

где  $t$  – износ валка по дну отпечатка, мм;  $1/2\Delta B$  – половина изменения ширины проката (износ ручья), мм;  $\chi$  – глубина дефекта, мм.

Из рис. 6 видно, что в процессе ЭИЛ титан из покрытия не диффундирует в подложку, так как он прочно связан в карбидной фазе. Поэтому, если по-

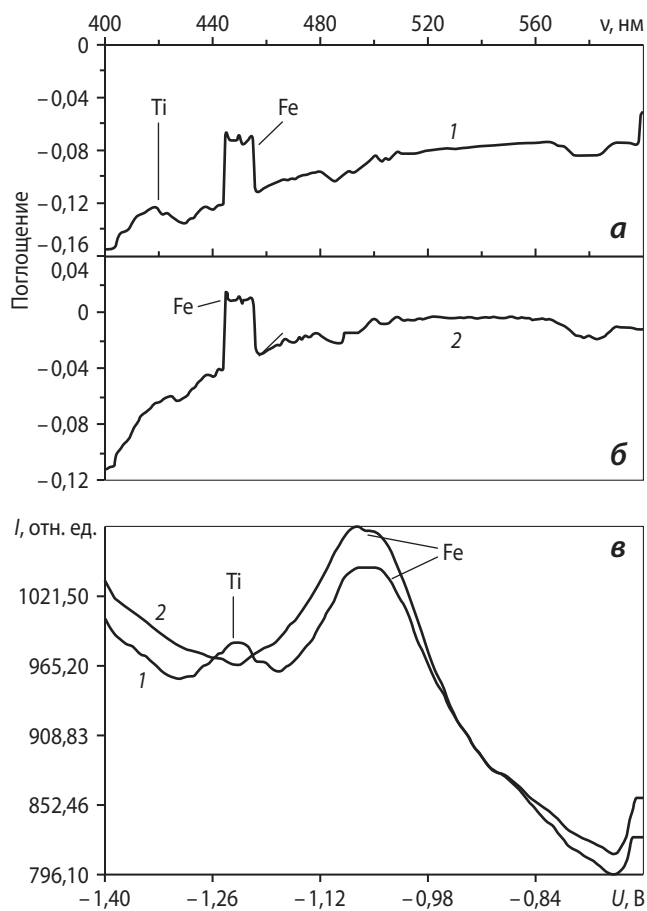
сле испытаний валков элементный анализ поверхностного слоя ручья установит наличие титана, это может свидетельствовать о присутствии карбида титана, т. е. сохранении покрытия. Элементный состав поверхности ручья исследовали методами спектрофотометрии и инверсионной вольтамперометрии.



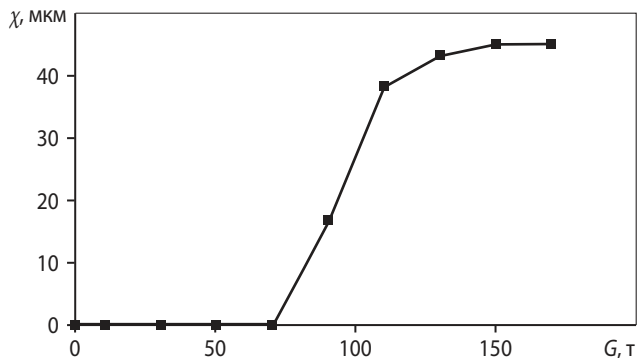
**Рис. 6.** Структура ЭИЛ-покрытия (подложка – белый чугуи)  
**а** – общий вид покрытия  
**б** – распределение титана в поверхностном слое покрытия

На графике спектра поглощения пробы упрочненного калибра (рис. 7, а) установлены два пика – один при длине волны  $\nu = 418 \div 420$  нм (соответствует спектру поглощения титана), а другой, более широкий, при  $\nu = 445 \div 455$  нм (принадлежит железу). На спектре поглощения пробы контрольного калибра (без покрытия) наблюдается только пик, соответствующий железу ( $\nu = 445 \div 455$  нм) (см. рис. 7, б). На графике вольтамперометрического анализа пробы первого образца обнаружено два пика накопления при  $U = -1,208$  В (титан) и  $U = -1,0$  В (железо), а на кривой контрольной пробы заметен только пик накопления железа (см. рис. 7, в) [13].

Таким образом, на поверхности выступов сохранилось электроискровое покрытие. Причем выступы на поверхности ручья наблюдаются только на площади, полученной при большем времени обработки ( $5 \text{ мин/см}^2$ ). Поэтому рост производительности ЭИЛ с 3 до  $5 \text{ мин/см}^2$  способствует увеличению износостойкости покрытий.



**Рис. 7.** Результаты химического анализа поверхности ручья методами спектрофотометрии (а, б) и инверсионной вольтамперометрии (в)  
**1** – проба упрочненного калибра  
**2** – контрольная проба калибра без покрытия



**Рис. 8.** Зависимость изменения средней глубины дефекта от количества прокатанной продукции

Минимальное значение стойкости ( $\eta$ ) покрытия с исходной толщиной  $\lambda = 40$  мкм на поверхности выступов рассчитываем следующим образом:

$$\eta = \lambda / G, \quad (6)$$

где  $G$  – масса прокатанного в калибре металла, т.

Учитывая, что поле допуска на прокат по ГОСТ 2590-88 составляет 900 мкм, а допустимый износ калибра (двух валков) – половину допуска, нормативный показатель стойкости поверхности калибра не превышает 225 мкм на 350 т ( $0,64 \text{ мкм/т}$ ).

Покрытие толщиной 40 мкм на большей части поверхности калибра полностью износилось в интервале 80–100 т проката. Минимальная стойкость покрытия (время обработки  $3 \text{ мин/см}^2$ ) оценивается как  $\eta_{\text{min}} = 0,4 \div 0,5 \text{ мкм/т}$ .

Максимальная стойкость такого же по толщине покрытия, нанесенного при большем времени обработки ( $5 \text{ мин/см}^2$ ), после проката 160 т составляет  $0,25 \text{ мкм/т}$ , что в 2,5 раза превышает стойкость материала валка и в 1,6–2,0 раза – стойкость покрытия, сформированного при неоптимальном времени упрочнения ( $3 \text{ мин/см}^2$ ).

Зависимость глубины отпечатка, характеризующего износостойкость покрытия, от количества проката приведена на рис. 8. Увеличение интенсивности износа после проката 110,5 т объясняется меньшей стойкостью зоны термического влияния по сравнению со стойкостью покрытия.

## ВЫВОДЫ

**1.** Показана перспективность применения технологии электроискрового легирования для обработки прокатных валков. Использование электродов марки СТИМ-40НА при упрочнении поверхности валков сортопрокатных станков способствует повышению износостойкости до 2,5 раз.



2. Для практического применения ЭИЛ-технологии для упрочнения прокатных валков необходимо установить оптимальный частотно-энергетический режим обработки, оптимизировать время легирования, а также механизировать (автоматизировать) процесс обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В. К., Шилов В. А., Инарович Ю. В. Калибровка прокатных валков. М.: Металлургия, 1987.
2. Иванов Г. П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М.: Машгиз, 1961.
3. Левашов Е. А., Кудряшов А. Е., Швейко А. Н. и др. // Цв. металлы. 2003. № 6. С. 73.
4. Кудряшов А. Е., Левашов Е. А., Аксенов Л. Б., Петров В. М. // Металлург. 2010. № 8. С. 44.
5. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я. и др. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985.
6. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Прядко Л. Ф., Егоров Ф. Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М.: Наука, 1988.
7. Левашов Е. А., Рогачев А. С., Курбаткина В. В. и др. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: Учеб. пос. М.: МИСиС, 2011.
8. Погожев Ю. С., Левашов Е. А., Кудряшов А. Е. и др. // Цв. металлы. 2005. № 1. С. 59.
9. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС, 1994.
10. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977.
11. Шелехов Е. В., Свиридова Т. А. // Металловедение и терм. обраб. металлов. 2000. № 8. С. 16.
12. Коваленко В. С. Металлографические реактивы: Справ. изд. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1981.
13. Марченко З., Бальцежак М. Методы спектрофотометрии в УФ и видимой областях в неорганическом анализе / Пер. с пол. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007 (Методы в химии).

Издательский Дом МИСиС представляет:

## Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

### Учебное пособие

**Авторы:** Е. А. Левашов, А. С. Рогачев, В. В. Курбаткина, Ю. М. Максимов, В. И. Юхвид  
М.: ИД МИСиС, 2011. – 377 с. ISBN 978-5-87623-463-6

Рассмотрены общие и специальные вопросы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) как способа получения неорганических соединений и композиционных материалов. Изложены теоретические основы СВС, закономерности и механизмы горения и структурообразования в СВС-системах. Изучены термодинамические и кинетические аспекты взаимодействия компонентов при синтезе новых материалов в режиме горения. Представлены данные об основных технологических типах процессов производства порошков неорганических соединений, керамических материалов и изделий, новых композиционных материалов, литых тугоплавких соединений, о методах нанесения покрытий. Приведены сведения о структуре, свойствах и применении новых композиционных материалов. Уделено внимание лабораторным установкам для экспериментального исследования процессов СВС и оборудованию для промышленной реализации СВС-технологий.

Учебное пособие рассчитано на студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150100 «Металлургия», а также на исследователей, инженеров и технологов в области порошковой металлургии, высокотемпературных материалов, керамических композиционных материалов, огнеупоров, ферросплавов и лигатур, материалов для электроники, химической промышленности и др.

Данное издание посвящено 80-летию акад. А. Г. Мержанова – выдающегося ученого в области физики горения и взрыва, основоположника метода СВС.

♦ ♦ ♦ ♦

Пособие можно купить в книжном павильоне Издательского Дома МИСиС по адресу:

**Москва, Ленинский пр-т, 4**, главный корпус МИСиС, цокольный этаж; тел.: **(495) 638-44-12**.

Для приобретения издания по безналичному расчету необходимо предварительно оформить заказ по электронной почте: **alek-drovna@yandex.ru** (справки по тел.: **(495) 638-44-28**).