

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_115

УДК 621.9.047:669:538.8

В. М. ШЕМЕНКОВ¹, канд. техн. наук, доц.

М. А. РАБЫКО¹

В. В. ШЕМЕНКОВ²

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ПРИКАТОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 4Х4ВМФС

Аннотация

Представлены результаты исследования микротвердости, износостойкости, структуры и фазового состава образцов из штамповой стали 4Х4ВМФС после классической закалки и подвергнувшейся обработке тлеющим разрядом как с магнитным полем, так и без него.

Ключевые слова:

тлеющий разряд, микротвердость, износостойкость, структура, фазовый состав, модифицирующая обработка, поверхностный слой, сталь.

Для цитирования:

Шеменков, В. М. Влияние прикатодного магнитного поля на эффективность процесса упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали 4Х4ВМФС / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, В. В. Шеменков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 115–125.

Введение

Штамповые стали для горячей обработки давлением, такие как сталь 4Х4ВМФС и ее заменители, предназначены для работы в условиях интенсивного ударного и термоциклического нагружения. От них требуется сложный, иногда взаимоисключающий, комплекс эксплуатационных и технологических свойств, таких как прочность, износостойкость, вязкость и прокаливаемость, а также теплостойкость, окалиностойкость и разгаростойкость.

Благодаря комплексному легированию вольфрамом и молибденом сталь 4Х4ВМФС имеет более высокую вязкость, что способствует повышению разгаростойкости и теплостойкости до 600 °С.

Сталь близка по составу и видам превращений при термической обработке к быстрорежущим сталям, однако

является доэвтектоидной с меньшим содержанием карбидов типа $M_{23}C_6$ и M_6C . Хром в составе стали обеспечивает достаточно хорошую окалино- и износостойкость.

Сталь 4Х4ВМФС – одна из основных сталей в отечественной промышленности при изготовлении пресс-форм литья под давлением и штамповой оснастки, испытывающих периодический нагрев, охлаждение поверхности и объемное воздействие нагретого металла.

Представлены результаты исследований, которые являются логическим продолжением ранее опубликованной работы авторов [4].

Целью данной работы являлось изучение влияния прикатодного магнитного поля на степень упрочнения образцов, изготовленных из штамповой стали 4Х4ВМФС, их износостойкость и структурно-фазовое состояние в поверхностном слое.

В рамках работы исследования проводились на образцах размером $10 \times 20 \times 10$ мм из стали 4Х4ВМФС ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки, прошедших классическую термическую обработку, заключающуюся в закалке с 1130 °С на масло с последующим отпуском при 550 °С в течение 2 ч, что, как правило, для данной стали приводит к выделению высокодисперсных карбидов [1].

Методика исследования

В работе применялись растровая электронная микроскопия и рентгеновский структурный анализ для исследования структуры и фазового состава стали. Для определения твердости поверхностного слоя использовался дюрометрический метод по Виккерсу, износостойкость определялась по принципу сухого трения образца и контртела. Методика проведения указанных исследований

аналогична методике, описанной в [2, 3].

Для определения глубины упрочненного слоя образцы подвергались разрезанию по плоскости, перпендикулярной упрочняемой поверхности (плоскость разреза).

Обработка образцов тлеющим разрядом так же, как и в [2–4], осуществлялась по трем основным режимам, соответствующим режимам обработки стали Х12МФ [4]. Время обработки по всем режимам составило 30 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании растровой электронной микроскопии поверхностного слоя образцов по плоскости разреза выявлено, что структура стали 4Х4ВМФС после термической обработки соответствует классической мартенситной структуре (рис. 1, а).

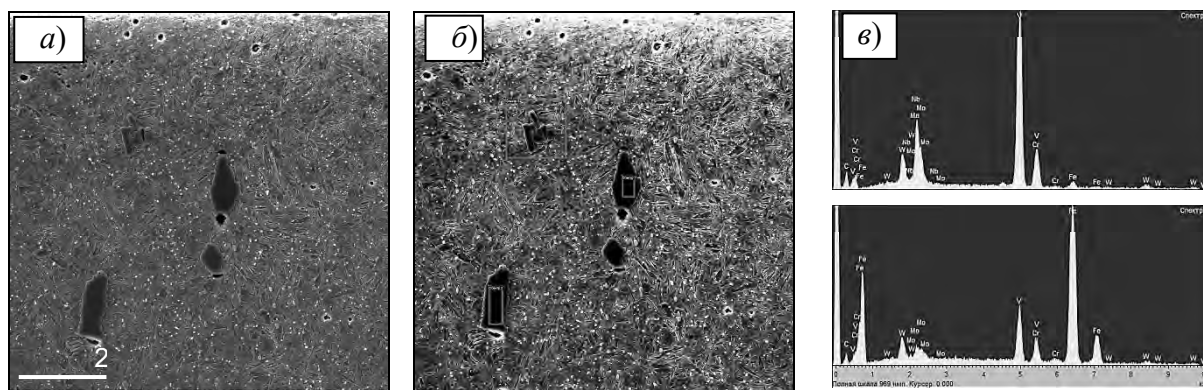


Рис. 1. Структура поверхностного слоя образцов из стали 4Х4ВМФС: а – до обработки тлеющим разрядом; б – электронное изображение структуры с участками анализа; в – рентгеновские спектры от участков образца

Большое количество карбидообразующих элементов, таких как хром (Cr), ванадий (V) и вольфрам (W), в сочетании с высоким содержанием углерода способствуют образованию большого количества как тугоплавких карбидов, так и различных карбидов хрома (рис. 1, б, в).

Как можно увидеть, карбидные

частицы имеют сложную вытянутую форму, что характерно для металла, подвергнутого пластическому деформированию. Средняя площадь карбидных включений составляет $35 \dots 40$ $\mu\text{м}^2$.

Обработка тлеющим разрядом приводит к перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 50 $\mu\text{м}$ (рис. 2).

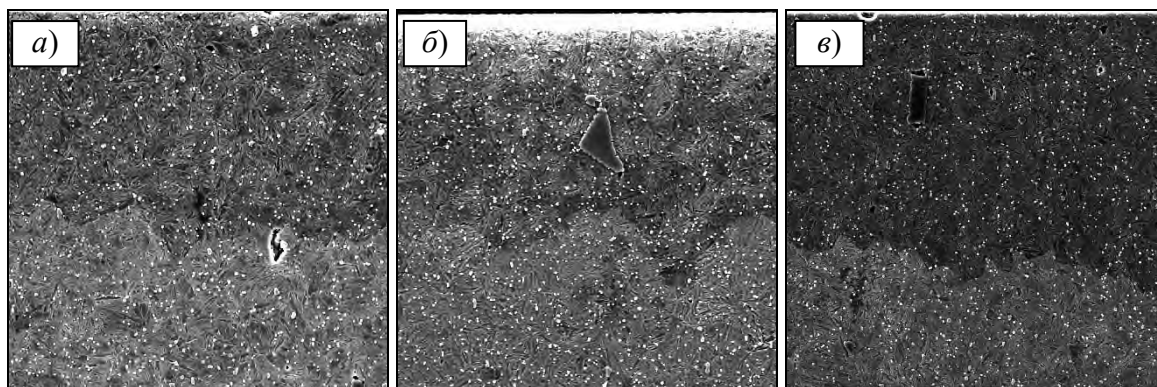


Рис. 2. Структура поверхностного слоя образцов из стали 4X4VMFC, обработанных тлеющим разрядом: *a* – после обработки по режиму № 1; *б* – после обработки по режиму № 2; *в* – после обработки по режиму № 3

Применение прикатодного магнитного поля при обработке тлеющим разрядом приводит к увеличению глубины модифицированного слоя до 80 мкм (рис. 3). Структура поверхностного слоя имеет два ярко выраженных участка, отличающихся между со-

бой фазовыми контрастами, причем величина первого составляет 20...25 мкм. Данная особенность может быть объяснена интенсивностью теплового воздействия на упрочняемую поверхность в процессе обработки.

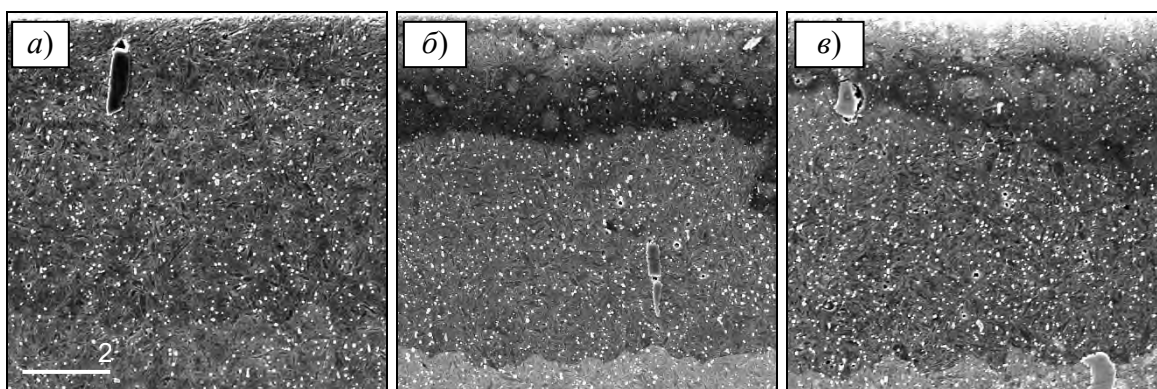


Рис. 3. Структура поверхностного слоя образцов из стали 4X4VMFC после обработки тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля: *a* – после обработки по режиму № 1; *б* – после обработки по режиму № 2; *в* – после обработки по режиму № 3

Рентгеноструктурный анализ образцов в исходном состоянии выявил, что сталь 4X4VMFC содержит мартенсит (α -Fe), остаточный аустенит (γ -Fe), карбид вольфрама (WC), карбид ванадия (VC), трикарбид гептахрома (Cr_7C_3), имеющий гексагональную кристаллическую решетку, и гексакарбид 23-хрома, имеющий кубическую кристалличе-

скую решетку ($Cr_{23}C_6$) (рис. 4).

Как и при исследовании предыдущих штамповых сталей [2–4], установлено, что параметр кристаллической решетки мартенсита (табл. 1) имеет повышенные значения, что обусловлено растворением в нем легирующих элементов с большим атомным радиусом. Количество остаточного

аустенита составляет 3,9 %, что свидетельствует о качественно проведенной

термической обработке.

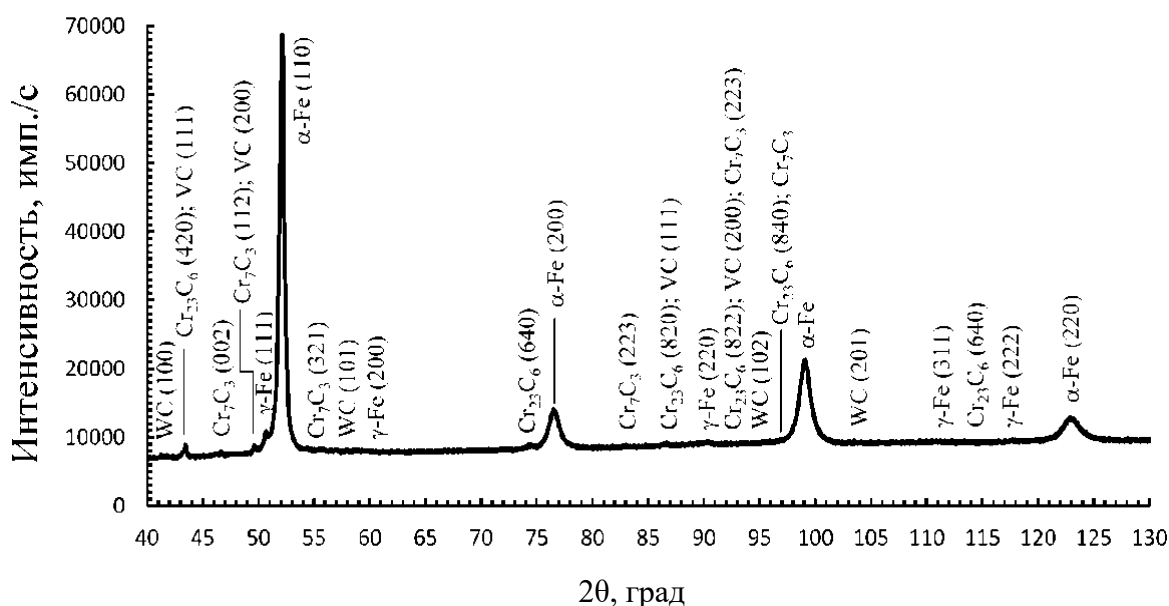


Рис. 4. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы стали 4X4ВМФС после классической термической обработки

Табл. 1. Фазовый состав, количество остаточного аустенита $A_{ост}$, параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали 4X4ВМФС в исходном состоянии

Образец	Фазовый состав	$A_{ост}, \%$	$a_{\alpha-Fe}, \text{нм}$		$\beta_{110}, 10^{-3} \text{ рад}$	$\beta_{220}, 10^{-3} \text{ рад}$	$\rho, 10^{12} \text{ см}^{-2}$
			эксперимент	эталон			
Исходный	$\alpha\text{-Fe}, \gamma\text{-Fe}, \text{Cr}_{23}\text{C}_6, \text{Cr}_7\text{C}_3, \text{WC}, \text{VC}$	3,9	0,2878	0,2866	11,1701	41,8426	24,1

Обработка тлеющим разрядом не приводит к изменению фазового состава стали (рис. 5 и 6).

В результате обработки происходит изменение параметра кристаллической решетки мартенсита, что связано с перераспределением легирующих элементов и попаданием их атомов в кристаллическую решетку $\alpha\text{-Fe}$ (табл. 2).

Как видно, обработка тлеющим разрядом по первому режиму приводит к снижению остаточного аустенита. Рост энергетических параметров разряда приводит к росту остаточного аустенита. Использование прикатодного магнитного поля приводит к значительному

росту остаточного аустенита при обработке по первому режиму, однако в отличие от обработки классическим тлеющим разрядом использование магнитного поля приводит к значительному снижению остаточного аустенита с ростом энергетических характеристик разряда.

Использование прикатодного магнитного поля приводит к снижению количества дефектов в стали в большей степени, чем при обработке классическим тлеющим разрядом, на что указывает снижение уширения дифракционных линий и уменьшение плотности дислокаций. Для обоих случаев обра-

ботки наблюдается снижение плотности дислокаций с ростом энергетических

характеристик тлеющего разряда.

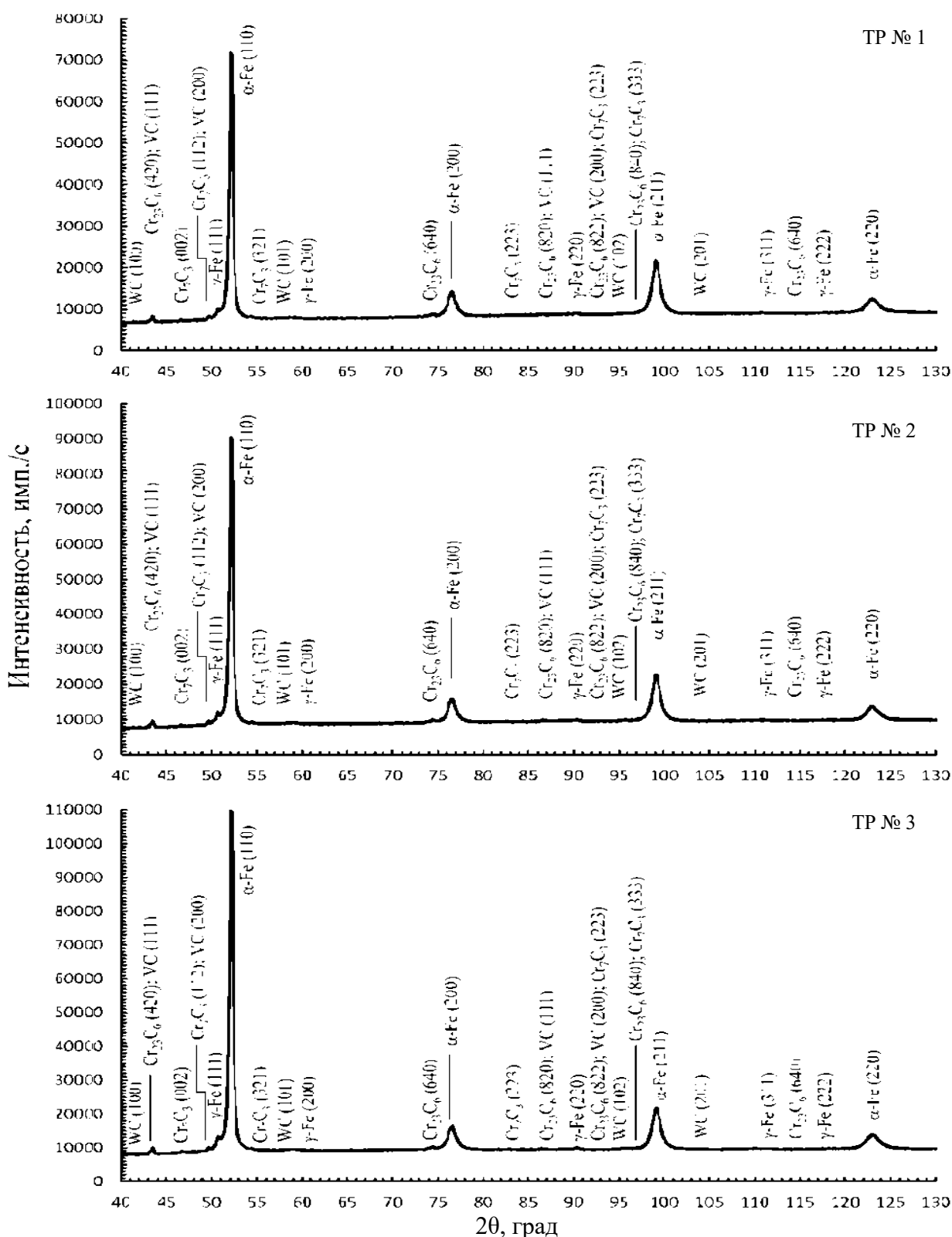


Рис. 5. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали 4X4BMFC после обработки тлеющим разрядом с различными режимами

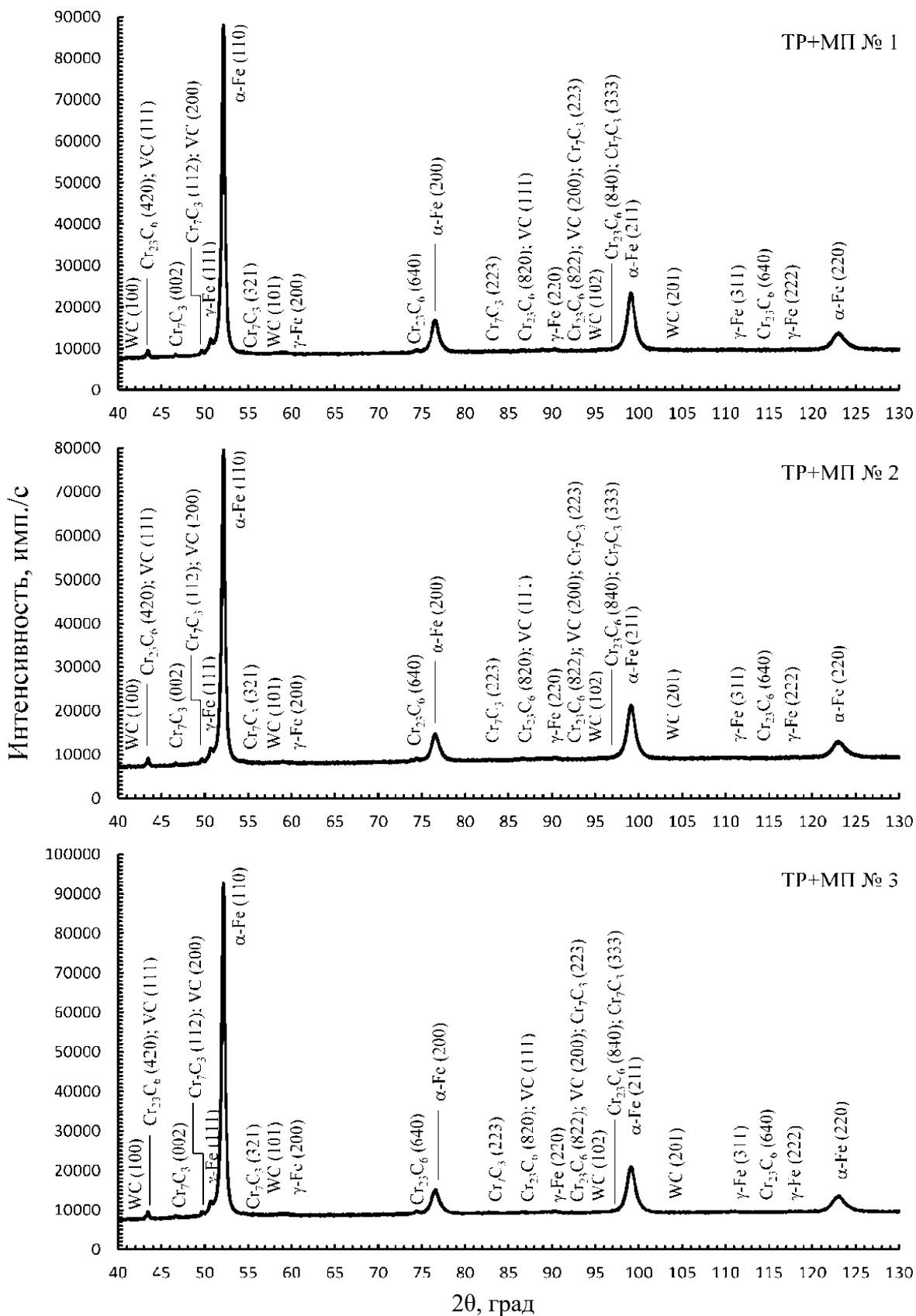


Рис. 6. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали 4Х4ВМФС после обработки тлеющим разрядом с различными режимами с использованием прикатодного магнитного поля

Табл. 2. Фазовый состав, количество остаточного аустенита $A_{ост}$, параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали 4Х4ВМФС после различных режимов обработки

Образец (режим обработки)	Фазовый состав	$A_{ост}$, %	$a_{\alpha-Fe}$, нм	β_{110} , 10^{-3} рад	β_{220} , 10^{-3} рад	ρ , 10^{12} см $^{-2}$
ТР № 1	α -Fe, γ -Fe, $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , WC, VC	3,7	0,2877	10,1855	42,8997	25,3
ТР + МП № 1		6,0	0,2877	9,6509	38,1209	20,0
ТР № 2		4,3	0,2877	9,8700	38,4039	20,3
ТР + МП № 2		5,4	0,2877	10,4818	36,5260	18,3
ТР № 3		4,7	0,2877	10,0198	40,4838	22,5
ТР + МП № 3		3,0	0,2877	10,2609	41,8930	24,1

От выявленной тенденции отличаются результаты обработки по режиму № 3, где использование прикатодного магнитного поля приводит к росту уширения дифракционных линий и незначительному увеличению плотности дислокаций.

Исследуя отражение от дифракционной линии (640) гексакарбида 23-хрома, можно сделать вывод о том, что использование прикатодного магнитного

поля приводит к измельчению карбидной фазы по отношению к классической обработке вместе с ростом физического уширения и плотности дислокаций, что свидетельствует о росте сжимающих напряжений (табл. 3) [5].

Однако при обработке по режиму № 2 использование прикатодного магнитного поля, наоборот, приводит к росту размера частиц $Cr_{23}C_6$.

Табл. 3. Угловое положение линии (640), параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий размера частиц и плотность дислокаций ρ фазы $Cr_{23}C_6$

Образец (режим обработки)	$2\theta_{260}$, град	a , нм	β_{260} , 10^{-3} рад	Размер частиц $Cr_{23}C_6$, нм	ρ , 10^{12} см $^{-2}$
Исходный	74,395	1,06692	9,2393	22,6	3,75
ТР № 1	74,465	1,06606	8,2261	25,7	2,91
ТР + МП № 1	74,475	1,06594	10,8753	19,4	5,08
ТР № 2	74,434	1,06644	8,9885	23,5	3,48
ТР + МП № 2	74,445	1,06631	7,4090	28,5	2,36
ТР № 3	74,390	1,06698	8,3073	25,4	2,97
ТР + МП № 3	74,445	1,06631	9,0999	23,2	3,56

Статистическая обработка экспериментальных данных дюрметрического анализа образцов до обработки и прошедших обработку тлеющим разрядом как с магнитным полем, так и без него позволила получить зависимость

приращения поверхностной твердости по Виккерсу. Графическая интерпретация полученных моделей представлена на рис. 7 и 8.

Сравнительный анализ полученных результатов приращения поверх-

ностной твердости (табл. 4) показал, что использование магнитного поля приводит к росту микротвердости поверхности на 5 % с одновременным снижением

удельной мощности горения разряда на 40 %...50 % и трехкратным сокращением времени обработки.

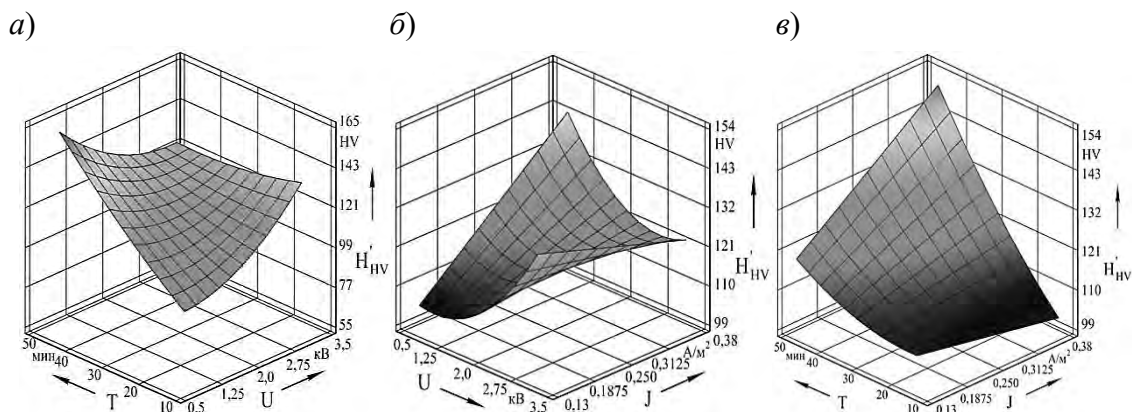


Рис. 7. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом

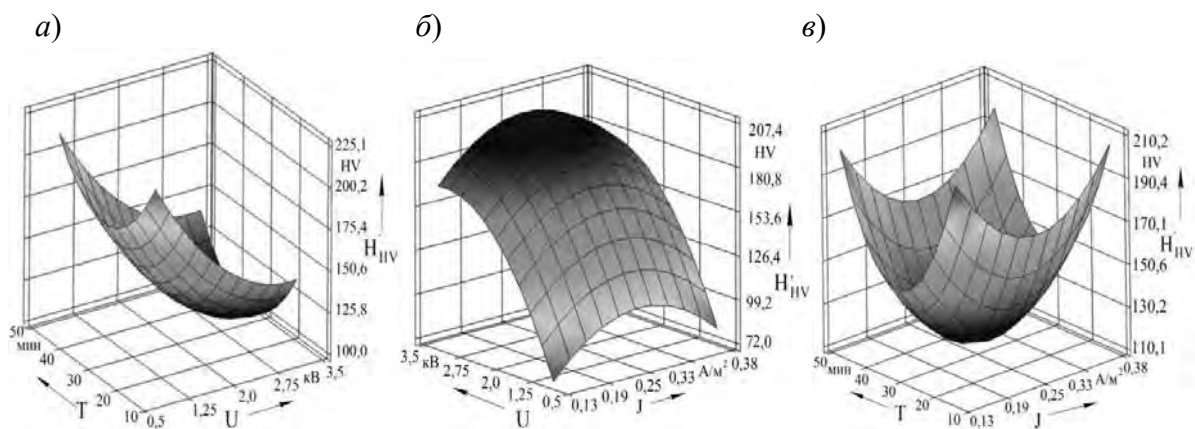


Рис. 8. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Табл. 4. Оптимальные значения технологических параметров обработки образцов тлеющим разрядом, обеспечивающие получение наибольшей микротвердости

Вид обработки	Оптимальное значение технологических параметров обработки (см. рис. 7 и 8)				Приращение твердости ΔH_V , %
	U , кВ	J , mA/m^2	T , мин	W , kVt/m^2	
Тлеющий разряд	0,8	0,375	45	0,3	114
Тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем	0,8	0,250	13	0,2	120

На основании статистической обработки экспериментальных данных исследования износостойкости также получена зависимость, графическая интерпретация которой представлена на рис. 9 и 10.

Сравнительный анализ полученных результатов (табл. 5) показал,

что использование магнитного поля приводит к росту износостойкости на 30 %...35 % с одновременным снижением удельной мощности горения разряда на 40 %...45 % с одновременным сокращением времени обработки на 50 %.

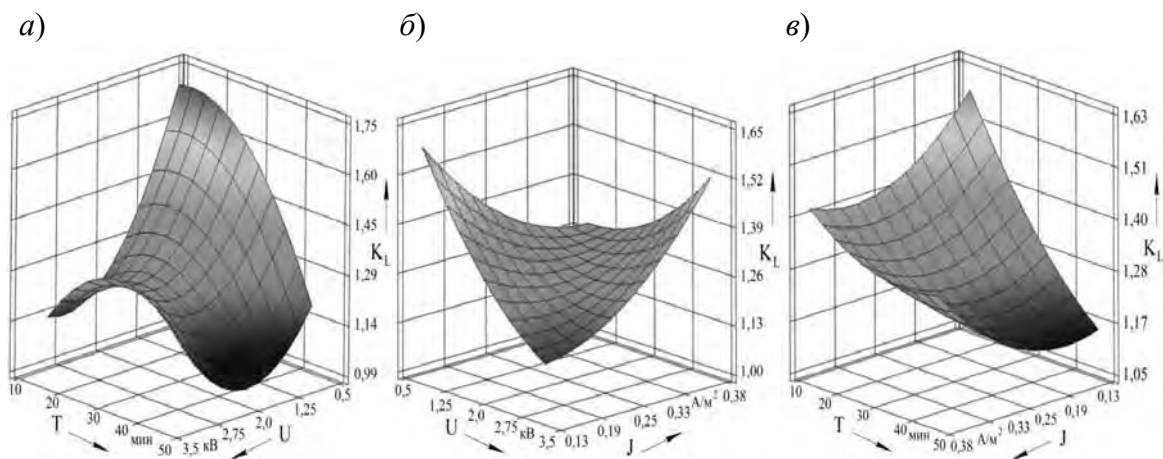


Рис. 9. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на рост коэффициента износостойкости поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом

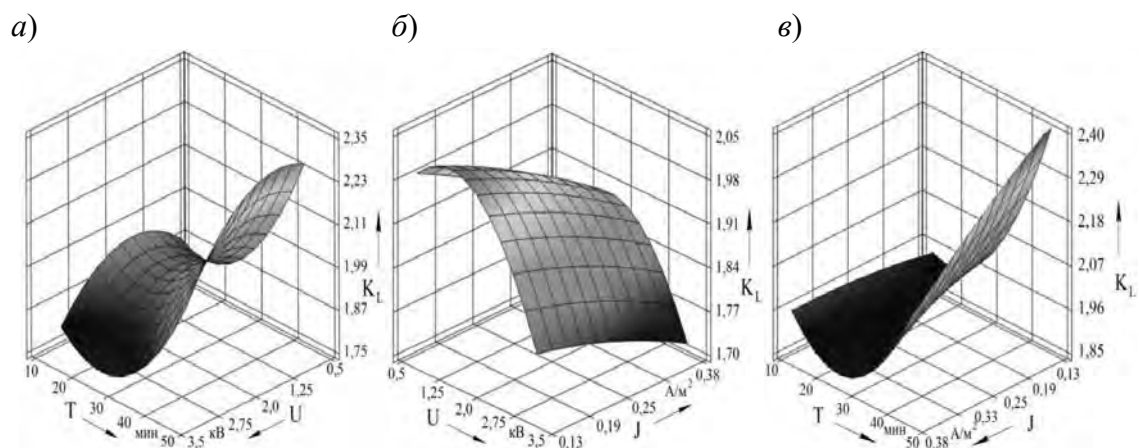


Рис. 10. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на рост коэффициента износостойкости поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом с катодным магнитным полем

Табл. 5. Оптимальные значения технологических параметров обработки образцов тлеющим разрядом, обеспечивающие получение наибольшей износостойкости

Вид обработки	Оптимальное значение технологических параметров обработки (см. рис. 9 и 10)				Коэффициент износостойкости K_L
	U , кВ	J , мА/м ²	T , мин	W , кВт/м ²	
Тлеющий разряд	0,8	0,250	20	0,20	1,7
Тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем	0,8	0,175	13	0,14	2,3

Проведенный анализ микротвердости по глубине образцов показал, что использование прикатодного магнитно-

го поля приводит к росту упрочненного поверхностного слоя в среднем на 50 %...55 % (рис. 11).

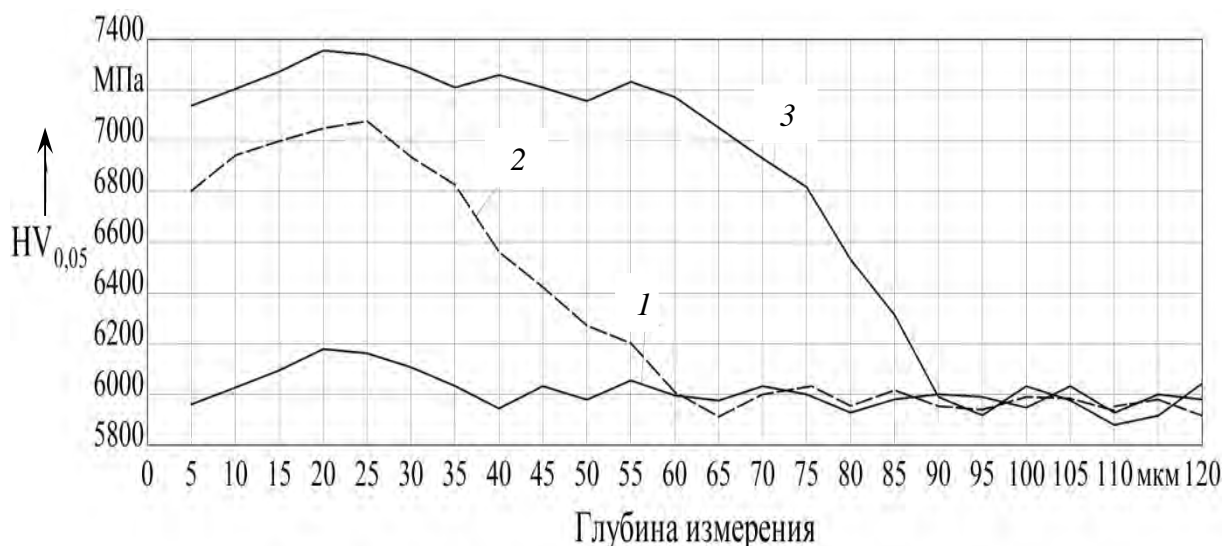


Рис. 11. Микротвердость поверхностного слоя образцов из стали 4Х4ВМФС: 1 – до обработки тлеющим разрядом; 2 – после обработки тлеющим разрядом; 3 – после обработки тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля

Выводы

Обработка образцов из стали 4Х4ВМФС тлеющим разрядом не приводит к изменению параметра кристаллической решетки мартенсита.

Обработка тлеющим разрядом оказывает сложное влияние на количество остаточного аустенита. На минимальных режимах обработки наблюдается снижение его процентного содержания относительно исходного образца, однако с ростом энергетических параметров разряда происходит его рост.

Применение прикатодного магнитного поля приводит к обратной тенденции.

Использование прикатодного магнитного поля приводит к снижению количества дефектов в стали в большей степени, чем при обработке классическим тлеющим разрядом.

Влияние прикатодного магнитного поля на карбидную фазу носит сложный характер. На минимальных и максимальных режимах обработки магнитное поле приводит к измельчению частиц $Cr_{23}C_6$ и росту сжимающих напряжений в них. На режимах обработки, соответ-

ствующих средним значениям, наблюдается обратная картина.

Применение прикатодного магнитного поля в процессе упрочнения изделий из штамповой стали 4Х4ВМФС тлеющим разрядом приводит к росту микротвердости поверхности на 5 %, из-

носостойкости на 30 %...35 % с одновременным снижением удельной мощности горения разряда на 40 %...50 % и значительным сокращением времени обработки. Глубина упрочненного слоя увеличивается на 50 %...55 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом : монография / В. М. Шеменков [и др.] ; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с.: ил.
2. **Рабыко, М. А.** Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2 (75). – С. 23–31.
3. **Рабыко, М. А.** Влияние прикатодного магнитного поля на структурно-фазовое состояние инструментальной штамповой стали 5Х3ВЗМФС при обработке ее тлеющим разрядом / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 77–86.
4. **Шеменков, В. М.** Влияние прикатодного магнитного поля на степень упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали Х12МФ / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2 (79). – С. 118–128.
5. **Горелик, С. С.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учебное пособие / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: МИСиС, 2002. – 360 с.: ил.
6. **Лысак, Л. И.** Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // Вопросы физики металлов и металловедения: сб. тр. – Киев, 1955. – № 6. – С. 40–53.

Статья сдана в редакцию 10 июля 2023 года

Контакты:

VShemenkov@yandex.ru (Шеменков Владимир Михайлович);

belay-marina@yandex.by (Рабыко Марина Александровна);

Vladislavshemenkov@gmail.com (Шеменков Владислав Владимирович).

V. M. SHEMENKOV, M. A. RABYKO, V. V. SHEMENKOV

INFLUENCE OF THE CATHODE MAGNETIC FIELD ON THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF GLOW DISCHARGE STRENGTHENING OF 4X4VMFS STAMPED STEEL

Abstract

The paper presents results of the study of microhardness, wear resistance, structure and phase composition of samples made of 4X4VMFS stamped steel after classical quenching and subjected to glow discharge treatment, both with and without a magnetic field.

Keywords:

glow discharge, microhardness, wear resistance, structure, phase composition, modifying treatment, surface layer, steel.

For citation:

Shemenkov, V. M. Influence of the cathode magnetic field on the efficiency of the process of glow discharge strengthening of 4x4vmfs stamped steel / V. M. Shemenkov, M. A. Rabyko, V. V. Shemenkov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 115–125.