

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_118

УДК 621.9.047:669:538.8

В. М. Шеменков, М. А. Рабыко

ВЛИЯНИЕ ПРИКАТОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТЕПЕНЬ УПРОЧНЕНИЯ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ Х12МФ

V. M. Shemenkov, M. A. Rabyko

INFLUENCE OF CATHODE MAGNETIC FIELD ON THE DEGREE OF GLOW DISCHARGE HARDENING OF H12MF STAMPED STEEL

Аннотация

Представлены результаты исследования микротвердости, износостойкости, структуры и фазового состава образцов из штамповой стали Х12МФ после классической закалки и подвергнувшихся 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 степень упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали Х12МФ / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 118–128.

Abstract

The paper presents results of studies of microhardness, wear resistance, structure and phase composition of samples made of H12MF 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 cathode magnetic field on the degree of glow discharge hardening of H12MF stamped steel / V. M. Shemenkov, M. A. Rabyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 118–128.

Введение

Как известно, высокохромистая инструментальная полутеплостойкая сталь Х12МФ (и ее иностранные аналоги) из-за повышенной износостойкости является самой популярной штамповой сталью в мире. Следует отметить, что, несмотря на некоторые трудности, возникающие при термической обработке, до 60 % штампов и других инструментов, деформирующих металл в холод-

ном или относительно невысоко нагретом состоянии, изготавливаются из данной стали.

Несмотря на уникальные механические свойства штамповой стали Х12МФ, особенно износостойкость, получаемую при классической термической обработке, их зачастую недостаточно, вследствие чего различными учеными проводятся работы по разработке дополнительных методов повышения износостойкости указанной ста-

ли. Одним из таких перспективных методов является обработка изделий из сталей и сплавов тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем.

С точки зрения науки большой интерес представляет установление влияния использования прикатодного магнитного поля на эффективность процесса упрочнения.

Целью данной работы являлось изучение влияния прикатодного магнитного поля на степень упрочнения образцов из штамповой стали X12МФ, их износостойкость и структурно-фазовое состояние в поверхностном слое.

Исследования проводились на образцах из стали X12МФ ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки, прошедших закалку с 970 °С и последующий отпуск при 180 °С [1].

Методика исследования

В работе применялись электронно-микроскопический и рентгеноструктурный методы анализа структуры и фазового состава. Для определения твердости поверхностного слоя использовался дюрометрический метод.

Методика проведения указанных исследований аналогична методике, описанной в [2, 3].

Для определения глубины упрочненного слоя образцы разрезались по плоскости, перпендикулярной поверхности, направленной в процессе обработки тлеющим разрядом в сторону анода.

Обработка образцов тлеющим разрядом так же, как и в [2, 3], осуществлялась по трем основным режимам, указанным в табл. 1. Время обработки по всем режимам составило 30 мин.

Табл. 1. Режимы обработки образцов тлеющим разрядом

Режим обработки	Напряжение горения тлеющего разряда U , В	Плотность тока J , мА/м ²	Индукция прикатодного магнитного поля B , мТл
ТР № 1	1000	0,125	–
ТР + МП № 1			40...60
ТР № 2	2000	0,250	–
ТР + МП № 2			40...60
ТР № 3	3000	0,375	–
ТР + МП № 3			40...60

Результаты исследования и их обсуждение

На основании металлографического анализа поверхностного слоя образцов выявлено, что структура стали X12МФ после термической обработки соответствует классической мартенситной структуре (рис. 1, а).

В стали X12МФ содержится большое количество карбидообразующих элементов, таких как хром (Cr), ва-

надий (V) и молибден (Mo), а достаточно высокое содержание углерода способствует образованию большого количества карбидов хрома (рис. 1, б, в).

Как видно, карбидные частицы вытянуты в одном направлении и образуют полосчатость, что характерно для металла, подвергнутого пластической деформации. Средняя площадь карбидных включений составляет 25...30 мкм².

Обработка тлеющим разрядом приводит к перераспределению карбид-

ной фазы в поверхностном слое глубиной до 50 мкм (рис. 2).

Применение прикатодного магнитного поля при обработке тлеющим разрядом приводит к большему, чем при

обработке без применения магнитного поля, измельчению карбидной фазы, а глубина модифицированного слоя составляет до 80 мкм (рис. 3).

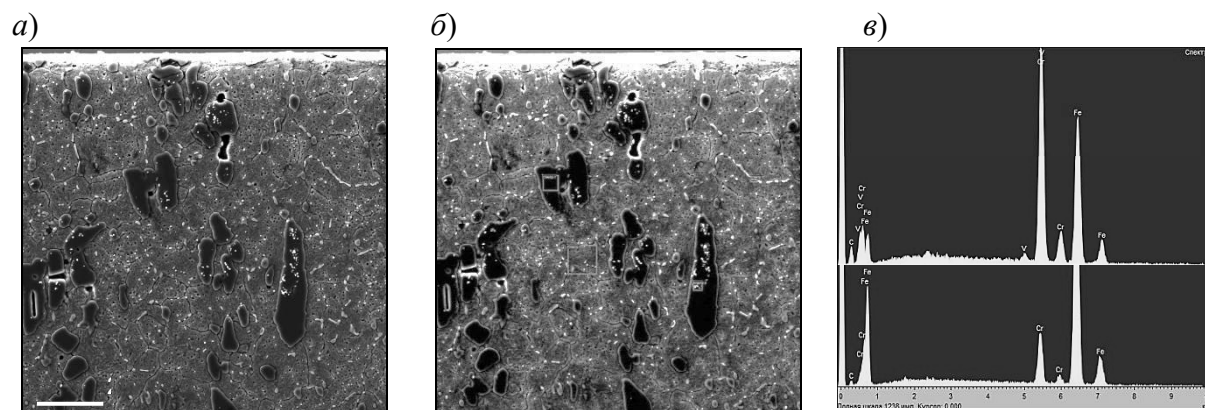


Рис. 1. Структура поверхностного слоя образцов из стали X12МФ: *a* – до обработки тлеющим разрядом; *б* – электронное изображение структуры с участками анализа; *в* – рентгеновские спектры от участков образца

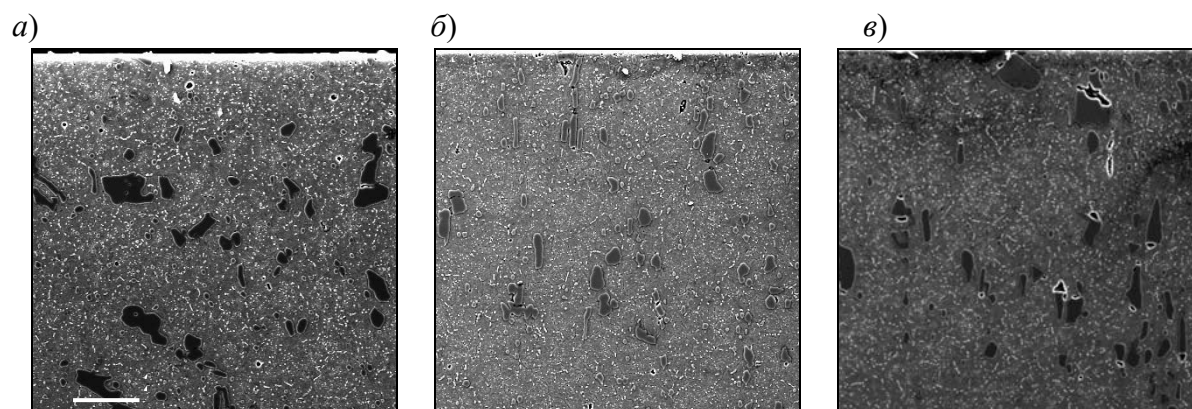


Рис. 2. Структура поверхностного слоя образцов из стали X12МФ, обработанных тлеющим разрядом: *a* – после обработки по режиму № 1; *б* – после обработки по режиму № 2; *в* – после обработки по режиму № 3

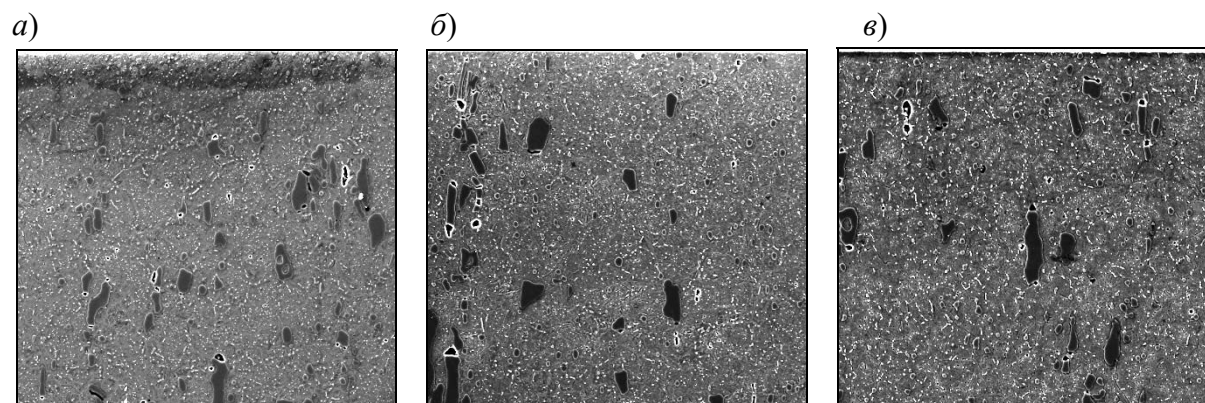


Рис. 3. Структура поверхностного слоя образцов из стали X12МФ после обработки тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля: *a* – после обработки по режиму № 1; *б* – после обработки по режиму № 2; *в* – после обработки по режиму № 3

Рентгеноструктурный анализ образцов в исходном состоянии выявил, что сталь X12МФ содержит мартенсит (α -Fe), остаточный аустенит (γ -Fe), цементит (Fe_3C) и трикарбид гексахрома (Cr_7C_3) (рис. 4).

Параметр кристаллической решетки мартенсита (табл. 2) имеет повышенные значения, что обусловлено растворением в нем легирующих элементов, имеющих большой атомный радиус. Количество остаточного аустенита составляет 10,5 %, что свидетельствует о качественно проведенной термической обработке.

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 α -Fe (табл. 3).

Характерно то, что обработка тлеющим разрядом приводит к снижению количества остаточного аустенита. Использование прикатодного магнитного поля приводит к более значительному уменьшению.

На распад остаточного аустенита может оказывать влияние протекающий процесс отпуска, за счет которого происходит обеднение аустенитной фазы легирующими элементами и, как следствие, ее полиморфное превращение в α -Fe.

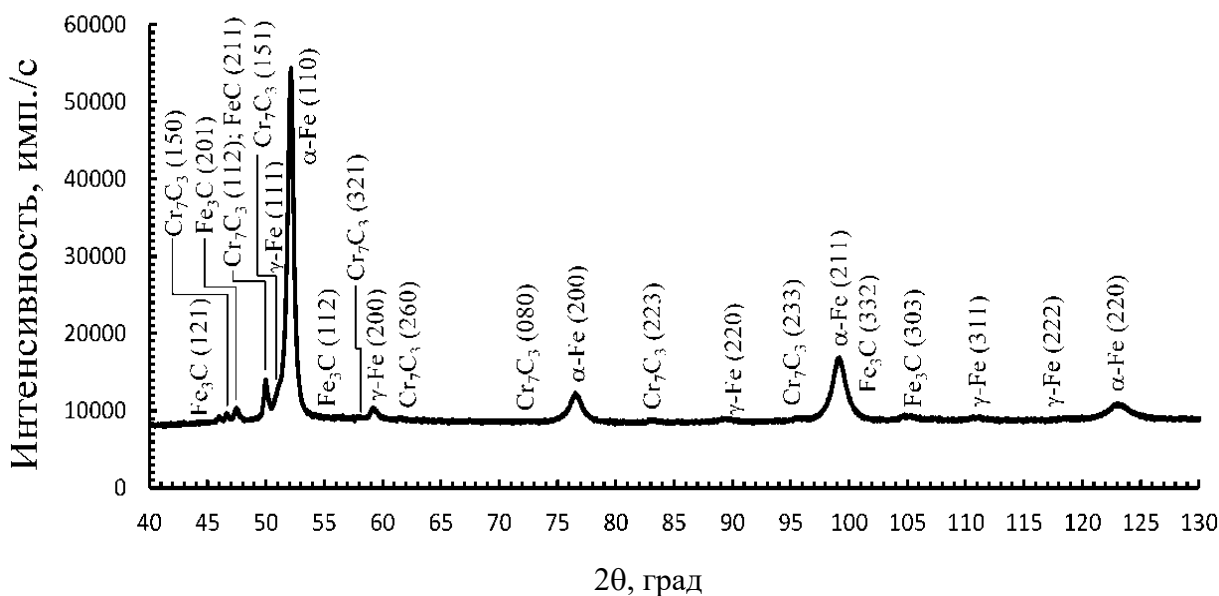


Рис. 4. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы стали X12МФ после классической термической обработки

Табл. 2. Фазовый состав, количество остаточного аустенита $A_{ост}$, параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали X12МФ в исходном состоянии

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 $^{-2}$
			эксперимент	эталон [4]			
Исходный	α -Fe, γ -Fe, Cr_7C_3 , Fe_3C	10,5	0,2876	0,28664	13,5419	55,0689	4,16

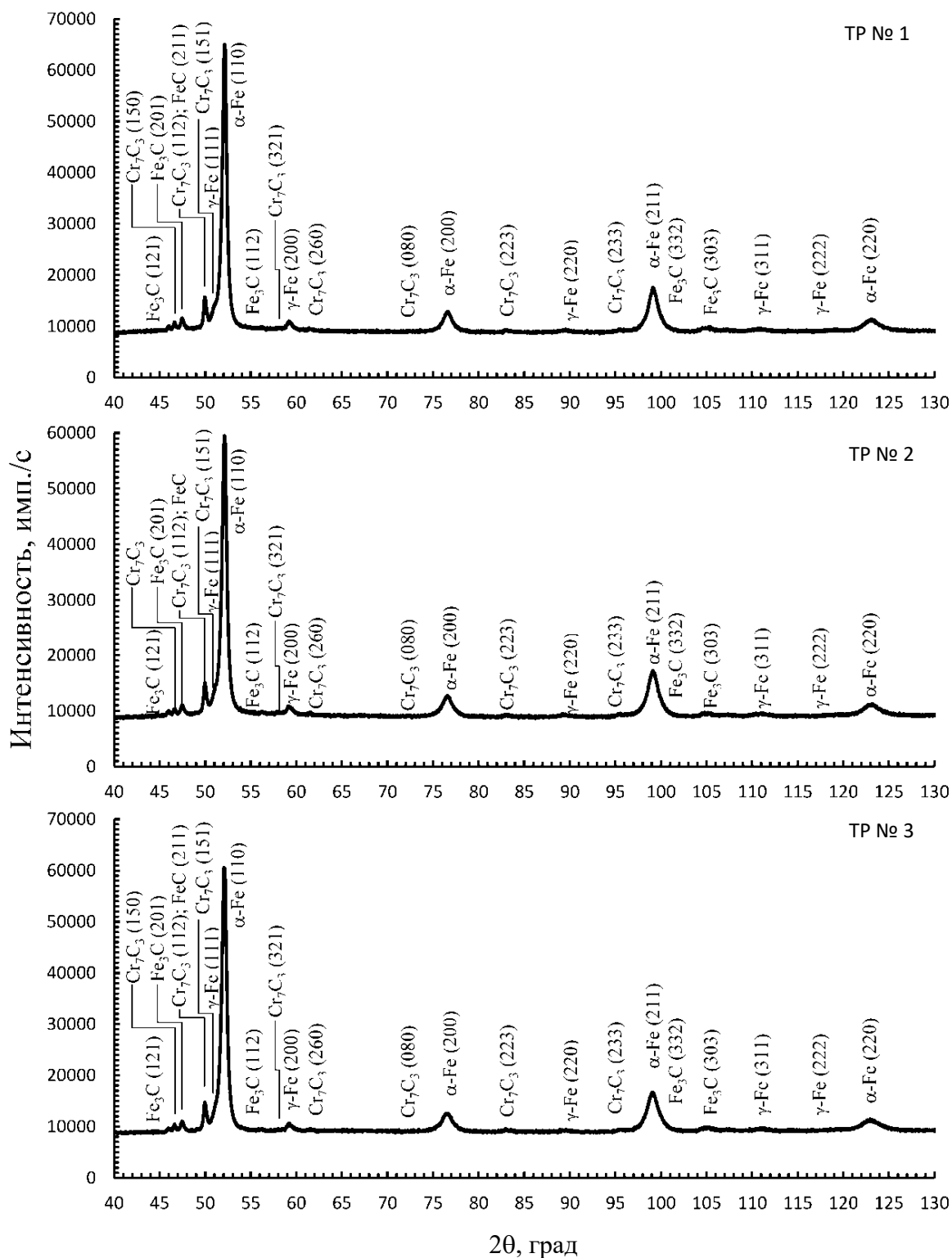


Рис. 5. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали X12МФ после обработки тлеющим разрядом с различными режимами

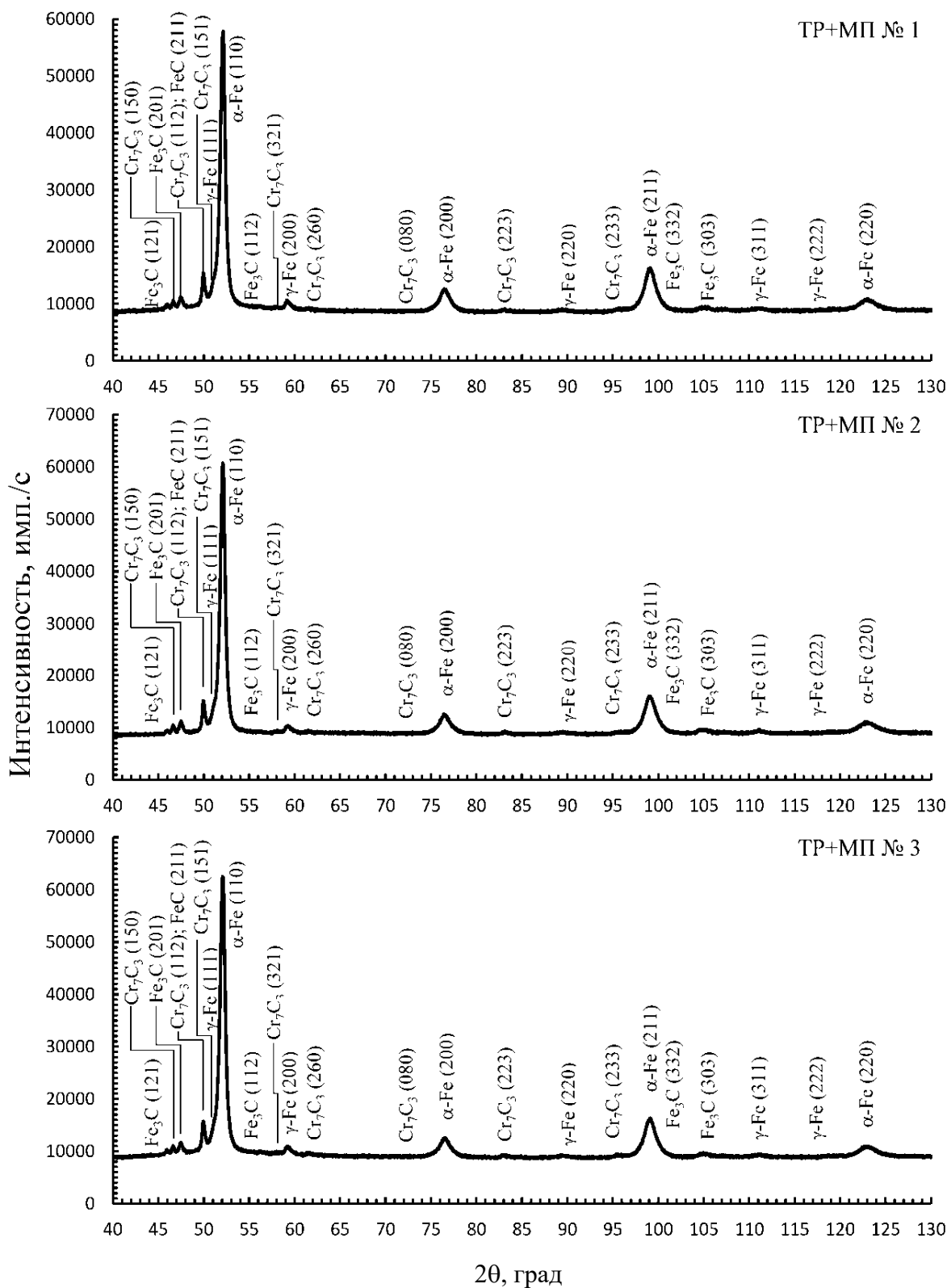


Рис. 6. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали X12МФ после обработки тлеющим разрядом с различными режимами с использованием прикатодного магнитного поля

Табл. 3. Фазовый состав, количество остаточного аустенита $A_{ост}$, параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали X12МФ 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	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_7C_3, Fe_3C$	12,7	0,2876	12,0960	50,0193	3,43
ТР + МП № 1	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_7C_3, Fe_3C$	8,8	0,2877	14,4793	52,2393	3,75
ТР № 2	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_7C_3, Fe_3C$	10,6	0,2877	13,8545	56,9561	8,92
ТР + МП № 2	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_7C_3, Fe_3C$	8,6	0,2877	14,0965	47,8555	3,15
ТР № 3	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_7C_3, Fe_3C$	9,6	0,2878	13,4297	61,1721	10,5
ТР + МП № 3	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_7C_3, Fe_3C$	9,6	0,2877	14,6862	56,5311	8,79

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.

От указанной тенденции отличаются результаты обработки по режиму № 1, где использование прикатодного магнитного поля приводит к росту

уширения дифракционных линий и незначительному увеличению плотности дислокаций.

Исследуя отражение от дифракционной линии (260) трикарбида гептахрома, можно сделать вывод о том, что использование прикатодного магнитного поля приводит к измельчению карбидной фазы вместе с ростом физического уширения и плотности дислокаций, что свидетельствует о росте сжимающих напряжений (табл. 4) [5].

Табл. 4. Угловое положение линии (260), физическое уширение β дифракционных линий размера частиц и плотность дислокаций ρ фазы Cr_7C_3

Образец (режим обработки)	$2\theta_{260}$, град	β_{260} , 10^{-3} рад	Размер частиц Cr_7C_3 , нм	ρ , 10^{12} см $^{-2}$
Исходный	61,605	11,2379	17,4	8,12
ТР № 1	61,525	9,2416	21,1	2,11
ТР + МП № 1	61,515	14,6635	13,3	13,90
ТР № 2	61,536	8,2591	23,7	8,79
ТР + МП № 2	61,625	11,1009	17,6	7,92
ТР № 3	61,535	9,4592	20,7	11,50
ТР + МП № 3	61,585	12,2205	16,0	19,20

На основании статистической обработки экспериментальных данных дюрOMETрического анализа образцов до обработки и прошедших обработку

тлеющим разрядом как с магнитным полем, так и без него получена зависимость приращения поверхностной твердости по Виккерсу. Графическая интер-

преращения полученных моделей представлена на рис. 7 и 8.

Сравнительный анализ полученных результатов приращения поверхностной твердости (табл. 5) показал, что

использование магнитного поля приводит к росту микротвердости поверхности на 3 % с одновременным снижением удельной мощности горения разряда на 30 %...35 %.

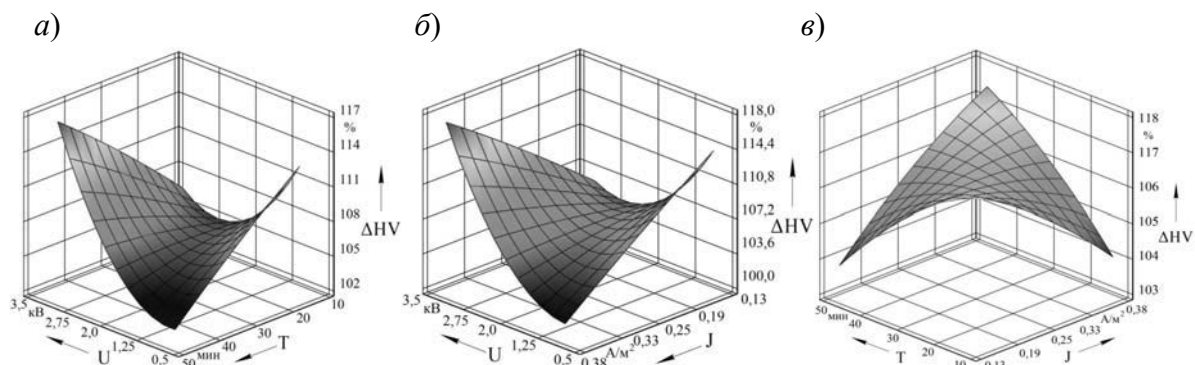


Рис. 7. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов из стали X12МФ при обработке тлеющим разрядом

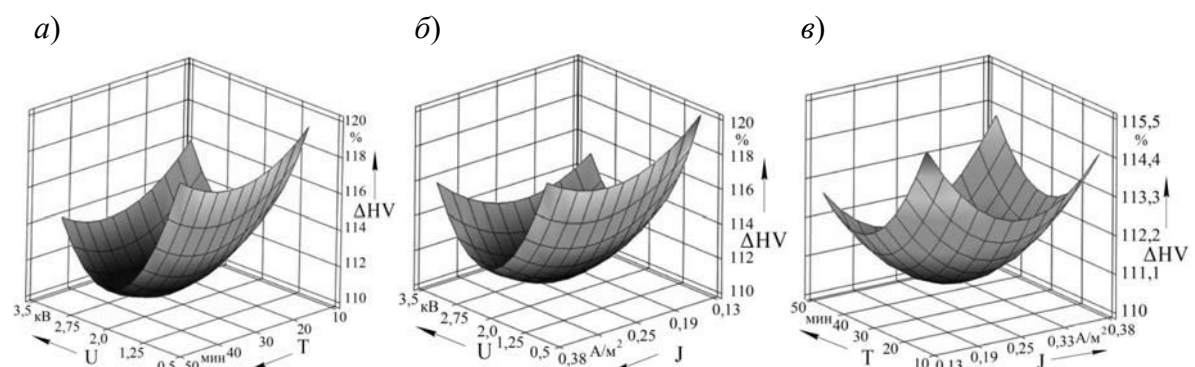


Рис. 8. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов из стали X12МФ при обработке тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля

Табл. 5. 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, ΔHV %
	U , кВ	J , mA/m^2	T , мин	W , kWh/m^2	
Тлеющий разряд	3,2	0,375	13	1,2	117,7
Тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем	1,25	0,170	20	0,8	120,9

На основании статистической обработки экспериментальных данных исследования износостойкости также получена зависимость приращения коэффициента износостойкости. Графическая интерпретация полученной модели представлена на рис. 9 и 10.

Сравнительный анализ полученных результатов (табл. 6) показал, что использование магнитного поля приводит

к росту износостойкости на 30 % с одновременным снижением удельной мощности горения разряда на 30 %...35 %.

Проведенный анализ микротвердости по глубине образцов показал, что использование прикатодного магнитного поля приводит к росту упрочненного поверхностного слоя в среднем на 50 %...60 % (рис. 11).

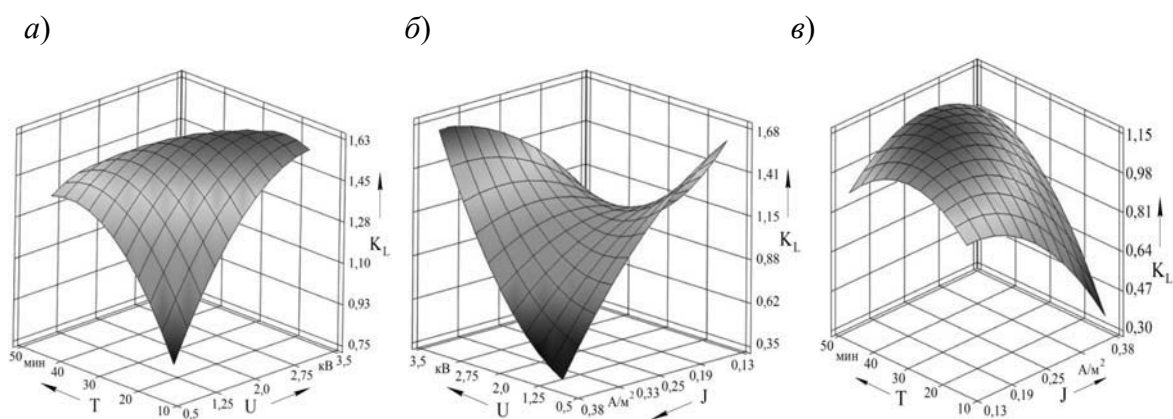


Рис. 9. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение коэффициента износостойкости поверхности образцов из стали X12МФ при обработке тлеющим разрядом

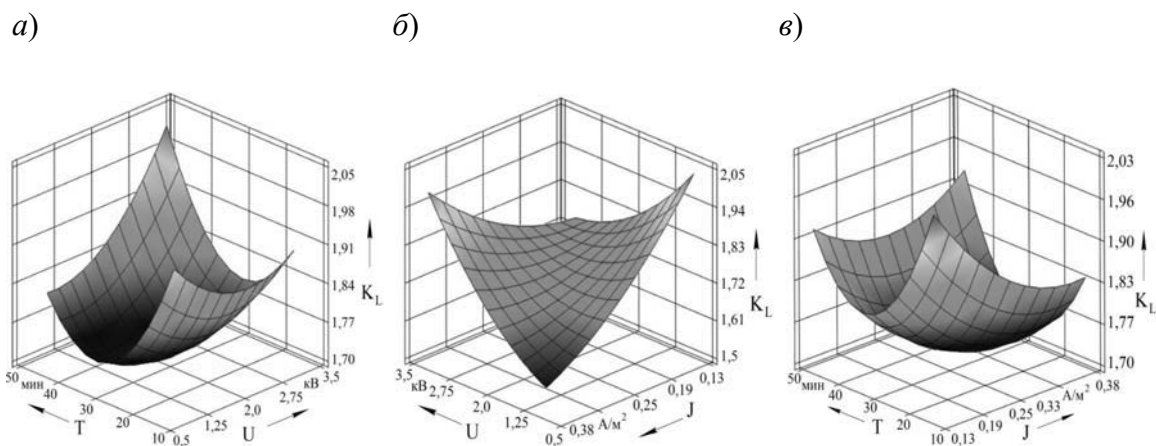


Рис. 10. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение коэффициента износостойкости поверхности образцов из стали X12МФ при обработке тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля

Табл. 6. Оптимальные значения технологических параметров обработки образцов тлеющим разрядом, обеспечивающие получение наибольшей износостойкости

Вид обработки	Оптимальное значение технологических параметров обработки (см. рис. 9 и 10)				Приращение коэффициента износостойкости K_L
	U , кВ	J , мА/м^2	T , мин	W , кВт/м^2	
Тлеющий разряд	3,2	0,375	30	1,2	1,6
Тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем	1,5	0,25	20	0,8	2,1

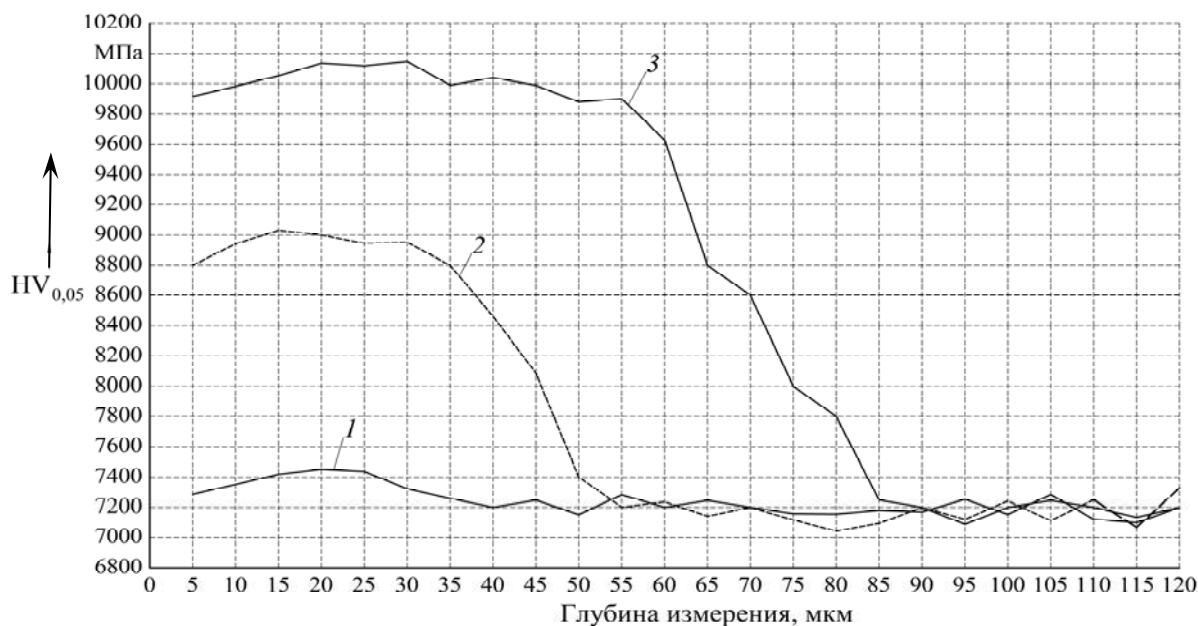


Рис. 11. Микротвердость поверхностного слоя: 1 – до обработки тлеющим разрядом; 2 – после обработки тлеющим разрядом; 3 – после обработки тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля

Выводы

В результате обработки образцов из стали X12MФ тлеющим разрядом происходит изменение параметра кристаллической решетки мартенсита, снижение количества остаточного аустенита, причем использование прикатодного магнитного поля приводит к более значительному его уменьшению.

Использование прикатодного магнитного поля приводит к снижению количества дефектов в стали и измель-

чению карбидной фазы в большей степени, чем при обработке классическим тлеющим разрядом.

Применение прикатодного магнитного поля в процессе упрочнения штамповых сталей является весьма перспективным, т. к. его использование приводит к росту микротвердости поверхности на 3 %, износостойкости на 30 %, а глубина упрочненного слоя увеличивается на 50 %...60 % с одновременным снижением удельной мощности горения разряда на 30 %...35 %.

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 5Х3В3МФС при обработке ее тлеющим разрядом / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 77–86.
4. **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.
5. **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 17 апреля 2023 года

Владимир Михайлович Шеменков, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

Марина Александровна Рабыко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: belay-marina@yandex.by.

Vladimir Mikhailovich Shemenkov, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University.
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

Marina Aleksandrovna Rabyko, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: belay-marina@yandex.by.