

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-4-68-78

УДК 621.787

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

**А. Н. ЮМАНОВА**

**М. А. РАБЫКО**, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## СКИН-ЭФФЕКТ КАК ФАКТОР УПРАВЛЕНИЯ ГЛУБИНОЙ УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ В ИМПУЛЬСНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

### Аннотация

Исследовано влияние обработки импульсным тлеющим разрядом на твердость и глубину упрочненного слоя образцов из сталей 40Х13, X12МФ и Р6М5. Показано, что ключевым преимуществом импульсного тлеющего разряда, по сравнению с классическим тлеющим разрядом, является возможность управления глубиной модифицированного слоя за счет подбора частоты горения разряда, которая определяется удельными электрофизическими свойствами материала. Установлено, что использование оптимальной частоты позволяет увеличить глубину упрочненного слоя до 100 % при незначительном снижении (~3 %) поверхностной микротвердости и обеспечить плавный градиент твердости от поверхности к сердцевине.

### Ключевые слова:

импульсный тлеющий разряд, упрочнение поверхностного слоя, износостойкость, микротвердость, быстрорежущая сталь, штамповальная сталь, глубина упрочненного слоя, частота разряда, скин-эффект, инструментальная оснастка.

### Для цитирования:

Шеменков, В. М. Скин-эффект как фактор управления глубиной упрочнения инструментальных сталей в импульсном тлеющем разряде / В. М. Шеменков, А. Н. Юманова, М. А. Рабыко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 4 (89). – С. 68–78.

### Введение

Современное машиностроение характеризуется постоянно возрастающими требованиями к эксплуатационным характеристикам инструментальных и конструкционных материалов. Особое значение в условиях интенсивного трибомеханического нагружения приобретают свойства приповерхностного слоя, который во многом определяет долговечность и надежность изделий. В этом контексте технология обработки импульсным тлеющим разрядом представляет особый интерес как перспективный метод модифицирования поверхностных слоев. Как отмечается в [1], традиционные способы повышения стойкости инструментальных материалов, такие как поверхностная термообработка, химико-термическая обработка и нанесение покрытий, во

многих случаях не обеспечивают необходимой износостойкости или являются технологически неприемлемыми. Это обуславливает актуальность разработки новых ионно-плазменных методов обработки, позволяющих формировать упрочненные слои с функциями диффузионных барьеров, уменьшающих трение и износ инструмента.

Необходимость совершенствования методов поверхностного упрочнения особенно очевидна при рассмотрении современных тенденций в металлообработке, связанных с появлением новых труднообрабатываемых материалов и применением станков с числовым программным управлением. Эти факторы повышают требования к работоспособности и надежности инструмента, что, в свою очередь, стимулирует поиск новых решений в области модификации рабочих поверхностей. Об-

работка тлеющим разрядом, как один из методов ионно-плазменной обработки, позволяет получать упрочненные слои, которые служат эффективными барьерами против износа, снижают усилия резания и деформирования.

### ***Аспекты обработки материалов импульсным тлеющим разрядом***

Обработка тлеющим разрядом, исходя из физических основ процесса, представляет собой сложное многокомпонентное взаимодействие плазменной среды с поверхностью материала. При подаче высоковольтных импульсов напряжения 0,5...3 кВ между электродами в вакуумной камере происходит ионизация остаточных газов с образованием низкотемпературной плазмы. Согласно исследованиям [2], этот процесс, осуществляемый при давлениях от 1,33 до 13,33 Па, приводит к формированию уникальных структурно-фазовых состояний в приповерхностных слоях, инициируя радиационно-стимулированную диффузию и активируя структурные превращения.

Механизмы модифицирующей обработки инструментальных материалов в тлеющем разряде сходны с процессами, протекающими при низкотемпературной ионной имплантации, с той разницей, что в качестве источника ионов используется среда остаточных атмосферных газов [1]. Это обеспечивает изменение свойств поверхностных слоев, что в конечном итоге приводит к повышению поверхностной твердости и износостойкости материалов. Важным преимуществом данного метода является возможность получения более высокой стойкости и износостойкости по сравнению с существующими технологиями, а также сокращение общей продолжительности процесса упрочнения благодаря отсутствию операций подогрева, нагрева и охлаждения изделий.

Развивая представления о механизмах обработки, следует особо выде-

лить переход от режимов постоянного тока к импульсным режимам с управляемой частотой, что представляет собой качественно новый этап в развитии технологии. Как демонстрируют исследования [3], использование специализированных установок, генерирующих импульсы с частотой 1...150 кГц, открывает принципиально новые возможности управления глубиной модифицированного слоя. Физической основой этого явления служит поверхностный эффект (скин-эффект), математически описываемый в [4].

На основании представленной в [4] математической зависимости установлено, что частота горения тлеющего разряда определяет глубину активного слоя через электрофизические параметры материала, такие как удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость. Это фундаментальное соотношение позволяет перейти от эмпирического подхода к расчетным методам проектирования поверхностных свойств инструментальных материалов, что значительно повышает точность и воспроизводимость технологического процесса. Практическая реализация данной зависимости требует тщательного подбора частотных характеристик в зависимости от обрабатываемого материала, что открывает широкие возможности для оптимизации технологических процессов.

Обращаясь к вопросам моделирования, следует отметить, что компьютерное моделирование в среде ANSYS [3] подтверждает формирование двухзонной структуры с неравномерным распределением плотности тока. Моделирование демонстрирует наличие области постоянной плотности тока, соответствующей глубине активного воздействия, определяемой скин-эффектом, и переходной зоны с градиентным уменьшением плотности тока. Важным выводом является независимость картины распределения от природы материала, что позволяет разрабатывать уни-

версальные технологические режимы.

Параметрическое моделирование, позволяющее в полной мере получить полную картину упрочнения импульсным разрядом, связано с рядом трудностей, прежде всего с большим количеством параметров, которые необходимо учитывать при создании аналитической системы. Геометрия разряда, ток и напряжение, давление и вакуумная система, газовый состав, условия генерации ионов из разрядного пространства – все эти параметры следует учитывать и регистрировать для получения сильного и стабильного аналитического сигнала. Модели, описывающие процессы в импульсном тлеющем разряде, весьма сложны, поэтому появляется необходимость использования профессиональных пакетов численного моделирования, таких как ANSYS, основанный на методе конечных элементов.

Практическая значимость оптимизации частотных параметров проявляется в существенном улучшении механических характеристик: согласно [7, 10], для различных материалов достигается повышение микротвердости на 15 %...30 % и увеличение износостойкости в 1,5–3 раза. В частности, для быстрорежущей стали Р9 обработка с оптимальными параметрами обеспечивает повышение микротвердости на 20 % и увеличение износостойкости в 1,7 раза [7].

Анализируя полученные результаты структурно-фазовых исследований, следует отметить, что они убедительно демонстрируют выраженную корреляцию между параметрами тлеющего разряда и глубиной модифицированного слоя для различных классов сталей. Так, согласно [5], для быстрорежущих сталей увеличение частоты разряда с 50 до 150 кГц приводит к уменьшению глубины упрочненного слоя со 100 до 50 мкм. Параллельно в [6] для штамповых сталей экспериментально установлена степенная зависимость, подтверждающая универсаль-

ность наблюдаемых закономерностей.

Эти структурные изменения, как показано в [7], сопровождаются диспергированием карбидной фазы с уменьшением среднего размера частиц карбидов и снижением плотности дефектов кристаллической структуры, что проявляется в уменьшении физического уширения дифракционных линий мартенситной фазы. Полученные результаты свидетельствуют о комплексном характере происходящих структурных преобразований, затрагивающих как карбидную фазу, так и металлическую матрицу.

Проведенные экспериментальные исследования микротвердости по глубине образцов показали, что полученные теоретические значения глубины «активного слоя» сопоставимы с экспериментальными результатами. Это подтверждает адекватность используемой физической модели и возможность ее практического применения для прогнозирования результатов обработки. Особенно важно, что данная зависимость проявляется для различных классов сталей, что свидетельствует об универсальности механизма воздействия.

Необходимо отдельно отметить универсальный характер микроструктурных изменений для различных классов материалов. В [8] продемонстрированы диспергирование титановых частиц и модификация дислокационной структуры в защитных покрытиях на основе TiC и TiN, тогда как в [2] для цементированной стали 20 наблюдается формирование структуры мелкоигольчатого мартенсита. Для штамповых сталей, согласно [9], обработка приводит не только к измельчению карбидной фазы на глубину до 70...80 мкм, но и к сферидизации карбидных включений, что существенно улучшает эксплуатационные характеристики.

Особого внимания заслуживает наблюдаемое полиморфное превращение  $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$  с соответствующим уменьшением содержания остаточного

аустенита для цементированной стали 20 [2], что вносит значительный вклад в упрочнение поверхностного слоя и определяет конечные эксплуатационные свойства обработанных материалов. Эти превращения сопровождаются изменением параметра решетки  $\alpha$ -фазы и снижением величины физического уширения дифракционных линий, что свидетельствует о снижении степени дефектности кристаллической структуры.

Анализируя механизмы упрочнения, можно выделить несколько взаимосвязанных процессов, протекающих при обработке импульсным тлеющим разрядом. Первичным механизмом является диспергирование карбидной фазы и ее равномерное распределение в металлической матрице, что приводит к упрочнению за счет механизма Орована. Второй важный аспект – это уменьшение плотности дислокаций и снижение внутренних напряжений, что способствует повышению стабильности материала при циклических нагрузках. Третий существенный фактор – полиморфные превращения, приводящие к образованию более стабильных структурных состояний.

Рассматривая технологические аспекты, необходимо подчеркнуть важность оптимизации многопараметрических режимов обработки, учитывающих взаимовлияние частотных, энергетических и временных характеристик разряда. Как следует из [3, 5], максимальная эффективность упрочнения достигается при согласовании частотных параметров с электрофизическими свойствами обрабатываемого материала. Для сталей с различным удельным сопротивлением и магнитной проницаемостью требуются индивидуальные подходы к выбору оптимальной частоты импульсов.

Особый интерес представляет разработка методов комбинированной обработки, включающей последовательное воздействие импульсного тле-

ющего разряда с различными частотными параметрами для создания многослойных структур с заданным распределением свойств по глубине. Такие структуры позволяют сочетать высокую твердость поверхностного слоя с вязкостью подложки, что особенно важно для инструмента, работающего в условиях ударных нагрузок. Кроме того, комбинированная обработка позволяет создавать градиентные переходы между модифицированным слоем и основным материалом, снижая вероятность отслоения упрочненного слоя.

Важным технологическим аспектом является также контроль температуры в процессе обработки. Как показано в [7], температура в камере во время плазменной обработки контролируется и не превышает 373 К, что предотвращает нежелательные структурные изменения в основном материале и сохраняет его первоначальные свойства. Это особенно важно для инструментальных сталей, прошедших специальную термическую обработку.

Как показали вышеупомянутые результаты исследования структуры и фазового состава изделий из сталей, механизм их упрочнения при обработке импульсным тлеющим разрядом аналогичен механизму упрочнения при обработке как классическим тлеющим разрядом, так и разрядом с прикатодным магнитным полем. Отличительной и определяющей особенностью упрочнения импульсным тлеющим разрядом, которую подробно рассмотрим далее, является влияние частоты горения разряда на глубину упрочненного слоя.

Указанная особенность делает незаменимым процесс упрочнения импульсным тлеющим разрядом при проектировании инструментальной оснастки, чьи рабочие размеры (диаметр, высота) являются критически важными параметрами для получения готового изделия (протяжки, долбыки, штампы, пресс-формы), где количество и глуби-

на переточек не может быть больше установленного лимита, при превышении которого инструмент не сможет производить годную продукцию.

Традиционные методы упрочнения тлеющим разрядом за счет своей неуправляемости могут создавать либо слишком глубокий, либо слишком тонкий упрочненный слой, который неоптимален для данного конкретного инструмента.

Предлагаемый способ за счет использования импульсного тлеющего разряда позволяет получить упрочненный слой «на заказ». Конструктор на стадии проектирования может рассчитать, насколько инструмент можно будет перетачивать в течение его жизненного цикла, а затем с помощью подбора частоты и других параметров тлеющего разряда создать упрочненный слой точно такой глубины.

Он позволяет встроить процесс упрочнения в жесткие конструктивные ограничения ответственного инструмента, гарантуя, что каждая возможная переточка будет эффективной и инструмент выработает свой полный ресурс, не будучи забракованным из-за исчерпания запаса материала на упрочненном слое. Это повышает надежность, предсказуемость и экономическую эффективность использования дорогостоящей инструментальной оснастки.

Целью работы является установление влияния технологических факторов обработки импульсным тлеющим разрядом на твердость и глубину упрочненного слоя образцов из сталей.

### *Описание эксперимента*

В качестве объекта исследования были выбраны образцы-свидетели кубической формы со стороной 15 мм из:

1) стали 40Х13 ГОСТ 5632–2014 промышленной плавки, подвергнутые закалке в масле с 1050 °С (выдержка 1 ч 30 мин) с последующим отпуском

при 450 °С в течение 1,5 ч;

2) стали Х12МФ ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки, подвергнутые закалке в масле с 970 °С (выдержка 1 ч 30 мин) с последующим отпуском при 180 °С в течение 1,5 ч;

3) стали Р6М5 ГОСТ 19265–73 промышленной плавки, подвергнутые закалке в масле от 1220 °С (выдержка 1 ч 30 мин в печи с чугунной стружкой) с последующим трехкратным отпуском при 560 °С в течение 2 ч.

Применялся дюрометрический анализ для определения микротвердости поверхностных слоев. Измерение микротвердости производилось на твердомере Zwick Roell ZHV 1M. К индентору прикладывалась нагрузка 0,98 Н.

Проводилось сравнение полученных результатов глубины упрочненного слоя, получаемого при обработке классическим тлеющим разрядом и импульсным.

Обработка образцов проводилась по оптимальным режимам, обеспечивающим максимальное приращение поверхностной микротвердости (табл. 1) как в классическом тлеющем разряде, так и в импульсном тлеющем разряде совместно с упрочняемыми по заказу предприятий инструментами из такого же материала.

Частоту импульсного разряда определяли исходя из необходимости обеспечения глубины упрочненного слоя и согласно технологическим параметрам, зависящим от типа инструментальной оснастки и основных электрофизических параметров обрабатываемого материала упрочняемого инструмента.

Требуемая частота горения разряда определялась в соответствии с формулой [11]

$$\nu = \frac{\rho_{\varTheta}}{\delta^2 \pi \mu \mu_0}, \quad (1)$$

где  $\rho_s$  – удельное электрическое сопротивление материала изделия,  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\delta$  – глубина модифицированного слоя,  $\text{м}$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала изделия. К примеру, для стали

$\mu \approx 100$  при индуктивности магнитного поля не более 0,002 Тл;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н}\cdot\text{А}^{-2}$ .

Табл. 1. Режимы обработки образцов в тлеющем разряде и основные физические свойства сталей при температуре 20 °C

Сталь	Оптимальный параметр тлеющего разряда			Удельное электрическое сопротивление $\rho_s$ , $10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Коэффициент теплопроводности $K$ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Удельная теплоемкость $C$ , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$
	Напряжение горения $U$ , кВ	Плотность тока $J$ , $\text{А}/\text{м}^2$	Время упрочнения $T$ , мин			
Сталь 40Х13	2,7	0,25	30	62,5	25...28	460...500
Сталь Х12МФ	3,2	0,25	30	57,5	20...25	460...480
Сталь Р6М5	3,2	0,25	30	45,0	20...24	430...470

### Основная часть

Анализ микротвердости по глубине упрочненных образцов-свидетелей показал, что использование тлеющего разряда с необходимой частотой

горения для получения необходимого значения глубины упрочненного слоя (к примеру, 150 мкм) у образцов из конкретных материалов очень перспективно (рис. 1–3).

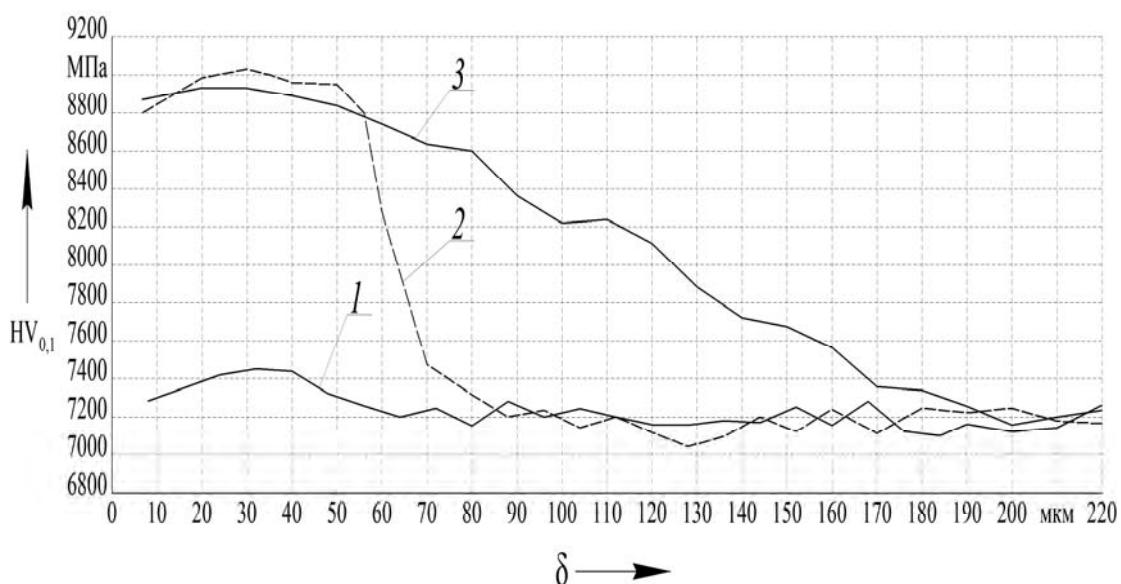


Рис. 1. Микротвердость поверхностного слоя образцов из стали 40Х13: 1 – до упрочнения; 2 – упрочненного классическим тлеющим разрядом; 3 – упрочненного тлеющим разрядом с оптимальной частотой горения (40...45 кГц)

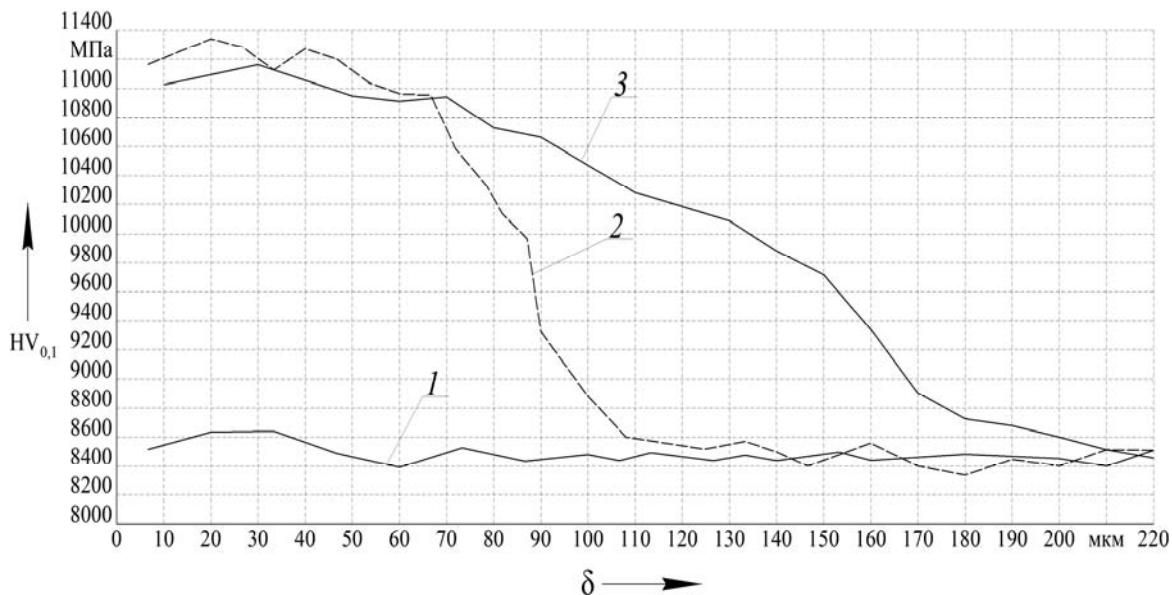


Рис. 2. Микротвердость поверхностного слоя образцов из стали X12МФ: 1 – до упрочнения; 2 – упрочненного классическим тлеющим разрядом; 3 – упрочненного тлеющим разрядом с оптимальной частотой горения (35...40 кГц)

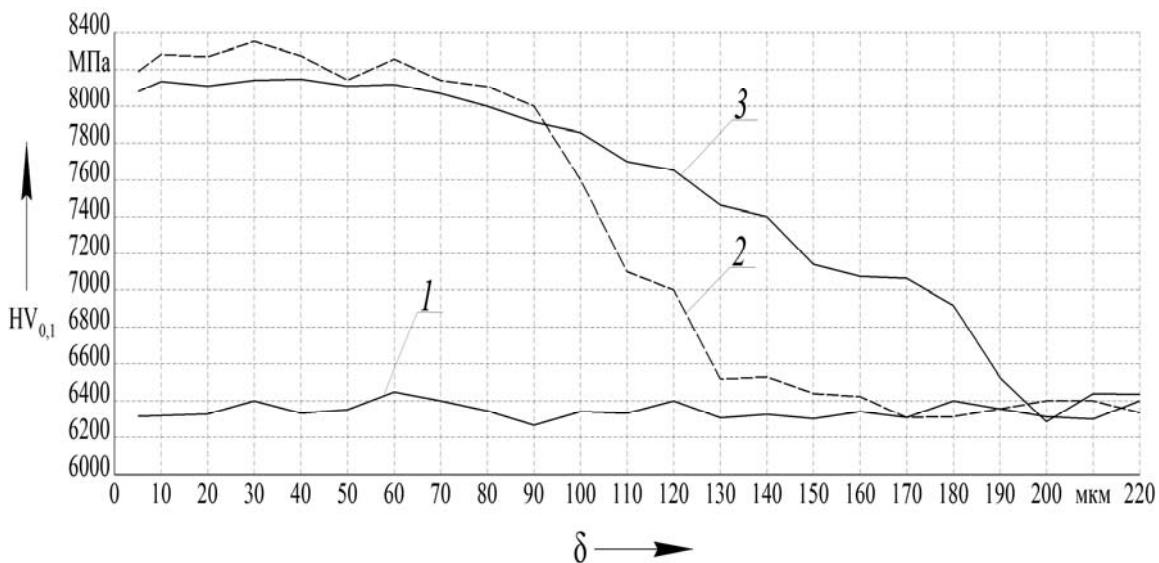


Рис. 3. Микротвердость поверхностного слоя образцов из стали Р6М5: 1 – до упрочнения; 2 – упрочненного классическим тлеющим разрядом; 3 – упрочненного тлеющим разрядом с оптимальной частотой горения (25...30 кГц)

Как видно из анализа полученных результатов, установление оптимального значения частоты горения тлеющего разряда при упрочнении приводит к увеличению глубины упрочненного слоя до 100 % вместе с уменьшением

микротвердости на поверхности образцов в среднем на 3 %. Кроме этого, изменение твердости от поверхности до сердцевины упрочняемого образца несет монотонно убывающий характер без ярко выраженных резких падений,

что наблюдается при упрочнении классическим тлеющим разрядом.

### Результаты производственных испытаний

В результате реализации мероприятия «Разработка технологии и оборудования для упрочнения осевого и плоского протяжного инструмента (протяжек) из быстрорежущих стальей» по задачнику от промышленно-

сти на 2024 год (п. 93) на ОАО «Минский тракторный завод» было проведено упрочнение комплекта наружных протяжек 2459-5414/15/16 из стали Р6М5 ГОСТ 19262-73 (рис. 4) классическим тлеющим разрядом и комплекта протяжек импульсным тлеющим разрядом с установленной оптимальной частотой горения разряда для достижения глубины упрочненного слоя, равной 150 мкм.



Рис. 4. Общий вид комплекта протяжек

Испытания проводились на полуавтомате протяжном вертикальном 7633 при обработке деталей водилом 1221-2407Б36-Б. Режимы резания: глубина  $t = 1$  мм, длина резания  $L_{рез} = 1410$  мм, скорость  $V = 1,45$  м/мин.

По наступлению технологического износа, равного 0,15 мм, протяжки перетачивались. Переточка проводилась по передним поверхностям зубьев, далее осуществлялось протягивание поверхностей деталей до появления из-

носа с последующей переточкой. Переточка выполнялась 4 раза.

Результаты испытаний представлены в табл. 2.

В результате сотрудничества с ОАО «Могилевлифтмаш» было произведено упрочнение двух партий блоков пробивки 1700-5394 пазов ротора двигателя. Блок пробивки состоит из пuhanсона и матрицы, изготовленных из стали Х12МФ (рис. 5).

Табл. 2. Результаты испытаний на износостойкость комплектов протяжек

Вид тлеющего разряда при упрочнении	Номер переточки и значение повышения износостойкости				Среднее значение
	0	1	2	3	
Классический	51 %	22 %	6 %	—	20 %
Импульсный	40 %	33,3 %	25 %	10 %	27 %

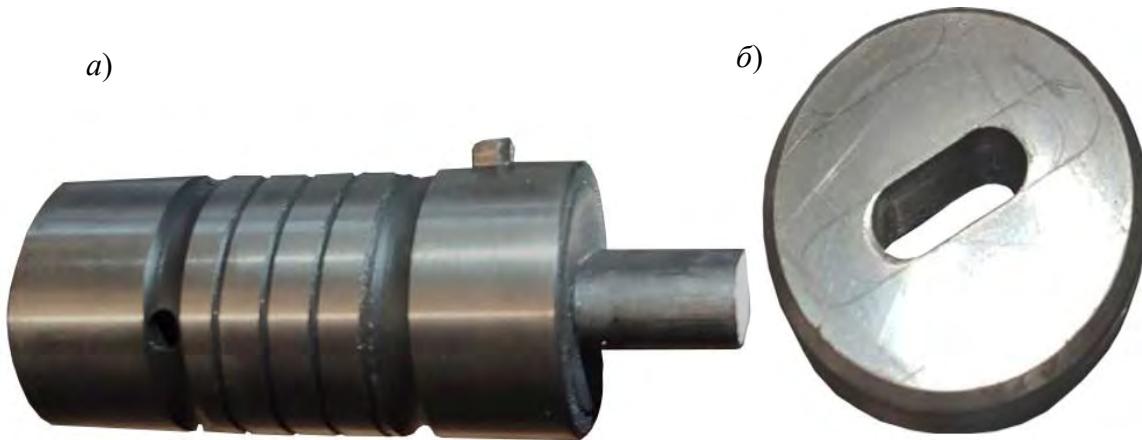


Рис. 5. Пуансон (а) и матрица (б) блока пробивки 1700-5394 пазов ротора двигателя

Испытания проводились в условиях реального производства на пазовырубном прессе Schuler N8S (инв. № 33289) при пробивке пазов в листе ротора двигателя АИР 180.6 (84 паза). В качестве критерия определения стойкости упрочненных блоков выступало базовое количество пробитых пазов, соответствующее среднему значению наработки на отказ блока, равное 59976 ударов (714 заготовок листов ротора).

Технологическим критерием для приостановления испытаний являлся

получаемый по поверхности вырубки заусенец. Переточка проводилась по передним поверхностям пуансона и матрицы на величину 0,1 мм. Далее осуществлялась вырубка деталей до появления заусенца с последующей переточкой. Переточка выполнялась 20 раз.

В ходе испытаний было выявлено, что стойкость блоков, прошедших упрочнение тлеющим разрядом, оказалась выше по сравнению с неупрочненными.

Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Табл. 3. Результаты испытаний на износостойкость блоков пробивки

Вид тлеющего разряда при упрочнении	Номер переточки и значение повышения износостойкости				Среднее значение
	0	1	2	3	
Классический	470 %	140 %	20 %	—	158 %
Импульсный	450 %	260 %	60 %	22 %	198 %

Как видно из анализа полученных результатов, установление оптимального значения частоты горения тлеющего разряда при упрочнении приводит к повышению эффективности процесса на 25 %...30 % в зависимости от условий использования упрочняемой инструментальной оснастки.

### **Заключение**

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность технологии упрочнения импульсным тлеющим разрядом для инструментальных сталей. Главным технологическим преимуществом данного метода является возможность целенаправленного управления глубиной упрочненного слоя за счет регулирования частоты горения разряда, которая рассчитывается на основе электрофизических свойств обрабатываемого материала. Установлено, что переход от эмпирического подхода к расчетному методу определения глубины упрочнения на основе скин-эффекта позволяет с высокой точностью формировать слой заданной толщины, что невозможно при использовании классического тлеющего разряда. Оптимизация частотных параметров обеспечивает значительное увеличение

глубины упрочненного слоя при одновременном формировании благоприятного плавного градиента твердости без резких переходов, что повышает усталостную прочность инструмента. Происходящие структурно-фазовые преобразования, такие как диспергирование карбидов и полиморфные превращения, приводят к значительному повышению микротвердости и износостойкости поверхностного слоя.

Практическая значимость технологии доказана производственными испытаниями, которые показали повышение стойкости инструмента в среднем на 25 %...30 % и обеспечение стablyно высокой производительности на протяжении большего количества переточек. Таким образом, технология импульсного тлеющего разряда представляет собой качественно новый уровень поверхностного упрочнения, позволяющий встраивать процесс модификации в жесткие конструктивные ограничения ответственного инструмента, что обеспечивает максимальную реализацию его ресурса и повышает надежность и экономическую эффективность использования дорогостоящей инструментальной оснастки в машиностроении.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шеменков, В. М. Структурные изменения в поверхностных слоях однокарбидных твердых сплавов при их обработке в тлеющем разряде / В. М. Шеменков, Г. Ф. Ловшенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 1 (26). – С. 121–130.
2. 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.
3. Юманова, А. Н. Имитационное моделирование воздействия тлеющего разряда различной частоты горения на поверхностный слой упрочняемых изделий / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 81–90.
4. Юманова, А. Н. К вопросу определения глубины модифицированного слоя, формируемого обработкой импульсным тлеющим разрядом / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков // Тез. докл. 56 Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, Витебск, 19 апр. 2023 г. – Витебск : Витеб. гос. технол. ун-т, 2023. – С. 246–247.
5. Елисеева, А. Н. Установление влияния частоты горения импульсного тлеющего разряда на глубину структурно-фазовых превращений в быстрорежущих сталях / А. Н. Елисеева, В. М. Шеменков, М. А. Рабыко // Актуальные проблемы науки и техники : материалы II Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию ИМИ-ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск : УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 137–139.

6. Елисеева, А. Н. Газовый импульсный разряд как источник модифицирования поверхностных слоев металлических материалов / А. Н. Елисеева, В. М. Шеменков // Актуальные проблемы науки и техники : материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Сарапул, 20–22 мая 2021 г. – Ижевск : УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – С. 139–141.
7. 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.
8. Шеменков, В. М. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и твердость износостойких защитных покрытий на основе титана / В. М. Шеменков, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2017. – № 4 (57). – С. 118–127.
9. Рабыко, М. А. Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 23–31.
10. Обработка тлеющим разрядом как перспективный метод улучшения эксплуатационных свойств инструментальных материалов / М. А. Рабыко, А. Н. Елисеева, С. В. Верещак [и др.] // Новые материалы и технологии : сб. науч. ст. VI Рос.-Казахстан. молодежной науч.-техн. конф., Барнаул, 13 дек. 2018 г. – Барнаул : Алтайский гос. ун-т, 2018. – С. 212–217.
11. 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.

Статья сдана в редакцию 14 октября 2025 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. YUMANNOVA, M. A. RABYKO**

## **SKIN EFFECT AS A FACTOR IN CONTROLLING DEPTH OF HARDENING IN TOOL STEELS TREATED BY A PULSED GLOW DISCHARGE**

### **Abstract**

The article investigates the effect of pulsed glow discharge treatment on the hardness and depth of the hardened layer of 40Kh13, Kh12MF, and R6M5 steel samples. It is shown that the key advantage of a pulsed glow discharge over a conventional glow discharge is the ability to control the depth of the modified layer by selecting the discharge burning frequency, which is determined by the specific electrophysical properties of the material. It has been established that the use of the optimal frequency makes it possible to increase the depth of the hardened layer by up to 100 % with a slight decrease (~3 %) in surface microhardness, and to ensure a smooth hardness gradient from the surface to the core.

### **Keywords:**

pulsed glow discharge, surface layer hardening, wear resistance, microhardness, high-speed steel, die steel, depth of hardened layer, discharge frequency, skin effect, tooling.

### **For citation:**

Shemenkov, V. M. Skin effect as a factor in controlling depth of hardening in tool steels treated by a pulsed glow discharge / V. M. Shemenkov, A. N. Yumanova, M. A. Rabyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 4 (89). – P. 68–78.