

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.793.09

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-8-4-12

А.В. Макаров, А.П. Титова, А.Н. Афонин, А.Е. Кудряшов, А.А. Владимиров

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ, УПРОЧНЕННЫХ СВС-ЭЛЕКТРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Применено поверхностное пластическое деформирование выглаживанием с целью снижения шероховатости поверхностей деталей сортовых прокатных сталей, упрочненных синтетическими твердыми инструментальными СВС-электродными материалами на основе диборида титана и карбида титана. Проведен сравнительный анализ характеристик покрытий (толщина, сплошность, шероховатость, микротвердость), сформированных методом

электроискрового легирования до выглаживания и после. Установлено, что выглаживание способствует снижению шероховатости поверхностных слоев от 3 до 5,5 раз для различных марок СВС-электродных материалов.

Ключевые слова: ролики, электроискровое легирование, поверхностное пластическое деформирование, выглаживание, микротвердость, шероховатость, СВС-электродные материалы.

A.V. Makarov, A.P. Titova, A.N. Afonin, A.E. Kudryashov, A.A. Vladimirov

OUTLOOKS IN SURFACE PLASTIC DEFORMATION USE TO DECREASE SURFACE ROUGHNESS IN ROLLING MILL PARTS STRENGTHENED WITH SVS-ELECTRODE MATERIALS

The purpose of this work consists in ensuring the required quality of micro-geometry and mechanical characteristics of a surface layer in rolling mill parts, in particular, surface roughness no more than $Ra=2.5\text{mkm}$ and micro-hardness no less than 900 kgs/mm^2 .

To ensure such micro-hardness in samples of 60HN steel there were applied coatings

With the method of electrospark alloying with the use as an electrode synthetic hard tool materials based on titanium diboride (STIM-11) and titanium carbide (STIM-40NA) made by the method of self-propagating high-temperature synthesis. EIL-coatings made of these materials are characterized with the thickness of 30mkm , micro-hardness up to 980 kgs/mm^2 , that exceeds four times micro-hardness of a non-hardened sample, and with roughness $Ra=5\dots 10\text{mkm}$.

To decrease roughness of EIL-coatings made of STIM materials for the first time there was used sur-

face plastic deformation with smoothing that is a novelty of this investigation. Smoothing was carried out on a screw-cutting lathe with the aid of a flattener with TC6 tungsten-cobalt hard alloy indenter ($r=6\text{mm}$) at the rotational frequency $n=70\text{rev/min}$ and at the indenter longitudinal feed $S=0.05\text{mm/rev}$ and the smoothing force $P=500\text{N}$. As a result of smoothing the micro-hardness of surface layers made 990 kgs/mm^2 , and roughness – $Ra=1.6\dots 1.8\text{mkm}$.

Conclusion: smoothing contributes to the decrease of surface layer roughness from 3 times (STIM-40NA) to 5.5 times (STIM-11) at the conservation of their mechanical characteristics that proves the outlook in use of such a technology for finishing parts surfaces strengthened with SVS-electrode materials by STIM method of electrospark alloying.

Key words: rollers, electrospark alloying, surface plastic deformation, smoothing, micro-hardness, roughness, SVS-electrode materials.

Введение

Детали прокатных сортовых станов (детали привалковой арматуры, различные ролики, валки и др.) являются ответственными деталями, эксплуатационные характеристики которых во многом влияют на производительность труда, на качество и

себестоимость выпускаемой продукции. Эти детали работают при высоких температурных и механических нагрузках. Увеличение износостойкости деталей прокатных станов является актуальной научно-технической задачей.

Для упрочнения деталей прокатных станов перспективно использование синтетических твердых инструментальных материалов (СТИМ), разработанных в НИТУ «МИСиС» и изготовленных методом СВС-компактирования (СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез) [1], что было подтверждено результатами промышленных испытаний на АО «Оскольском электрометаллургическом комбинате», которые показали увеличение стойкости калибров прокатных валков, упрочненных материалами на основе диборида титана СТИМ-11 ($TiB_2 - NiAl$) и на основе карбида титана СТИМ-40НА ($TiC - NiAl$), более чем в 2 раза [2], а упрочненных материалами СТИМ-11ОКн ($TiB_2 - NiAl + ZrO_2^{nano}$) и СТИМ-40НАОКн ($TiC - NiAl + ZrO_2^{nano}$) – в 8 раз [3, 4].

Для осуществления электроискрового легирования (ЭИЛ) производится сближение инструмента (анода) и заготовки (катода), при этом между ними увеличивается напряженность электрического тока и возникает импульсный искровой разряд, в результате которого сфокусированный поток электронов от катода устремляется к

аноду. Выделившаяся в поверхностных слоях анода энергия движения остановленных электронов броском освобождается системой, что приводит к локальному расплавлению и частичному испарению материала инструмента. Расплавленные частицы анода, достигнув поверхности катода, привариваются и частично внедряются в нее. Далее происходит механический удар анода, способствующий увеличению однородности и плотности покрытия.

С поверхности катода тоже происходит выброс металла и образуется эрозионная лунка с выступающим над поверхностью заготовки бортиком, образованным в результате вытеснения из расплавленной зоны металла (рис. 1). Поверхностный слой катода, после легирования, преимущественно состоит из материала анода, так как количество жидкой фазы на аноде значительно больше, чем на катоде. Но гидродинамическое перемешивание способствует тому, что в этом слое в ряде случаев в достаточно большом количестве (20-30 %) распределяется и материал катода [5, 6].

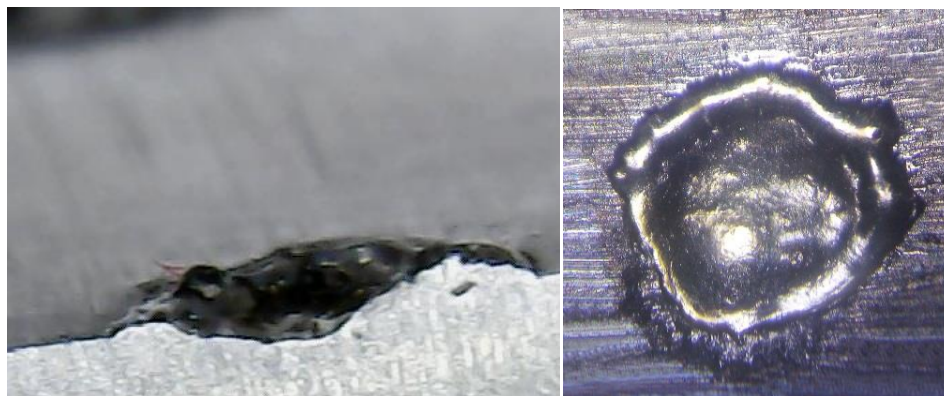


Рис. 1. Внешний вид лунки, образованной на заготовке в результате единичного искрового электрического разряда

Технология ЭИЛ позволяет получать покрытия с высокой адгезией. Метод характеризуется низкой энергоемкостью, простотой реализации и оборудования. К недостаткам можно отнести низкую производительность процесса и ограниченность толщины полученных покрытий.

При повышенных требованиях к микрогеометрии поверхностей деталей

прокатных станов, шероховатость поверхностей деталей, упрочненных методом ЭИЛ, является в ряде случаев недостаточной. В этой связи задача снижения шероховатости поверхности сформированных покрытий является актуальной.

На величину шероховатости ЭИЛ-покрытий влияют частотно-энергетические параметры и время обработки, состав

электродных материалов, а также кинематика движения рабочего инструмента.

Для снижения шероховатости ЭИЛ-покрытий применяют шлифование, полирование, притирку, поверхностное пластическое деформирование (ППД) (выглаживание [7], безабразивная ультразвуковая финишная обработка [8]), лазерная обработка.

Большинство методов механической обработки не применимы для снижения шероховатости ЭИЛ-покрытий, так как их толщины 0,01-0,05 мм меньше или сопоставимы с минимальным технологическим припуском на механическую обработку. Для уменьшения шероховатости упрочненных поверхностей было решено применить один из видов ППД-выглаживание с помощью твердосплавного индентора. Данный способ ранее использовали для снижения шероховатости ЭИЛ-покрытий на титане [9, 10].

Методика исследований

В качестве электродов (анода) для электроискровой обработки применяли СВС-электродные материалы на основе

При выглаживании в месте контакта индентора с обрабатываемой поверхностью возникают значительные контактные напряжения. При достаточном усилии выглаживание приводит к пластической деформации поверхностного слоя, способствующей сминанию микронеровностей и изменению его физико-механических свойств. На выглаженной поверхности возникают значительные остаточные напряжения сжатия, благодаря которым повышаются ее износостойкость и усталостная прочность [10].

В данной работе производилось выглаживание электроискровых покрытий, сформированных синтетическими твердыми инструментальными материалами на стали 60ХН, с целью определения перспектив применения ППД для снижения шероховатости поверхности таких покрытий. Для этого изучались микрорельеф и свойства покрытий до и после ППД.

диборида титана СТИМ-11 и на основе карбида титана СТИМ-40НА (табл. 1).

Таблица 1

Применяемые электродные материалы

Марка материала (ТУ 24.45.30-027-11301236-2019)	Состав шихты, % (масс.)				
	Ti	B	C	Ni	Al
СТИМ-11 (TiB ₂ -NiAl)	41,4	18,6	–	27,4	12,6
СТИМ-40НА (TiC-NiAl)	48,0	–	12,0	27,4	12,6

В качестве катода применяли образцы диаметром 50 мм и длиной 250 мм из стали 60ХН в состоянии поставки.

Для нанесения электроискровых покрытий использовалась установка для электроискрового легирования *ALIER-METALG53*. Покрытия формировались на частотно-энергетическом режиме обработки, характеризующемся энергией единичных импульсных разрядов 0,175 Дж. Скорость нанесения ЭИЛ-покрытий составляла 3 мин/см².

Поверхностное пластическое деформирование (выглаживание) проводилось на токарно-винторезном станке *JETGHB-1340ADRO* выглаживателем с индентором ($r = 6$ мм) из вольфрамокобальтового твер-

дого сплава ВК6 на следующих технологических режимах: частота вращения заготовки $n = 70$ об/мин, продольная подача индентора $S = 0,05$ мм/об, сила выглаживания, направленная по нормали к обрабатываемой поверхности, составляла $P = 500$ Н. Значение силы выглаживания было определено на основе предыдущих исследований. Сила выглаживания регулировалась по диаграмме нагружения пружины, путем перемещения поперечного суппорта с резцедержателем, в котором был установлен выглаживатель, пружина деформировалась на величину, необходимую для получения требуемой силы выглаживания. Для снижения коэффициента трения в зоне контакта индентора с обра-

батываемой поверхностью использовалось масло индустриальное И20.

Общий вид процесса выглаживания представлен на рис. 2.

С целью определения и оценки влияния температур, возникающих в зоне выглаживания, проводилась съемка тепловизором *SDS HotFind-DXT*.

Металлографический анализ шлифов с ЭИЛ-покрытиями выполнялся на металлографическом микроскопе 4ХС. Определение толщины и сплошности покрытий

проводился при увеличении 400^x.

Шероховатость покрытий измерялась профилометром TR 200 на базовой длине 2,5 мм (длина оценки $5l_6 = 12,5$ мм) и оценивалась по параметру *Ra* (среднеарифметическое отклонение профиля).

Исследования микротвердости образцов с электроискровыми покрытиями до и после выглаживания проводились на микротвердомере МЕТОЛАБ 502 при нагрузке 0,1 кгс по ГОСТ Р ИСО 6507-1.

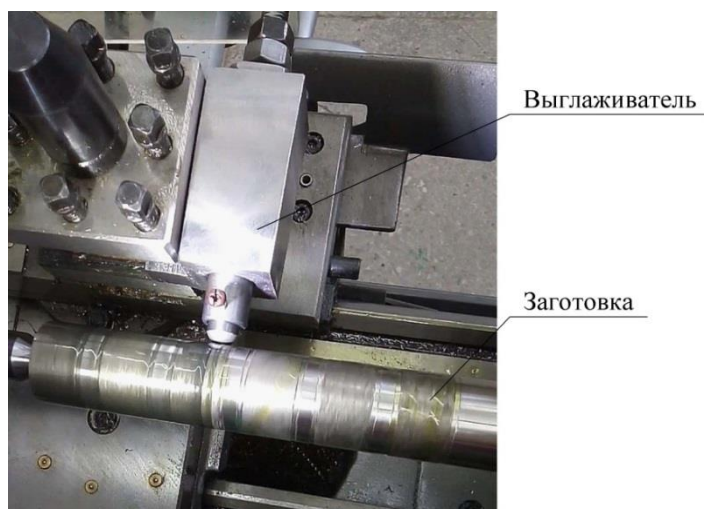


Рис. 2. Общий вид процесса выглаживания образца с ЭИЛ-покрытиями

Обсуждение результатов исследований

На рис. 3 приведена структура электроискрового покрытия (шлиф), сформированного при применении СВС-электрода СТИМ-11. В результате ЭИЛ-обработки на

поверхности образца из стали 60ХН сформировался поверхностный слой со 100%-ной сплошностью толщиной ~30 мкм.

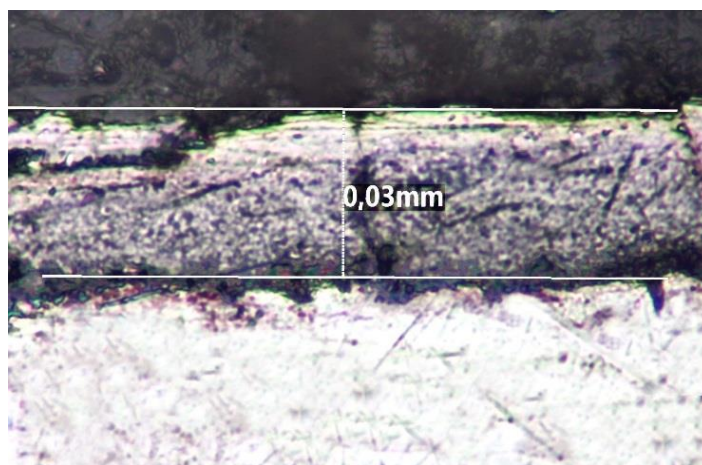


Рис. 3. Структура образца из стали 60ХН с ЭИЛ-покрытием до выглаживания (увеличение x400)

Тепловизионная съемка показала, что температура в зоне выглаживания электроискрового покрытия твердосплавным индентором находится в диапазоне 36...42 °С (рис. 4) и не может приводить к фазовым превращениям в поверхностном слое обрабатываемого материала.

В табл. 2 представлены результаты измерения шероховатости поверхностного слоя и его микротвердости до и после ППД выглаживанием.

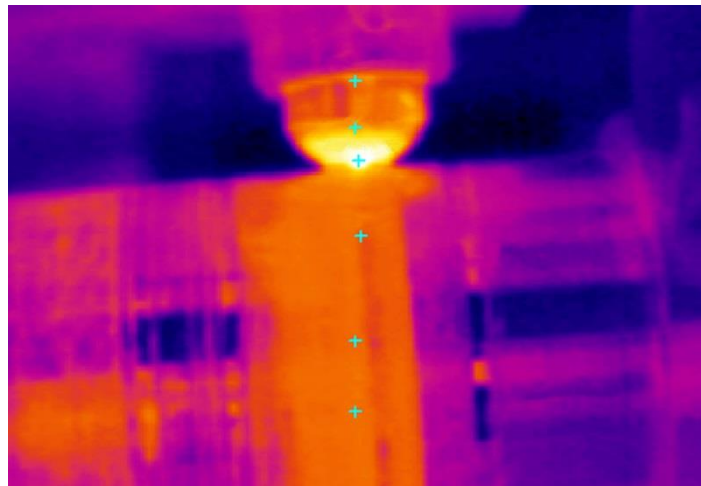


Рис. 4. Результаты измерения температур в зоне выглаживания

Таблица 2

Свойства электроискровых покрытий. Подложка сталь 60ХН

Электродный материал	Состояние поверхности	Сплошность, %	Толщина, мкм	Ra, мкм	Микротвердость* HV 0,1, кгс/мм ²
СТИМ-11	до выглаживания	до 100	≈30	9,18	978,2
	после выглаживания	до 100	≈30	1,67	998,3
СТИМ-40НА	до выглаживания	до 100	≈30	5,42	963,5
	после выглаживания	до 100	≈30	1,81	990,5

* – микротвердость образца из стали 60ХН – 270 кгс/мм²

Выявлено, что шероховатость поверхности сформированных на стали 60ХН покрытий не превышает $Ra = 9,18$ мкм. Покрытия на основе карбида титана характеризуются меньшей шероховатостью по сравнению с покрытием на основе диборида титана.

Применение ППД выглаживанием способствует снижению шероховатости поверхностного слоя более чем в 3 раза. После проведения ППД минимальной шероховатостью поверхности характеризуется покрытие из СТИМ-11 ($Ra = 1,67$ мкм).

Профилограммы поверхностного слоя, полученные при измерении шероховатости поверхности ЭИЛ-покрытий СВС-сплавами СТИМ-11 и СТИМ-40НА до и

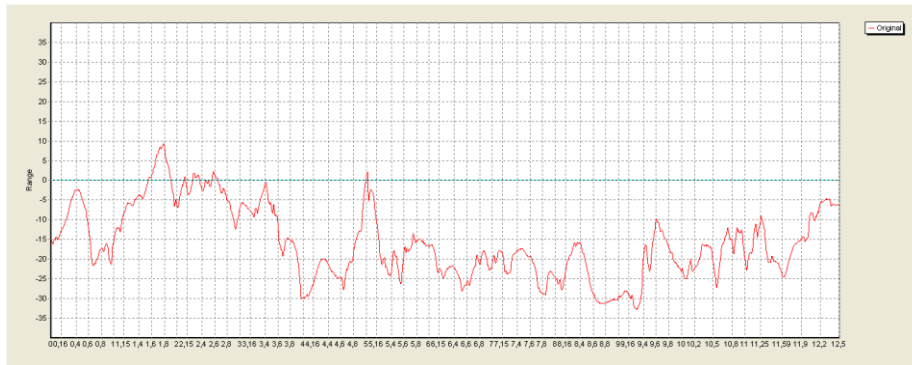
после выглаживания, приведены на рис. 5 и 6.

Стоит также отметить, что диаметр заготовки после ЭИЛ составил 50,06 мм, а после ППД – уменьшился на 0,06 мм, то есть диаметральный размер вернулся к изначальному значению 50 мм.

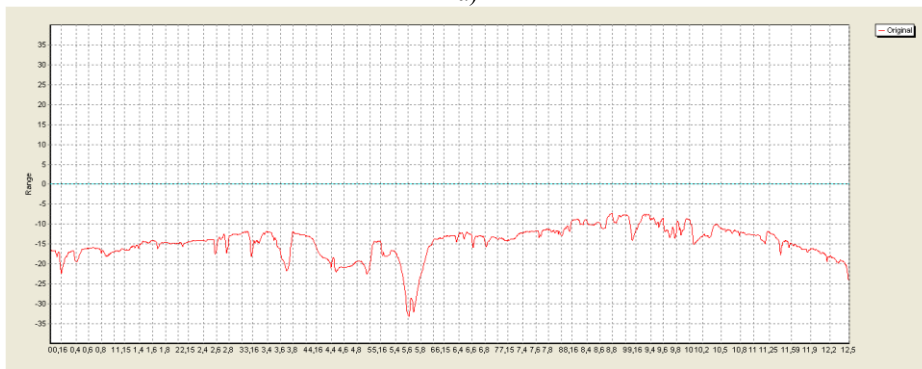
Сформированные в результате ЭИЛ-обработки покрытия характеризуются микротвердостью до 980 кгс/мм² (табл. 2), что в 4 раза превышает микротвердость образца из стали 60ХН. На рис. 7 показано изменение величины микротвердости в поперечном слое образца. Под ЭИЛ-покрытием наблюдается зона упрочнения, где значения микротвердости в 2 раза превышают значения микротвердости основного материала.

После выглаживания микротвердость покрытий увеличилась и составила 998,3 кгс/мм² для покрытия из электродного ма-

териала СТИМ-11 и 990,5 кгс/мм² для покрытия из СТИМ-40НА.

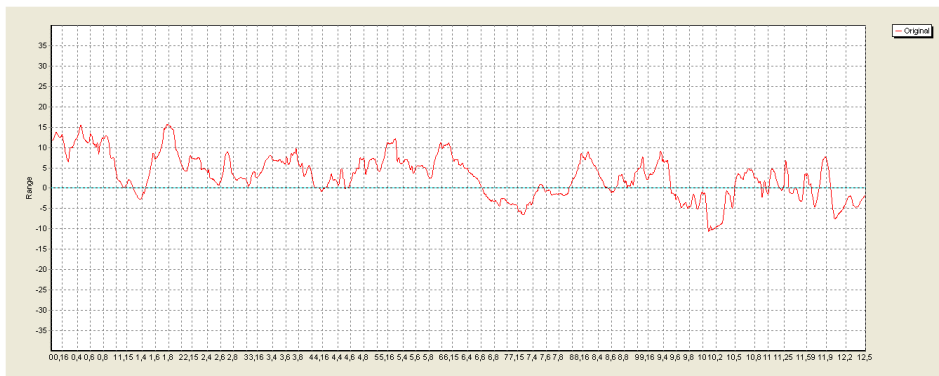


а)

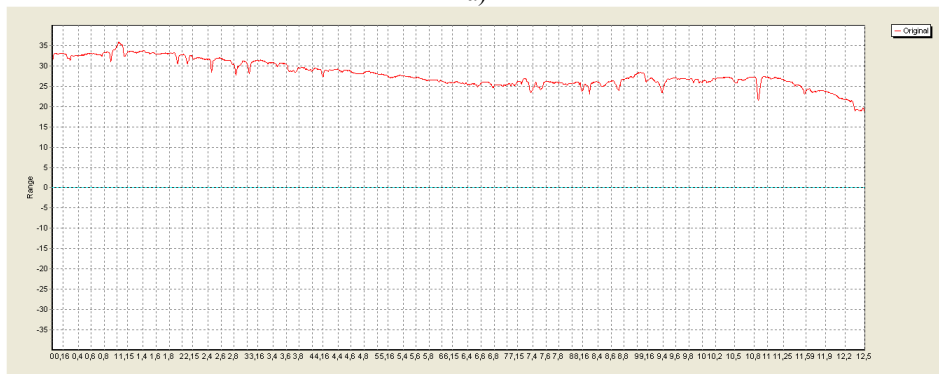


б)

Рис. 5. Профилограмма поверхностного слоя. Электродный материал СТИМ-11: а – до выглаживания; б – после выглаживания



а)



б)

Рис. 6. Профилограмма поверхностного слоя. Электродный материал СТИМ-40НА: а – до выглаживания; б – после выглаживания

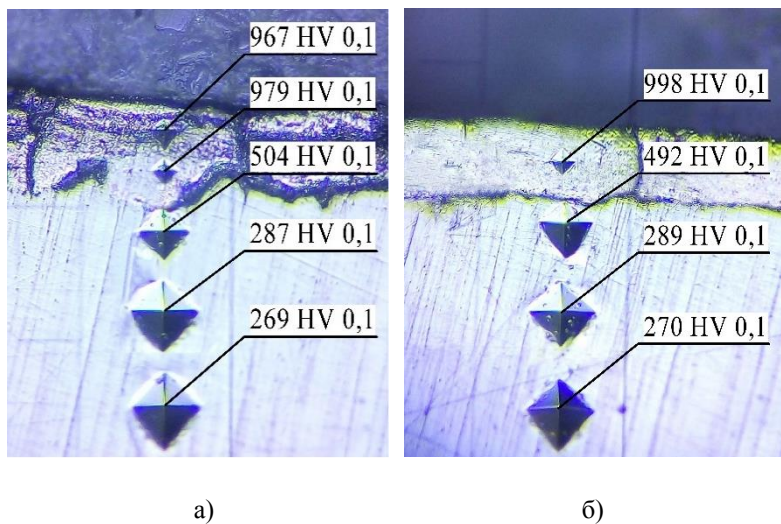


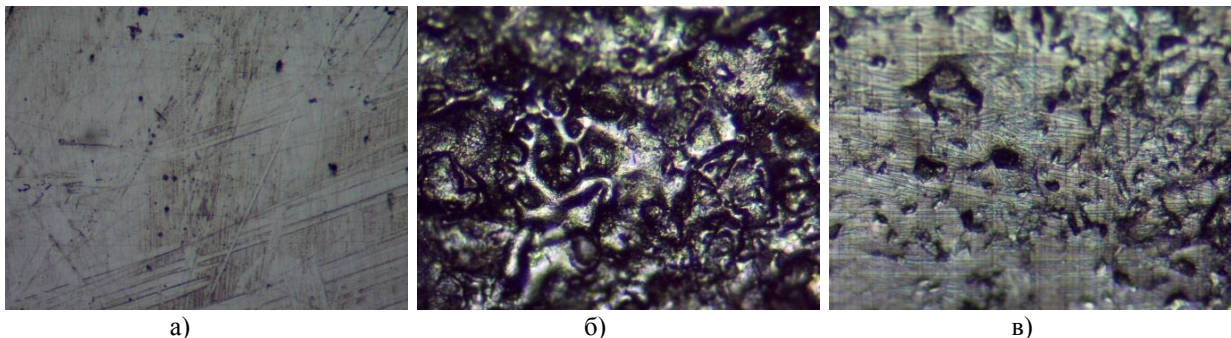
Рис. 7. Изучение микротвердости в различных зонах образца.

Электродный материал СТИМ-11:

а – до выглаживания; б – после выглаживания

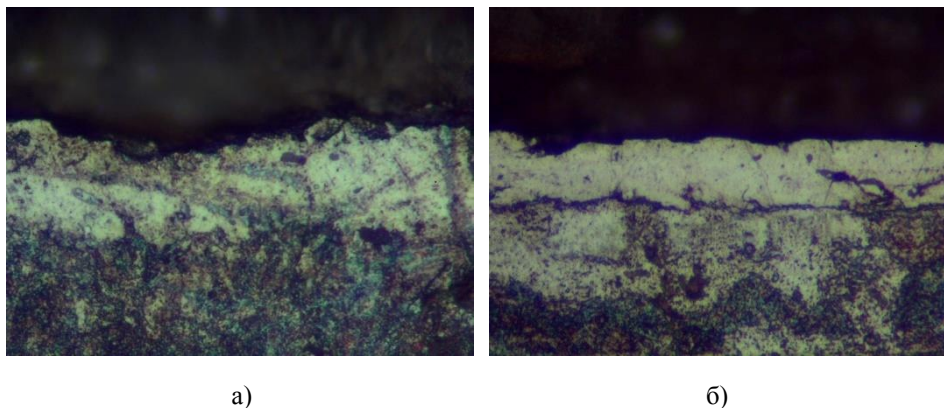
При выглаживании индентор взаимодействует как с непосредственно твердосплавными составляющими покрытия, так и с участками «смешанного состава», образованными за счет гидродинамического перемешивания материалов анода и катода

[5]. В итоге деформирующих усилий для выглаживания твердого сплава недостаточно, его отдельные вершины отламываются, а места смешанных зон хорошо поддаются деформации и вдавливаются в более мягкую подложку (рис. 8, 9).

Рис. 8. Структура поверхности образцов. Электродный материал СТИМ-40НА (увеличение $\times 100$):

а – образец без покрытия; б – образец с ЭИЛ-покрытием;

в – образец с ЭИЛ-покрытием после выглаживания

Рис. 9. Структура ЭИЛ-покрытия. Электродный материал СТИМ-11 (увеличение $\times 400$):

а – до выглаживания; б – после выглаживания

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что сформированные СВС-электродными материалами СТИМ-11 и СТИМ-40НА на образцах из стали 60ХН покрытия характеризуются толщиной до 30 мкм, микротвердостью 978,2 кгс/мм² и 963,5 кгс/мм², шероховатостью (параметр *Ra*) 9,18 мкм и 5,42 мкм, соответственно.

2. Выявлено, что применение ППД способствует снижению шероховатости поверхностных слоев от 3 раз (СТИМ-40НА) до 5,5 раз (СТИМ-11). Максимальное уменьшение шероховатости установлено у диборидных покрытий.

3. В результате ППД микротвердость поверхностных слоев увеличивается соответственно до 998,3 кгс/мм² для покрытия на основе диборида титана и до 990,5 кгс/мм² для покрытия на основе карбида титана.

4. Показана перспективность применения ППД выглаживанием для снижения шероховатости упрочненных СВС-электродными материалами поверхностей деталей металлургического оборудования (прокатные валки, ролики МНЛЗ, ролики рольгангов и привалковой арматуры).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В. [и др.]. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Изд. дом МИСиС, 2011. 377 с.
- Кудряшов А.Е., Доронин О.Н., Замулаева Е.И. [и др.]. Перспективы применения электродных СВС-материалов и технологии электроискрового легирования для упрочнения прокатных валков // Черные металлы. 2013. № 10. С. 61-68.
- Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Репников Н.И., Макаров А.В. Перспективы применения технологии электроискрового легирования и СВС-электродных материалов для повышения стойкости прокатных валков // Нанотехнологии: наука и производство. 2018. № 2. С. 63-66.
- Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Levashov E.A., F.V Application of electrospark deposition and modified shs electrode materials to improve the endurance of hot mill rolls. Part 2. Structure and properties of the formed coatings / A.E. Kudryashov, E.I. Zamulaeva, E.A. Levashov, Kiryukhantsev-Korneev F.V., Sheveiko A.N., Shvyndina N.V. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2019. T.55. № 5. С. 502-513.
- Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
- Пячин С.А., Заводинский В.Г., Пугачевский М.А. Перенос металлов с анода на катод при электроискровом воздействии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 11 (35). С. 7-13.
- Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Титова А.П., Владимиров А.А. Перспективы обработки выглаживанием калибров прокатных валков, упрочненных твердосплавными СВС-электродными материалами // Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции. Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2019. С. 263-272.
- Химухин С.Н., Еремина К.П., Ри Х. [и др.]. Поверхностное пластическое деформирование электроискровых покрытий // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т.1. № 2 (26). С. 76-81.
- Гадалов В.Н., Алехин Ю.Г., Скрипкина Ю.В. [и др.]. Электроискровые покрытия, подвергнутые выглаживанию минералокерамикой // Технологии машиностроения. 2008. № 11. С. 19-23.
- Гадалов В.Н., Романенко Д.Н., Самойлов В.В. Методика оценки шероховатости поверхности электроискрового покрытия после выглаживания минералокерамикой // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2010. № 4. С. 44-46.
- Levashov E.A., Rogachyov A.S., Kurbatkina V.V. [et al.]. Promising Materials and Technologies of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. M.: MIS&S Publishing House, 2011. pp. 377.
- Kudryashov A.E., Doronin O.N., Zamulayeva E.I. [et al.]. Outlooks in use of electrode SVS-materials and electrospark alloying for rolling-mill roller strengthening // *Ferrous Materials*. 2013. No.10. pp. 61-68.
- Kudryashov A.E., Levashov E.A., Repnikov N.I., Makarov A.V. Outlooks in use of electrospark alloying and SVS-electrode materials for rolling-mill roller strength increase // *Nano-Technologies: Science and Production*. 2018. No.2. pp. 63-66.
- Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Levashov E.A., F.V Application of electrospark deposition and modified shs electrode materials to improve the endurance of hot mill rolls. Part 2. Structure and properties of the formed coatings / A.E. Kudryashov, E.I. Zamulaeva, E.A. Levashov, Kiryukhantsev-Korneev F.V., Sheveiko A.N., Shvyndina N.V. //

- Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2019. T.55. № 5. С. 502-513.
5. Gitlevich A.E., Michailov V.V., Parkansky N.Ya., Revutsky V.M. *Metal Surface Electrospark Alloying*. Kishinyov: Shtiintsa, 1985. pp. 196.
 6. Pyachin S.A., Zavodinsky V.G., Pugachevsky M.A. Metal transfer from anode to cathode during electrospark impact // *Strengthening Technologies and Coatings*. 2007. No.11 (35). pp. 7-13.
 7. Makarov A.V., Kudryashov A.E., Titova A.P., Vladimirov A.A. Outlooks in smoothing roller passes strengthened with hard-alloy SVS-electrode materials // *Proceedings of the XVI-th All-Russian Scientific-Practical Conf. Stary Oskol: STI NITU "MIS&S"*, 2019. pp. 263-272.
 8. Khimukhin S.N., Yeryomina K.P., Ree H. [et al.]. Surface plastic deformation of electrospark surfaces // *Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University*. 2016. Vol.1. No.2 (26). pp. 76-81.
 9. Gadalov V.N., Alyokhin Yu.G., Skripkina Yu.V. [et al.]. Electrospark coatings subjected to smoothing with mineral-ceramics // *Mechanical Engineering*. 2008. No.11. pp. 19-23.
 10. Gadalov V.N., Romanenko D.N., Samoilo V.V. Estimate procedure of electrospark coating surface roughness after smoothing with mineral-ceramics // *College Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2010. No.4. pp. 44-46.

Ссылка для цитирования:

Макаров А.В., Титова А.П., Афонин А.Н., Кудряшов А.Е., Владимиров А.А. Перспективы применения поверхностного пластического деформирования для снижения шероховатости поверхностей деталей прокатных станов, упрочненных СВС-электродными материалами // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 8. С. 4 - 12. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-8-4-12.

Статья поступила в редакцию 10.03.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Белгородского государственного технического университета им. В.Г. Шухова

Дуюн Т.А.

Статья принята к публикации 22.07.20.

Сведения об авторах:

Макаров Алексей Владимирович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Технология и оборудование в металлургии и машиностроении», Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», тел. +7-952-435-90-10, e-mail: tomm_sti_misis@mail.ru.

Титова Анна Павловна, ст. преподаватель кафедры «Технология и оборудование в металлургии и машиностроении», Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», тел. +7-919-436-51-66, e-mail: tomm_sti_misis@mail.ru.

Афонин Андрей Николаевич, д.т.н., профессор кафедры «Технология и оборудование в металлургии и машиностроении», Старооскольский техно-

Makarov Alexey Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Head of the Dep. "Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering", Ugarov Technological Institute of Stary Oskol" (Branch) of National Research Technological University "MIS&S", phone: +7-952-435-80-10, e-mail: tomm_sti_misis@mail.ru.

Titova Anna Pavlova, Senior lecturer of the Dep. "Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering", Ugarov Technological Institute of Stary Oskol" (Branch) of National Research Technological University "MIS&S", phone: + 7-919-436-51-66, e-mail: tomm_sti_misis@mail.ru.

Afonin Andrey Nikolayevich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering", Ugarov Technological

логический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», тел. +7-953-619-18-21, e-mail: aanru@yandex.ru

Кудряшов Александр Евгеньевич, к.т.н., вед. науч. сотрудник НУЦ СВС, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», тел.: +7-916-186-92-34, e-mail: aekudr@yandex.ru.

Владимиров Александр Андреевич, к.т.н., ассистент кафедры «Технология и оборудование в металлургии и машиностроении», Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», тел. +7-920-560-51-85, e-mail: tomm_sti_misis@mail.ru.

Institute of Stary Oskol" (Branch) of National Research Technological University "MIS&S", phone: + 7-953-619-18-21, e-mail: aanru@yandex.ru

Kudryashov Alexander Evgenievich, Can. Sc. Tech., Leading scientific assistant NUC SVS, National Research Technological University "MIS&S", phone: +7-916-186-92-34, e-mail: aekudr@yandex.ru.

Vladimirov Alexander Andreevich, Can. Sc. Tech., Assistant of the Dep. "Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering", Ugarov Technological Institute of Stary Oskol" (Branch) of National Research Technological University "MIS&S", phone: + 7-920-560-51-85, e-mail: tomm_sti_misis@mail.ru.