

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-1-54-64

УДК 621.787

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

А. Н. ЮМАНОВА

М. А. РАБЫКО, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ДЕТАЛЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация

Представлены результаты исследования комбинированного метода упрочнения конструкционной стали 45, основанного на последовательном применении поверхностной закалки токами высокой частоты (ТВЧ) и обработки тлеющим разрядом. Определены оптимальные сочетания режимов, обеспечивающие максимальный прирост микротвердости до 59 %, который достигается при ТВЧ-закалке со скоростью 4 мм/с и мощностью 30 кВт с последующей обработкой в тлеющем разряде при напряжении 1,25 кВ, плотности тока 0,125 А/м² и времени 45 мин. Результаты подтверждают, что предложенная комбинированная технология является эффективным способом целенаправленного формирования градиентных поверхностных слоев с повышенной износостойкостью для ответственных деталей машиностроения.

Ключевые слова:

поверхностное упрочнение, тлеющий разряд, токи высокой частоты, конструкционная сталь 45, микротвердость, износостойкость, структурно-фазовое состояние, комбинированные технологии, поверхностный слой.

Для цитирования:

Шеменков, В. М. Структурно-фазовое модифицирование тлеющим разрядом поверхностных слоев на деталях машиностроения, полученных воздействием электромагнитного излучения / В. М. Шеменков, А. Н. Юманова, М. А. Рабыко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 1 (90). – С. 54–64.

Введение

В условиях динамичного развития машиностроительной отрасли и постоянного роста требований к надежности, долговечности и ресурсу оборудования ключевое значение приобретает повышение эксплуатационных характеристик деталей и инструмента. Особую роль в обеспечении их функциональности играет состояние поверхностного слоя, которое непосредственно определяет сопротивление изнашиванию, усталостную прочность и стойкость к механическим нагрузкам. Традиционные методы поверхностного упрочнения, такие как объемная термообработка, химико-термическая обработка или нанесение покрытий, не всегда

удовлетворяют современным требованиям по эффективности, экономичности и технологической гибкости, а зачастую оказывают негативное воздействие на экологию [1, 2].

В связи с этим актуальным направлением является разработка и внедрение инновационных способов модифицирования поверхностных слоев, основанных на использовании концентрированных потоков энергии. К числу наиболее перспективных относится поверхностная закалка токами высокой частоты (ТВЧ), позволяющая осуществлять локальное, высокоинтенсивное воздействие на материал с формированием специфических структур, обеспечивающих значительное повышение микротвердости и износостойкости. Однако ука-

занный метод обладает как несомненными преимуществами, так и определенными ограничениями, касающимися производительности, стоимости оборудования, требований к условиям обработки и стабильности получаемых свойств [3–5].

Особый научный и практический интерес представляет комбинирование указанного высокоэнергетического метода с обработкой тлеющим разрядом. Такое комплексное воздействие позволяет не только синергетически усилить эффект упрочнения, но и обеспечить высокую экономичность, экологическую безопасность, сохранение геометрии изделий и возможность обработки материалов различного состава и конфигурации. При этом механизмы структурно-фазовых преобразований в поверхностных слоях при комбинированном воздействии остаются недостаточно изученными, а вопросы оптимизации технологических режимов для достижения заданных эксплуатационных характеристик требуют глубокого системного исследования [1–6].

Данная работа посвящена анализу,

разработке и исследованию комплексных методов структурно-фазового модифицирования поверхностных слоев деталей машиностроения, основанных на совместном применении ТВЧ и обработки тлеющим разрядом. Целью исследования является установление закономерностей влияния параметров комбинированной обработки на микротвердость, износостойкость и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя конструкционной стали 45.

Описание эксперимента

В качестве объекта исследования были выбраны образцы-свидетели, полученные из проката шестигранной формы из стали 45 (ГОСТ 1050–88) с вписанной окружностью диаметром 27 мм, подвергнутого закалке ТВЧ с различной скоростью перемещения индуктора вдоль оси заготовки (4...6 мм/с) и мощностью нагрева (30...47 кВт).

Обработка образцов проводилась по двум основным режимам, указанным в табл. 1. Время обработки по всем режимам составило 30 мин.

Табл. 1. Режимы обработки образцов в тлеющем разряде

Режим обработки	Напряжение горения тлеющего разряда U, В	Плотность тока J, мА/м ²
1	1000	0,125
2	3000	0,375

Исследование фазового состава, структуры и механических свойств модифицированных поверхностных слоев выполнено с применением комплекса физико-химических и механических методов. Для анализа морфологии и элементного состава использовалась растровая электронная микроскопия на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA 2SBA с регистрацией вторичных электронов. Идентификация кристаллических фаз и анализ структурных изменений осуществлялись методом

рентгеноструктурного анализа на автоматизированном дифрактометрическом комплексе ДРОН-3М в монохроматизированном излучении $Co_{K\alpha}$. Количественная оценка упрочнения поверхностных слоев проводилась путем измерения микротвердости на универсальной испытательной системе Zwick Roell ZHV 1M с индентором Виккерса. К индентору прикладывалась нагрузка 0,98 Н.

Основная часть

На основании металлографического исследования установлено, что после поверхностной закалки ТВЧ стали 45 формируется типичная для индукционного нагрева слоистая структура с четко

выраженными зонами (рис. 1).

Основным структурным составляющим упрочненного слоя является мелкоигльчатый мартенсит закалки. Термокинетический цикл ТВЧ приводит к присутствию в структуре заметного количества остаточного аустенита.

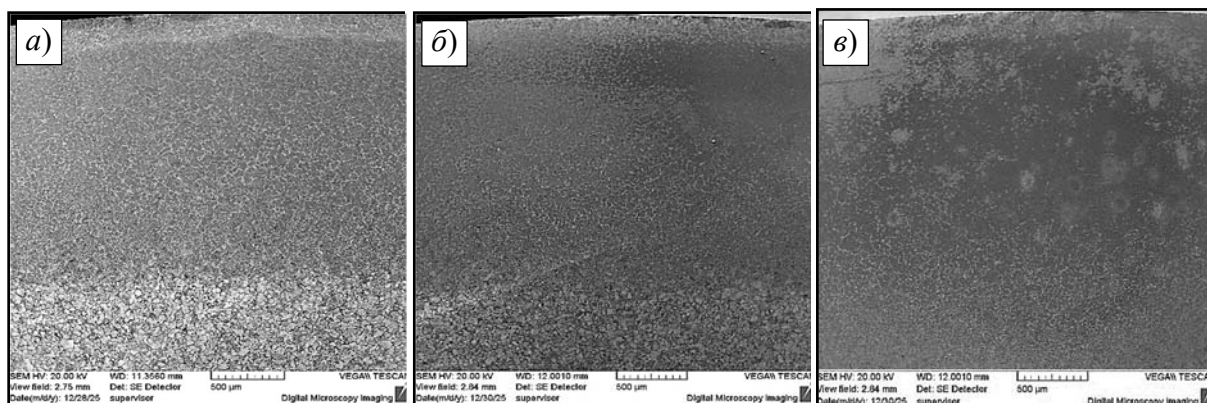


Рис. 1. Структура поверхностного слоя стали 45 после закалки ТВЧ (56...57 кГц): *a* – скорость перемещения индуктора 4 мм/с и мощность нагрева 30 кВт ($V = 4$ мм/с, $W = 30$ кВт); *б* – скорость перемещения индуктора 5 мм/с и мощность нагрева 34 кВт ($V = 5$ мм/с, $W = 34$ кВт); *в* – скорость перемещения индуктора 6 мм/с и мощность нагрева 47 кВт ($V = 6$ мм/с, $W = 47$ кВт)

Это связано с относительно «мягким» режимом нагрева и охлаждения, а также с возможной неполной гомогенизацией аустенита, что стабилизирует его часть. По глубине от поверхности наблюдается классическая трехзонная структура: полностью закаленная зона с мартенситом (и аустенитом), переходная зона неполной закалки (смесь мартенсита, троостита и феррита) общей глубиной до 1,5 мм и неизменная сердцевина с исходной феррито-перлитной структурой.

На границе зон наблюдается грубоигльчатый мартенсит и сетка по границам зерен, а также зоны с повышенным содержанием аустенита. Таким образом, структура после ТВЧ характеризуется сочетанием высокой поверхностной твердости с относительно глубоким упрочненным слоем и сложным градиентным распределением фаз, что и делает ее перспективным объектом для последующей модификации обработкой тлеющим разрядом с целью стабилизации структуры и снятия напряжений.

Стоит также отметить, что с увеличением скорости перемещения индуктора и мощности вложения энергии для нагрева изделия структура становится более равномерной с меньшим количеством остаточного аустенита.

Обработка тлеющим разрядом образцов приводит к незначительным изменениям в поверхностном слое глубиной до 75...90 мкм, связанным с изменением карбидных включений и более их равномерному распределению (рис. 2 и 3). Наиболее ярко этот эффект наблюдается при обработке стали тлеющим разрядом по режиму 2.

На основании рентгеноструктурного анализа установлено, что после закалки ТВЧ поверхностный слой образцов содержит две основные фазы: α -Fe (мартенсит) и γ -Fe (аустенит). Параметр кристаллической решетки отличается от параметра кристаллической решетки феррита (0,2688 нм), что свидетельствует о наличии концентрации дефектов в кристаллической решетке, связанных с легирующими элементами и примесями.

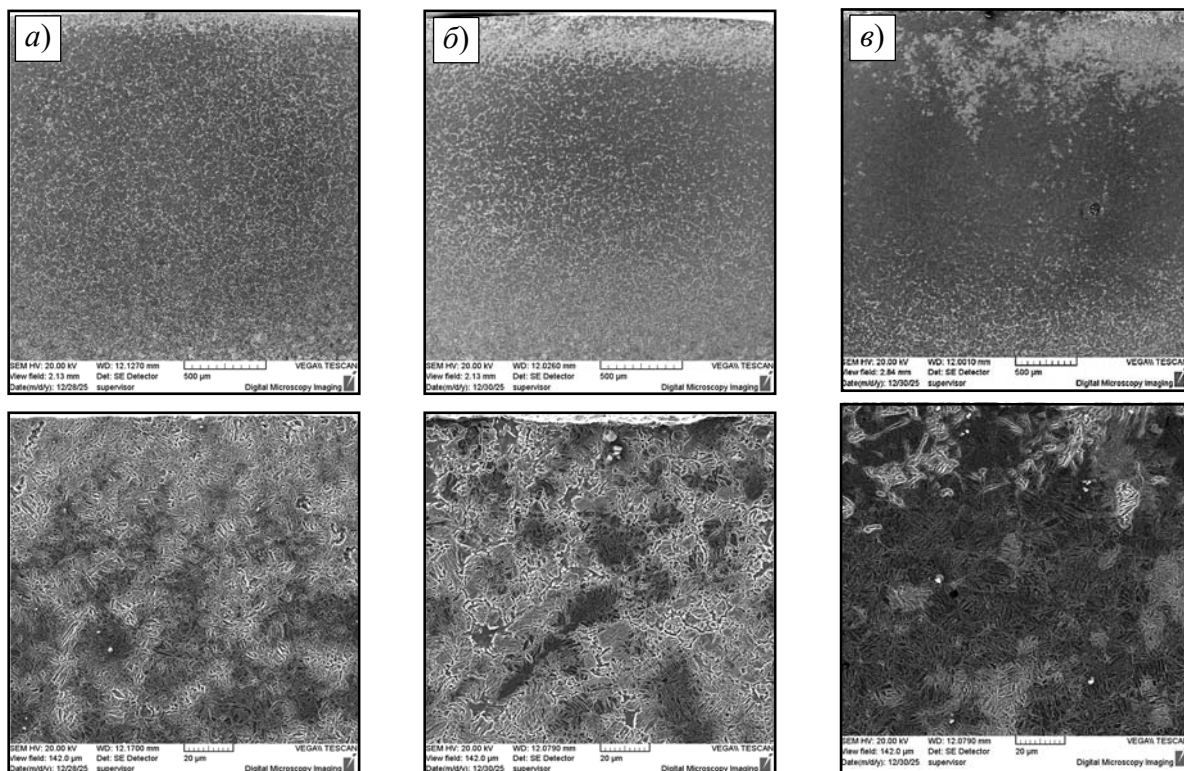


Рис. 2. Структура поверхностного слоя стали 45 после закалки ТВЧ (56...57 кГц) и обработки в тлеющем разряде по режиму 1: а – $V = 4$ мм/с, $W = 30$ кВт; б – $V = 5$ мм/с, $W = 34$ кВт; в – $V = 6$ мм/с, $W = 47$ кВт

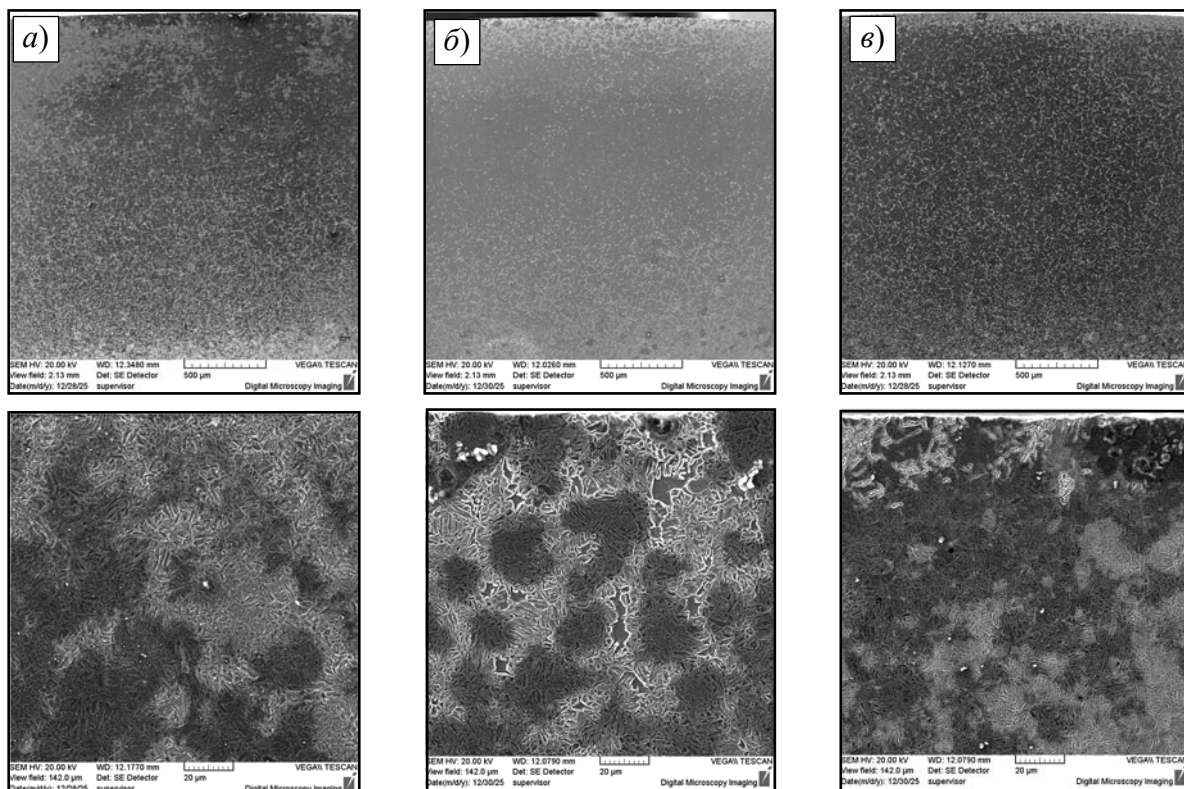


Рис. 3. Структура поверхностного слоя стали 45 после закалки ТВЧ (56...57 кГц) и обработки в тлеющем разряде по режиму 2: а – $V = 4$ мм/с, $W = 30$ кВт; б – $V = 5$ мм/с, $W = 34$ кВт; в – $V = 6$ мм/с, $W = 47$ кВт

Отношение величин физического уширения дифракционных линий (110) и (220) α -Fe (3,72...3,82) пропорционально отношению $\text{tg}\theta_{220}/\text{tg}\theta_{110}$ (3,81...3,82). Это указывает на то, что физическое

уширение дифракционных линий матричной фазы обусловлено микронапряжениями из-за повышенной плотности дислокаций и характерно для мартенсита в сталях (рис. 4 и табл. 2).

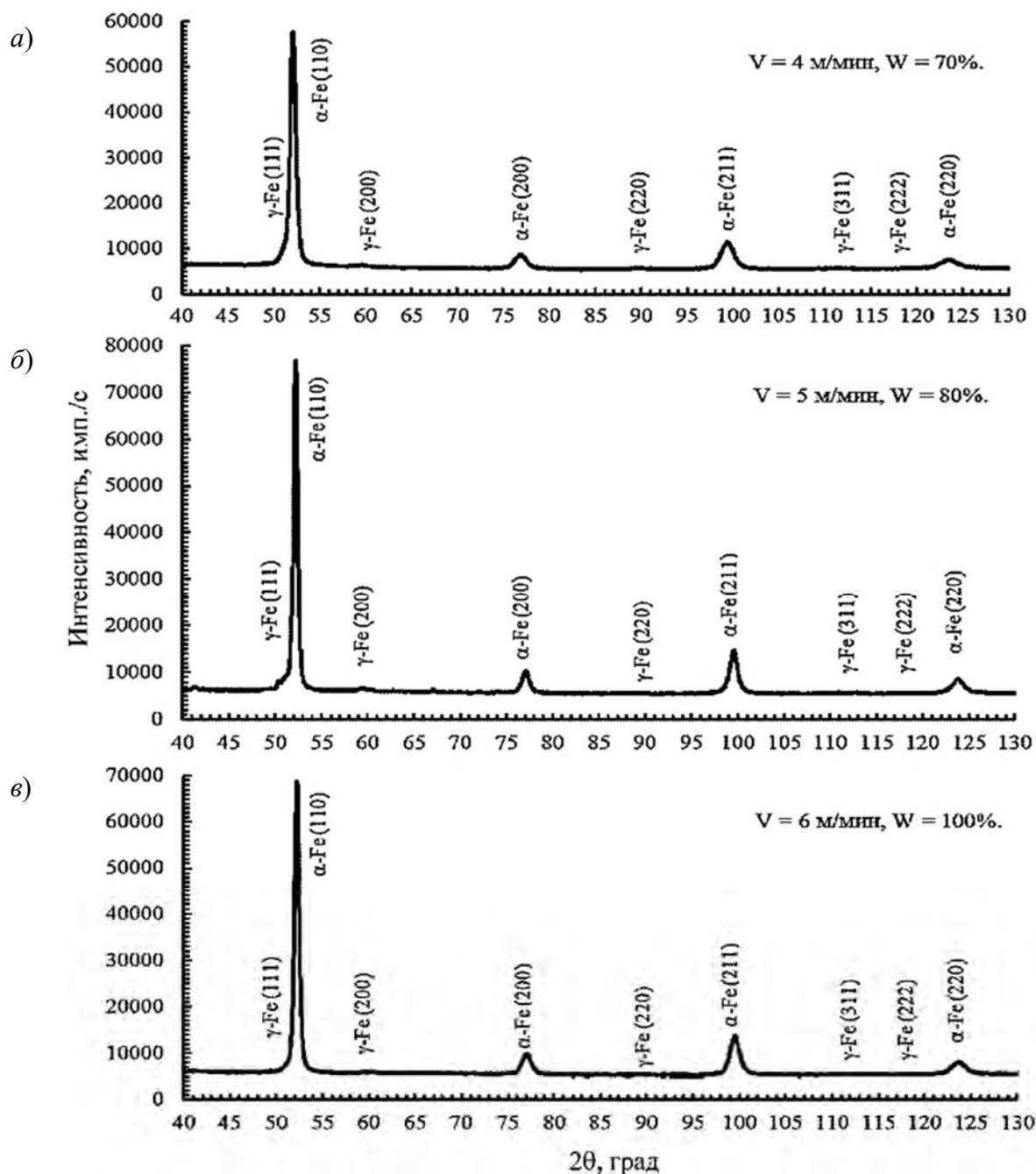


Рис. 4. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм поверхности образцов из стали 45 после закалки ТВЧ (56...57 кГц): а - $V = 4 \text{ мм/с}, W = 30 \text{ кВт}$; б - $V = 5 \text{ мм/с}, W = 34 \text{ кВт}$; в - $V = 6 \text{ мм/с}, W = 47 \text{ кВт}$

Табл. 2. Угловое положение дифракционных линий α -Fe, физическое уширение дифракционных линий (β), параметр кристаллической решетки (a), плотность дислокаций (ρ) и содержание остаточного аустенита ($A_{ост}$) в стали 45 после закалки ТВЧ (56...57 кГц) с различными скоростями (V , м/мин) и мощностями нагрева (W , %) (см. рис. 4)

Образец	Угловое положение дифракционных линий		β , 10^{-3} рад		a , нм	ρ , 10^{12} см $^{-2}$	$A_{ост}$, %
	(110)	(220)	(110)	(220)			
$V = 4$ мм/с, $W = 30$ кВт	52,28	123,69	14,6585	55,3884	0,2870	77,4	4,8
$V = 5$ мм/с, $W = 34$ кВт	52,23	123,92	8,2972	30,9890	0,2867	26,0	5,4
$V = 6$ мм/с, $W = 47$ кВт	52,25	123,79	10,5616	34,7928	0,2868	29,6	1,2

На основании анализа данных табл. 2 можно сделать вывод, что увеличение скорости перемещения индуктора и мощности ТВЧ приводит к снижению плотности дислокаций и содержания остаточного аустенита и, как правило, способствует росту твердости и износостойкости поверхности.

Обработка тлеющим разрядом приводит к снижению содержания остаточного аустенита с одновременным ростом плотности дислокаций, что свидетельствует о протекании полиморфного превращения γ -Fe \rightarrow α -Fe (рис. 5 и 6, табл. 3 и 4).

В ходе исследования была установлена зависимость приращения микротвердости от основных технологических параметров обработки тлеющим разрядом: напряжения горения, силы тока и времени воздействия. Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом второй степени, удовлетворяющим критерию ротатабельности и адекватно описывающим процесс в рамках заданных границ варьирования факторов. Статистическая обработка результатов позволила получить аналитические выражения для приращения микротвердости в натуральном масштабе, справедливые для следующих диапазонов режимов: напряжение горения – от 0,5 до 3,5 кВ, сила тока – от 20 до 80 мА, время обработки – от 10 до 50 мин. Визуализация математической модели представлена в виде гра-

фических зависимостей, демонстрирующих изменение приращения микротвердости под влиянием двух факторов при фиксированном значении третьего, соответствующем основному уровню плана эксперимента ($J = 0,25$ А/м 2 , $T = 30$ мин, $U = 2,0$ кВ), на рис. 7–9.

Анализ полученных данных позволил установить оптимальные сочетания режимов предварительной ТВЧ-обработки и последующего упрочнения тлеющим разрядом для достижения максимального прироста микротвердости. Как показано на рис. 7, наибольшее увеличение микротвердости на 59 % наблюдалось у образцов, обработанных токами высокой частоты со скоростью 4 мм/с и мощностью 30 кВт, после воздействия тлеющего разряда с параметрами: напряжение 1,25 кВ, плотность тока 0,125 А/м 2 и время обработки 45 мин. Для второго основного термического режима ТВЧ (скорость 5 мм/с, мощность 34 кВт) максимальный прирост составил 44 %, что достигается, согласно данным рис. 8, при напряжении разряда 1,25 кВ, плотности тока 0,250 А/м 2 и сокращенной до 15 мин выдержке. Наконец, при скорости перемещения индуктора 6 мм/с и мощности нагрева 47 кВт, как видно из рис. 9, пиковое увеличение микротвердости на 41 % обеспечивается следующими параметрами тлеющего разряда: напряжение 0,8 кВ, плотность тока 0,125 А/м 2 и время обработки 30 мин.

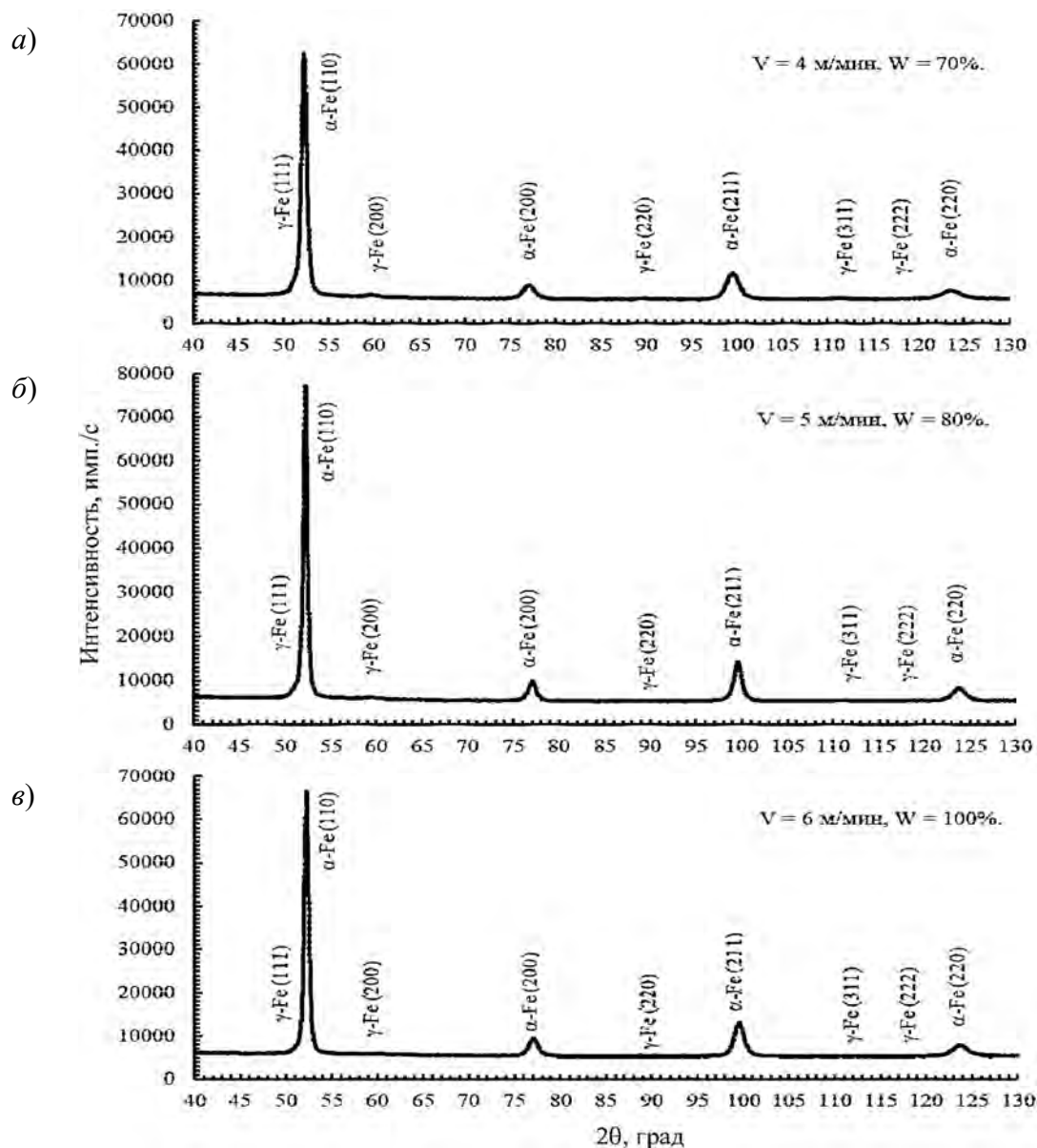


Рис. 5. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм поверхности образцов из стали 45 после закалки ТВЧ (56...57 кГц) и обработки в тлеющем разряде по режиму 1: *a* – $V = 4$ мм/с, $W = 30$ кВт; *б* – $V = 5$ мм/с, $W = 34$ кВт; *в* – $V = 6$ мм/с, $W = 47$ кВт

Табл. 3. Угловое положение дифракционных линий α -Fe, физическое уширение дифракционных линий (β), параметр кристаллической решетки (a), плотность дислокаций (ρ) и содержание остаточного аустенита ($A_{ост}$) в стали 45 после воздействия токами высокой частоты с различными скоростями (V , м/мин) и мощностями нагрева (W , %) образцов из стали 45 и обработки тлеющим разрядом по режиму 1 (см. рис. 5)

Образец	Угловое положение дифракционных линий		β , 10^{-3} рад		a , нм	ρ , 10^{12} см $^{-2}$	$A_{ост}$, %
	(110)	(220)	(110)	(220)			
$V = 4$ мм/с, $W = 30$ кВт	52,11	123,61	14,6541	54,4966	0,2871	80,9	4,4
$V = 5$ мм/с, $W = 34$ кВт	52,25	123,86	9,3231	35,0091	0,2867	33,0	4,9
$V = 6$ мм/с, $W = 47$ кВт	52,21	123,81	10,9208	38,7093	0,2868	39,0	1,0

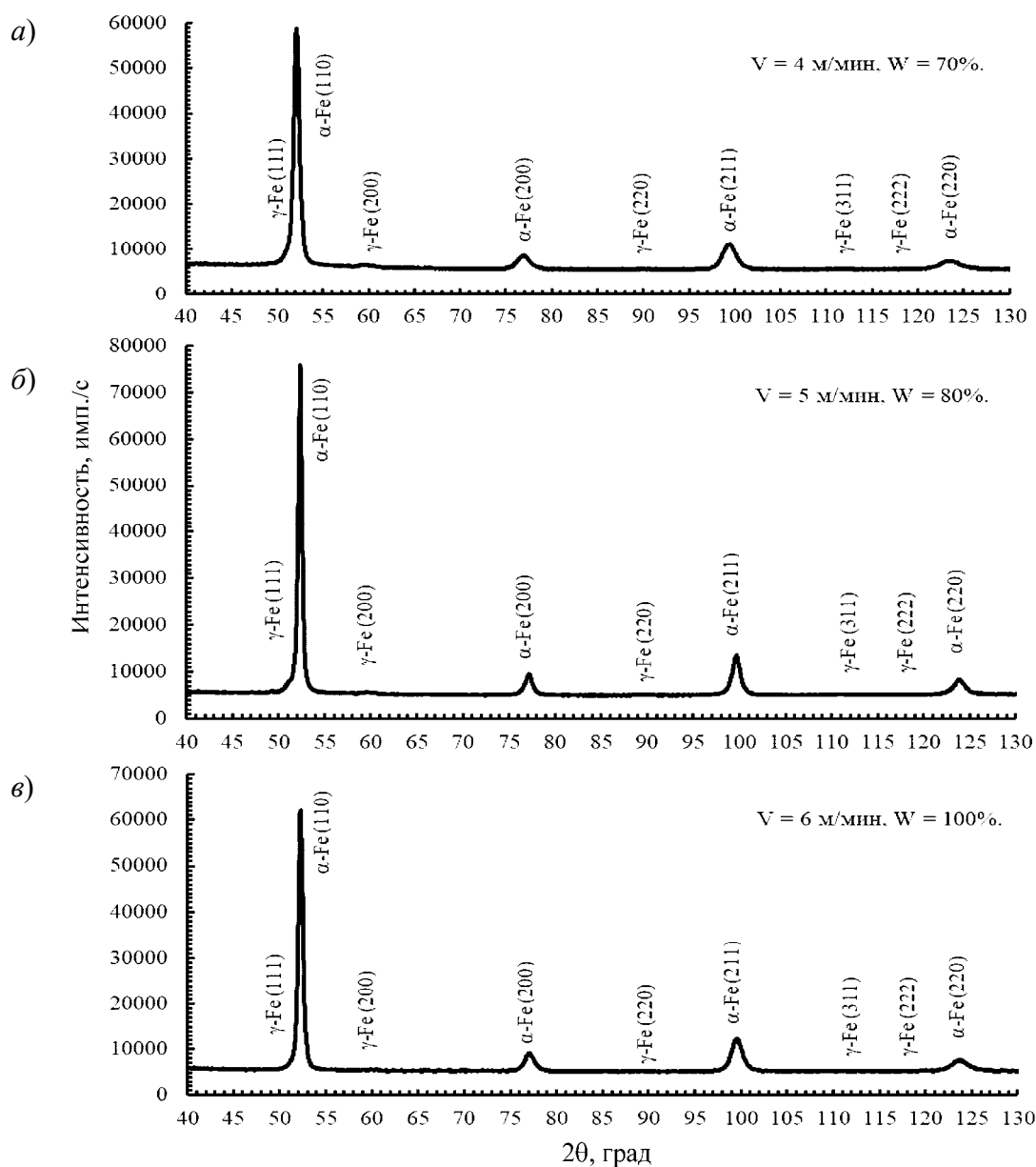


Рис. 6. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм поверхности образцов из стали 45 после закалки ТВЧ (56...57 кГц) и обработки в тлеющем разряде по режиму 2: а – V = 4 мм/с, W = 30 кВт; б – V = 5 мм/с, W = 34 кВт; в – V = 6 мм/с, W = 47 кВт

Табл. 4. Угловое положение дифракционных линий α-Fe, физическое уширение дифракционных линий (β), параметр кристаллической решетки (а), плотность дислокаций (ρ) и содержание остаточного аустенита (A_{ост}) в стали 45 после воздействия токами высокой частоты с различными скоростями (V, м/мин) и мощностями нагрева (W, %) образцов из стали 45 и обработки тлеющим разрядом по режиму 2 (см. рис. 6)

Образец	Угловое положение дифракционных линий		β, 10 ⁻³ рад		а, нм	ρ, 10 ¹² см ⁻²	A _{ост} , %
	(110)	(220)	(110)	(220)			
V = 4 мм/с, W = 30 кВт	52,14	123,61	14,8429	56,5826	0,2871	87,2	4,3
V = 5 мм/с, W = 34 кВт	52,36	123,96	8,9147	33,3833	0,2866	30,1	4,1
V = 6 мм/с, W = 47 кВт	52,30	123,82	10,9591	41,8679	0,2868	47,6	0,8

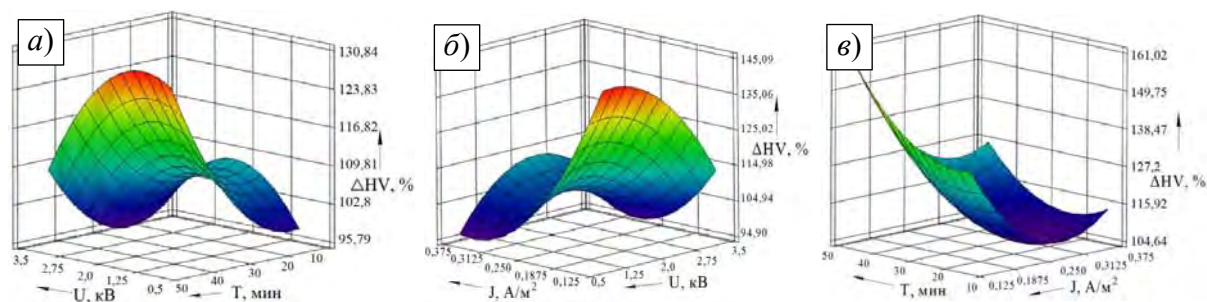


Рис. 7. Влияние технологических факторов обработки тлеющим разрядом на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов, упрочненных ТВЧ ($V = 4$ мм/с, $W = 30$ кВт): а – напряжения U , кВ, и времени обработки T , мин; б – напряжения U , кВ, и плотности тока J , А/м²; в – плотности тока J , А/м², и времени обработки T , мин

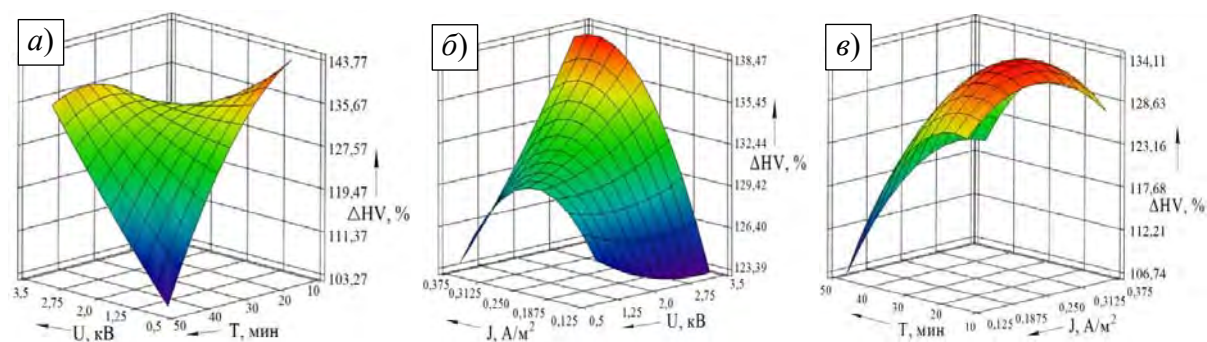


Рис. 8. Влияние технологических факторов обработки тлеющим разрядом на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов, упрочненных ТВЧ ($V = 5$ мм/с, $W = 34$ кВт): а – напряжения U , кВ, и времени обработки T , мин; б – напряжения U , кВ, и плотности тока J , А/м²; в – плотности тока J , А/м², и времени обработки T , мин

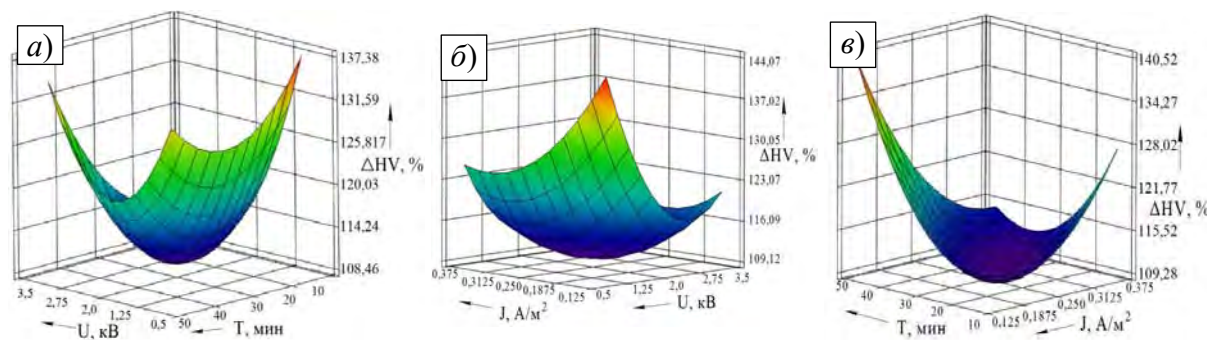


Рис. 9. Влияние технологических факторов обработки тлеющим разрядом на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов, упрочненных ТВЧ ($V = 6$ мм/с, $W = 47$ кВт): а – напряжения U , кВ, и времени обработки T , мин; б – напряжения U , кВ, и плотности тока J , А/м²; в – плотности тока J , А/м², и времени обработки T , мин

Заклучение

На основании проведенных исследований комбинированной обработки

конструкционной стали 45 токами высокой частоты с последующей модификацией тлеющим разрядом установлены основные закономерности структурно-

фазовых превращений и получен значительный упрочняющий эффект. Показано, что поверхностная закалка ТВЧ формирует градиентный слой с преимущественно мелкоигльчатый мартенситом, содержащим остаточный аустенит, глубина которого зависит от скорости перемещения индуктора и подводимой мощности.

Последующая обработка тлеющим разрядом, выступающая как метод вторичного структурообразования, интенсифицирует полиморфное превращение $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$, что приводит к снижению доли остаточного аустенита, росту плотности дислокаций и дополнительному увеличению микротвердости. Статистически обоснованная математическая модель позволила выявить оптимальные сочетания режимов. Наибольший прирост микротвердости на 59 % достигнут при предварительном ТВЧ-упрочнении со скоростью 4 мм/с и мощностью 30 кВт с последующей обработкой тлеющим

разрядом при напряжении 1,25 кВ, плотности тока 0,125 А/м² и времени 45 мин. Для других исследованных режимов ТВЧ также определены оптимальные параметры разряда, обеспечивающие максимальное упрочнение в диапазоне 41 %...44 %.

Обработку тлеющим разрядом можно рассматривать как метод вторичного структурообразования. Она позволяет проводить коррекцию микроструктуры, оптимизировать распределение упрочняющих компонентов, повышать плотность дефектов и контролировать фазовый состав в поверхностных слоях, предварительно модифицированных различными технологиями. Реализация такого комбинированного подхода является перспективным путем для целенаправленного создания градиентных материалов с заданным набором свойств, обеспечивающих повышенную износостойкость деталей машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шеменков, В. М.** Инженерия поверхностного слоя инструментальной оснастки тлеющим разрядом : монография / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, А. Н. Юманова. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2023. – 250 с.
2. **Шеменков, В. М.** Структурно-фазовое преобразование материалов тлеющим разрядом / В. М. Шеменков, Ф. М. Трухачев, И. И. Маковецкий // Вестник Объединенного института высоких температур. – 2019. – Т. 2, № 1. – С. 12–18.
3. **Шеменков, В. М.** Формирование модифицированных поверхностных слоев у инструментальных сталей тлеющим разрядом / В. М. Шеменков, И. И. Маковецкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 3 (68). – С. 109–117.
4. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и износостойкость сталей, подвергнутых химико-термической обработке / В. М. Шеменков, Ф. Г. Ловшенко, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2016. – № 1 (50). – С. 100–113.
5. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав, твердость и износостойкость быстрорежущей стали Р9 / В. М. Шеменков, М. А. Белая, О. В. Обидина, А. Э. Липский // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 535–541.
6. **Рабыко, М. А.** Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 23–31.

Статья сдана в редакцию 20 января 2026 года

Контакты:

vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович);
ann.yumanova@mail.ru (Юманова Анна Николаевна);
belay-marina@yandex.by (Рабыко Марина Александровна).

V. M. SHEMENKOV, A. N. YUMANOVA, M. A. RABYKO

STRUCTURAL-PHASE MODIFICATION BY GLOW DISCHARGE OF SURFACE LAYERS IN MACHINE PARTS OBTAINED BY ELECTROMAGNETIC RADIATION EXPOSURE

Abstract

The article presents the results of a study into a combined method for hardening 45 structural steels, based on the sequential application of surface hardening by high-frequency currents (HFC) and glow discharge treatment. Optimal combinations of modes have been determined, ensuring a maximum microhardness increase of up to 59 %; which is achieved with HFC hardening at a speed of 4 mm/s and a power of 30 kW, followed by the treatment in a glow discharge at a voltage of 1,25 kV, current density of 0,125 A/m², and with a duration of 45 minutes. The findings confirm that the proposed combined technology is an effective method for the targeted formation of gradient surface layers with increased wear resistance for critical machine-building components.

Keywords:

surface hardening, glow discharge, high-frequency currents, 45 structural steel, microhardness, wear resistance, structural-phase state, combined technologies, surface layer.

For citation:

Shemenkov, V. M. Structural-phase modification by glow discharge of surface layers in machine parts obtained by electromagnetic radiation exposure / V. M. Shemenkov, A. N. Yumanova, M. A. Rabyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 1 (90). – P. 54–64.