

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-3-86-100

УДК 621.9.047: 621.787

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

М. А. РАБЫКО¹, канд. техн. наук, доц.

А. Н. ЮМАНОВА¹

А. Л. ШЕМЕНКОВА²

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²ОАО «Могилевский завод лифтового машиностроения» (Могилев, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования влияния обработки тлеющим разрядом в различных конфигурациях на износостойкость и глубину упрочнённого слоя образцов из штамповых сталей 5ХЗВЗМФС, Х12МФ и конструкционной стали 40Х13. Сравниваются три режима: классический тлеющий разряд, тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем и тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем с использованием эффекта полого катода. Установлено, что применение эффекта полого катода позволяет увеличить коэффициент износостойкости до значений 2,14...2,30, что в 1,2 раза выше, чем при обработке только с магнитным полем, и в 1,5–1,7 раза выше по сравнению с классическим тлеющим разрядом. Глубина упрочнённого слоя достигает 110...120 мкм, что в 1,5–2,2 раза превышает аналогичный показатель для классической обработки.

Ключевые слова:

тлеющий разряд, полый катод, магнитное поле, износостойкость, микротвердость, поверхностное упрочнение, штамповые стали.

Для цитирования:

Влияние обработки тлеющим разрядом в магнитном поле с эффектом полого катода на эксплуатационные свойства инструментальных сталей / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, А. Н. Юманова, А. Л. Шеменкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 3 (92). – С. 86–100.

Введение

Повышение эксплуатационной стойкости металлообрабатывающего и штампового инструмента, функционирующего в условиях интенсивных контактных нагрузок, циклических перепадов температур и абразивного износа, остаётся одной из приоритетных задач современного материаловедения и машиностроения. Ресурс таких изделий, как штампы горячего и холодного деформирования, пресс-формы, пуансоны и матрицы, лимитируется преимущественно состоянием поверхностного слоя, поскольку именно с поверхности под действием трения, ударов и локального нагрева инициируются усталостные трещины, выкрашивание и катастрофи-

ческий износ. Традиционная объёмная термическая обработка (закалка с последующим отпускком) позволяет достичь высоких значений твердости по всему сечению детали, однако она не обеспечивает формирования градиента механических свойств, при котором вязкая сердцевина сопротивляется хрупкому разрушению, а сверхтвёрдый поверхностный слой противостоит износу. Более того, при закалке сложнопрофильного инструмента неизбежны коробление, образование окалины и обезуглероживание поверхности, что требует дополнительной дорогостоящей механической обработки.

Описанные выше проблемы стимулировали активное развитие методов поверхностного модифицирования с

использованием низкотемпературной плазмы. Среди промышленных технологий наибольшее распространение получили ионное азотирование, цементация, борирование, а также нанесение износостойких покрытий методами PVD и CVD. Однако каждый из этих методов имеет существенные недостатки: высокотемпературный нагрев ($500\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) вызывает отпуск сердцевины и деформации; необходимость применения токсичных или дорогих реакционных газов усложняет оборудование и повышает эксплуатационные затраты; длительность обработки (часы и десятки часов) снижает производительность; наконец, недостаточная адгезия нанесенных покрытий к основе приводит к их отслаиванию при реальных контактных нагрузках. Альтернативой перечисленным технологиям выступает обработка тлеющим разрядом в вакуумной среде без принудительного введения газов-реагентов, позволяющая модифицировать сам поверхностный слой материала за счет ионной бомбардировки. При этом формируется градиентный упрочнённый слой с плавным переходом свойств к сердцевине, что исключает эффект «хрупкой корки» и отслаивание.

Развитие метода обработки тлеющим разрядом привело к появлению двух прогрессивных вариантов: тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем и тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем с эффектом полого катода. Конфигурация с полым катодом заслуживает особого внимания, поскольку обрабатываемое изделие размещается внутри металлической полости (цилиндра), которая служит катодом. Электроны, эмиттированные с поверхности катода под действием ионной бомбардировки, многократно отражаются от противоположных стенок полости, совершая осцилляции. Длина их пробега увеличивается на порядки, что резко повышает вероятность ионизации атомов остаточного газа. В результате внутри

полости формируется высококонцентрированная плазма с плотностью ионного тока, в несколько раз превосходящей плотность тока в классическом тлеющем разряде при одинаковых давлении и напряжении. Ионы из такой плазмы бомбардируют обрабатываемую поверхность с повышенной кинетической энергией, стимулируя генерацию точечных дефектов, дислокационных субструктур и формирование нанокристаллических областей. При этом средняя температура детали не превышает $250\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, что полностью исключает фазовые превращения в сердцевине и сохраняет закаленную структуру [1, 2].

Предлагаемый в рамках данной работы способ упрочнения в общем случае осуществляется в вакууме разрежением от 1,33 до 53,2 Па, где зажигается тлеющий разряд напряжением от 0,1 до 10 кВ при обеспечении расстояния между анодом и полым катодом, в интервале от 0,1 до 1,0 м, при плотности тока от 0,001 до 0,1 мА/см² в течение 10...30 мин, где полый катод выполнен в виде пустотелого металлического цилиндра с основанием. На катод на внешней боковой поверхности намотана кольцевая катушка индуктивности, высота которой не может быть меньше половины высоты катода, а площадь основания катода до 150 раз больше площади анода. Схема установки для реализации процесса приведена на рис. 1.

Интенсификация процесса упрочнения в предложенном способе достигается наложением аксиального магнитного поля, создаваемого кольцевой катушкой индуктивности, размещенной на внешней боковой поверхности полого катода. Магнитное поле с индукцией порядка 0,04...0,06 Тл вызывает азимутальный дрейф электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейф), что увеличивает время «жизни» электронов в разрядном промежутке и дополнительно повышает степень ионизации.

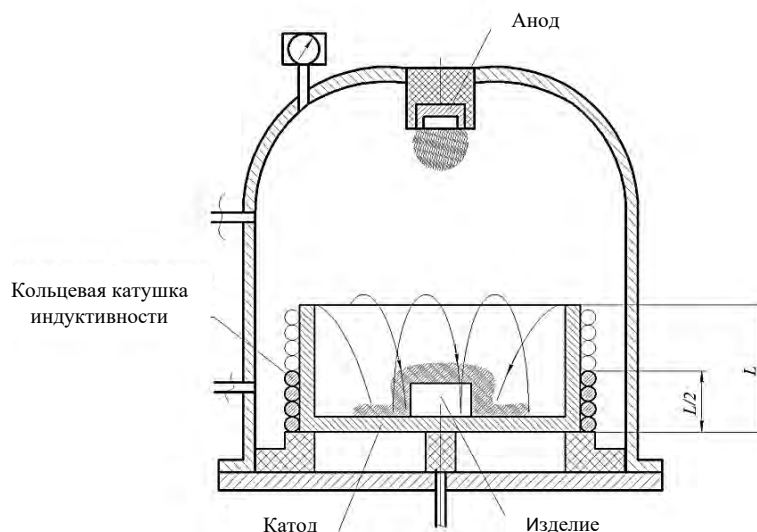


Рис. 1. Схема установки для реализации процесса

Экспериментально установлено, что синхронизация частоты пульсаций разряда с частотой модуляции магнитного поля позволяет управлять энергетическим спектром ионов, бомбардирующих поверхность, в диапазоне 100...500 эВ. Этой энергии достаточно для активного деформационного упрочнения, но недостаточно для распыления материала или его глубокого прогрева. В результате время обработки, необходимое для достижения максимальной износостойкости, сокращается до 10...15 мин, тогда как при классическом тлеющем разряде без поля оно составляет 25...30 мин. Одновременно снижается удельная мощность разряда (до 0,14...0,18 кВт/м²), что обеспечивает повышение энергоэффективности процесса в 1,2–1,7 раза. Важной особенностью процесса является то, что обработка ведется без специально подготовленной газовой среды – в разреженной атмосфере воздуха (остаточное давление 1,33...53,2 Па). Модифицирование поверхности происходит за счёт собственных атомов материала: интенсивная ионная бомбардировка вызывает перемешивание атомов, генерацию дефектов и диспергирование структуры без измене-

ния химического состава. Это принципиально отличает предложенный метод от азотирования или цементации и исключает образование хрупких нитридных или карбидных слоев [2–6].

Целью работы является установление закономерностей влияния трех режимов обработки – классического тлеющего разряда, тлеющего разряда с прикатодным магнитным полем и тлеющего разряда с прикатодным магнитным полем с эффектом полого катода – на износостойкость и глубину упрочненного слоя образцов из штамповых сталей 5Х3В3МФС, Х12МФ и конструкционной стали 40Х13 по сравнению с традиционной закалкой. Выбор указанных материалов обусловлен их широким применением в инструментальной оснастке: 5Х3В3МФС – теплостойкая сталь для горячего штампования, работающая при температурах до 600 °С; Х12МФ – высокохромистая сталь для холодного деформирования с высокой карбидной составляющей; 40Х13 – коррозионно-стойкая сталь для измерительного и хирургического инструмента. Для каждого из этих материалов ожидается различный отклик на обработку тлеющим разрядом, что требует инди-

видуального подбора оптимальных параметров. Полученные результаты позволят не только обосновать выбор наиболее эффективного режима упрочнения для конкретной марки стали, но и разработать практические рекомендации по внедрению энергосберегающего метода обработки тлеющим разрядом с эффектом полого катода в технологические процессы финишного упрочнения инструментальной технологической оснастки на машиностроительных предприятиях [7, 8].

Методика исследования

Испытания на износостойкость проводили в режиме сухого трения (без

применения смазочно-охлаждающих жидкостей) при комнатной температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности воздуха 50 %...60 %. Схема испытаний соответствовала стандартной конфигурации «плоский образец – цилиндрическое контртело» (рис. 2, а). Нормальную нагрузку на контртело создавали рычажной системой, ее значение составляло 150 Н. Частота вращения контртела была постоянной и равнялась 1000 об/мин, что соответствовало линейной скорости скольжения 0,52 м/с. Продолжительность одного испытания лимитировалась достижением образцом предельного износа, после чего испытание автоматически останавливали.

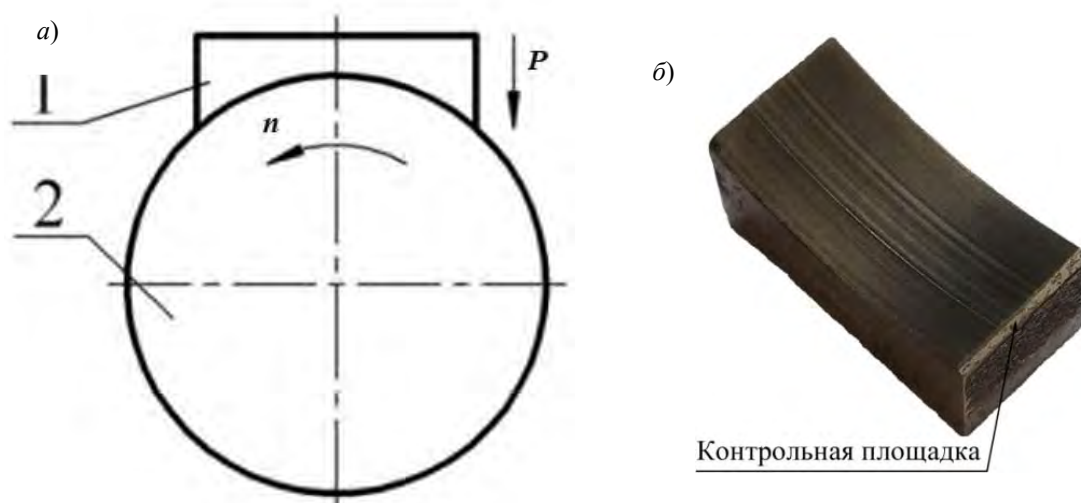


Рис. 2. Принципиальная схема испытаний: а – схема испытаний (1 – образец; 2 – контртело); б – образец

Критерием предельного износа служило уменьшение ширины контрольной площадки (исходно составлявшей $1,0 \pm 0,02$ мм) на 40 %, т. е. до значения $(0,6 \pm 0,02)$ мм. Измерение ширины площадки проводили через каждые 500 оборотов контртела с помощью малого инструментального микроскопа марки ММИ-2 с ценой деления 0,01 мм. По результатам измерений строили кинетические кривые износа. За окончательный результат принимали средне-

арифметическое значение по трем параллельным испытаниям для каждого режима обработки и каждой марки стали.

Испытания проводили на модернизированной машине трения СМТ-1, оснащенной системой автоматического счета оборотов и датчиком момента трения. Воспроизводимость результатов контролировали по разбросу значений k_L , который не превышал ± 5 % при доверительной вероятности 0,95.

Обработку образцов проводили по трем режимам: классический тлеющий разряд (без магнитного поля), тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем (индукция 0,04...0,06 Тл), а также тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем и эффектом полого катода. Давление остаточной атмосферы в рабочей камере поддерживали в интервале 13,3...26,6 Па (контроль осуществляли термопарным вакуумметром ВИТ-2). Напряжение разряда варьировали от 0,5 до 5,0 кВ, плотность тока – от 0,05 до 0,45 А/м², время обработки во всех режимах фиксировали равным 30 мин (за исключением этапа поиска оптимальных режимов, где время варьировали от 5 до 40 мин). Температуру образцов в процессе обработки измеряли хромель-алюмелевой термопарой, зачеканенной в контрольный образец, и поддерживали в пределах 200 °С...280 °С за счет параметров разряда.

Для количественной оценки эффективности упрочнения использовали коэффициент повышения износостойкости k_L , определяемый как отношение числа оборотов контртела до достижения предельного износа для образца, обработанного тлеющим разрядом N_{OBRi} , к аналогичному показателю для образца, прошедшего только термическую обработку (закалку) без воздействия тлеющим разрядом N_{Hi} :

$$k_{Li} = \frac{N_{OBRi}}{N_{Hi}}. \quad (1)$$

Глубину упрочненного слоя определяли по профилю микротвердости на поперечных шлифах. Образцы разрезали электроискровым методом перпендикулярно обработанной поверхности, за-

тем шлифовали и полировали с применением алмазных паст до зеркального блеска. Измерения микротвердости выполняли на приборе Zwick Roell ZHV 1M по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450–76. Нагрузку на индентор выбирали 0,98 Н, время выдержки под нагрузкой – 10 с. Измерения проводили вдоль линии, перпендикулярной поверхности, начиная с расстояния 5 мкм от края шлифа, с шагом 5 мкм на глубину до 150 мкм. На каждой глубине выполняли не менее пяти отпечатков. За глубину упрочненного слоя принимали расстояние от поверхности до того сечения, в котором микротвердость снижалась до среднего значения исходной закаленной стали (увеличенного на 5 % относительно фонового значения для учёта статистического разброса).

Обработку экспериментальных данных проводили методами регрессионного анализа. Для аппроксимации зависимости коэффициента износостойкости от параметров обработки $k_L = f(U, J, T)$ (U – напряжение; J – плотность тока; T – время) использовали полином второй степени. Кодирование факторов и расчет коэффициентов регрессии выполняли по стандартной методике планирования эксперимента. Адекватность полученных моделей проверяли по критерию Фишера при уровне значимости 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Перейдя от кодированных значений выражений к натуральным, получим зависимость приращения коэффициента износостойкости образцов из стали 5Х3ВЗМФС, упрочненных классической обработкой тлеющим разрядом:

$$\begin{aligned}
k_{L \text{ 5X3B3MФC}} = & 1,256 + 0,015 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) + 0,032 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) - 0,1 \left(\frac{T-30}{10} \right) + \\
& + 0,093 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) + 0,118 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) + 0,028 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) - \\
& - 0,088 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right)^2 - 0,040 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right)^2 - 0,083 \left(\frac{T-30}{10} \right)^2.
\end{aligned}$$

Далее получим зависимость приращения коэффициента износостойкости

образцов из стали 5X3B3MФC, упрочненных тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем:

$$\begin{aligned}
k_{L \text{ 5X3B3MФC МП}} = & 1,413 + 0,117 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) - 0,07 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) - 0,146 \left(\frac{T-30}{10} \right) + \\
& + 0,044 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) + 0,088 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) + 0,181 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) + \\
& + 0,038 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right)^2 - 0,064 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right)^2 + 0,008 \left(\frac{T-30}{10} \right)^2.
\end{aligned}$$

Таким же образом получим зависимость приращения коэффициента износостойкости образцов из стали

5X3B3MФC, упрочненных тлеющим разрядом с эффектом полого катода:

$$\begin{aligned}
k_{L \text{ 5X3B3MФC ЭПК}} = & 1,323 + 0,006 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) + 0,017 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) - 0,129 \left(\frac{T-30}{10} \right) + \\
& + 0,145 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) + 0,174 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) + 0,072 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right) \left(\frac{T-30}{10} \right) - \\
& - 0,081 \left(\frac{U-2,0}{0,7} \right)^2 - 0,054 \left(\frac{J-0,25}{0,075} \right)^2 - 0,097 \left(\frac{T-30}{10} \right)^2.
\end{aligned}$$

Аналогично проведем исследование приращения коэффициента износостойкости для остальных сталей, теоретические коэффициенты регрессии которых приведены в табл. 1.

Для определения области оптимальных значений основных параметров

упрочнения получен ряд графических зависимостей приращения коэффициента износостойкости от двух факторов при значении третьего, находящегося на основном уровне, которые визуально показывают поведение данных зависимостей (рис. 3–11).

Табл. 1. Теоретические коэффициенты регрессии

Марка стали	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
X12МФ	1,103	0,095	-0,065	0,077	0,169	0,057	0,032	0,074	-0,061	-0,064
X12МФ с прикатодным магнитным полем	1,722	0,022	-0,028	-0,002	0,061	0,023	0,017	0,020	0,020	0,051
X12МФ с эффектом полого катода	2,035	-0,018	-0,026	0,014	0,007	-0,004	0,066	-0,054	0,012	0,012
40X13	1,092	0,055	0,022	-0,112	0,153	-0,047	0,065	-0,058	0,053	0,057
40X13 с прикатодным магнитным полем	0,500	0,100	0,110	0	0,180	-0,09	-0,01	0,120	0,090	0,110
40X13 с эффектом полого катода	1,500	0,013	-0,003	-0,151	0,158	0,183	0,092	-0,095	-0,044	-0,114

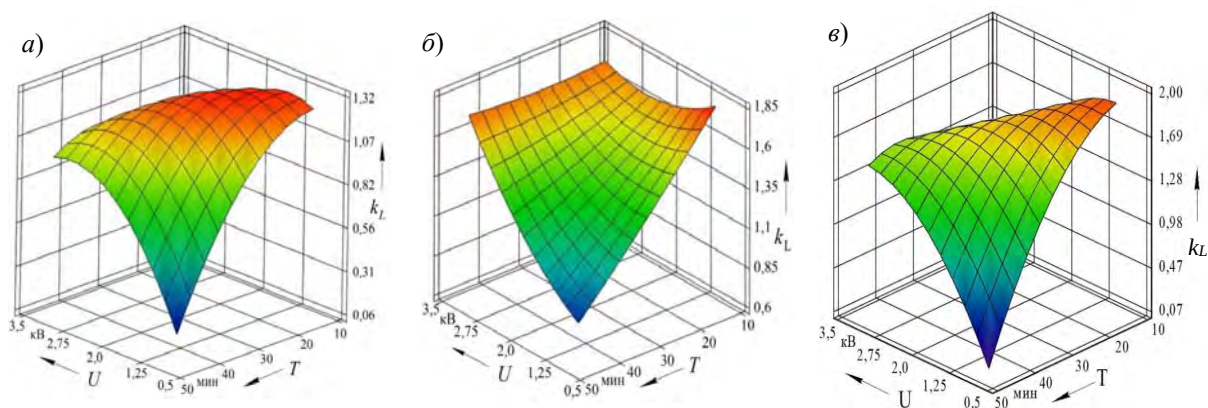


Рис. 3. Влияние напряжения U , кВ, тлеющего разряда и времени обработки T , мин, на коэффициент износостойкости образцов из стали 5ХЗВЗМФС: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

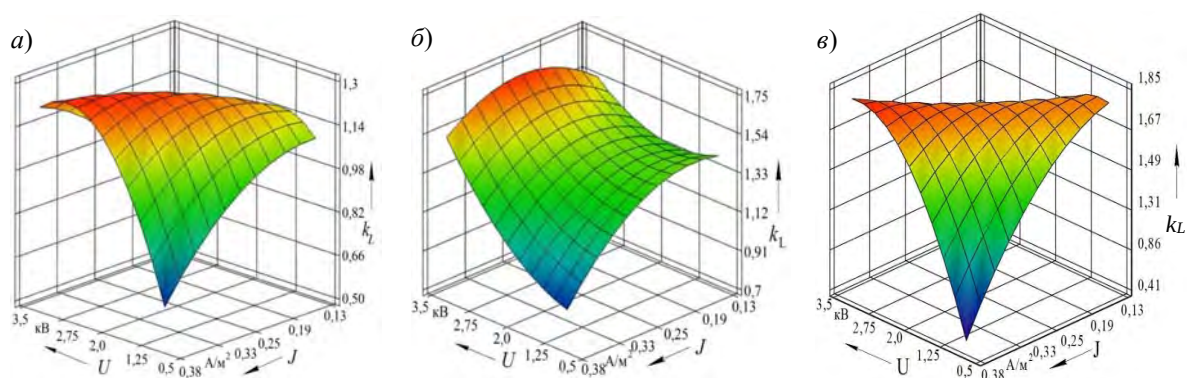


Рис. 4. Влияние напряжения U , кВ, тлеющего разряда и плотности тока J , А/м², на коэффициент износостойкости образцов из стали 5ХЗВЗМФС: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

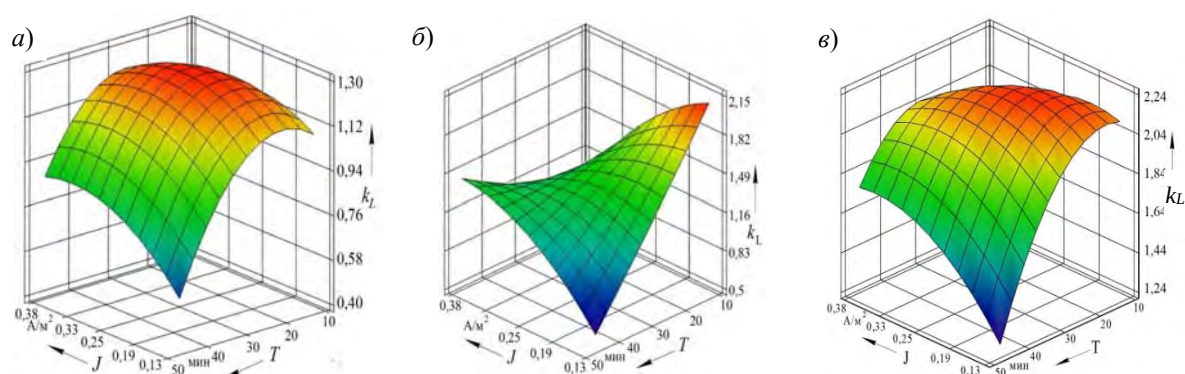


Рис. 5. Влияние плотности тока J , A/m^2 , тлеющего разряда и времени обработки T , мин, на коэффициент износостойкости образцов из стали 5X3B3MFC: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

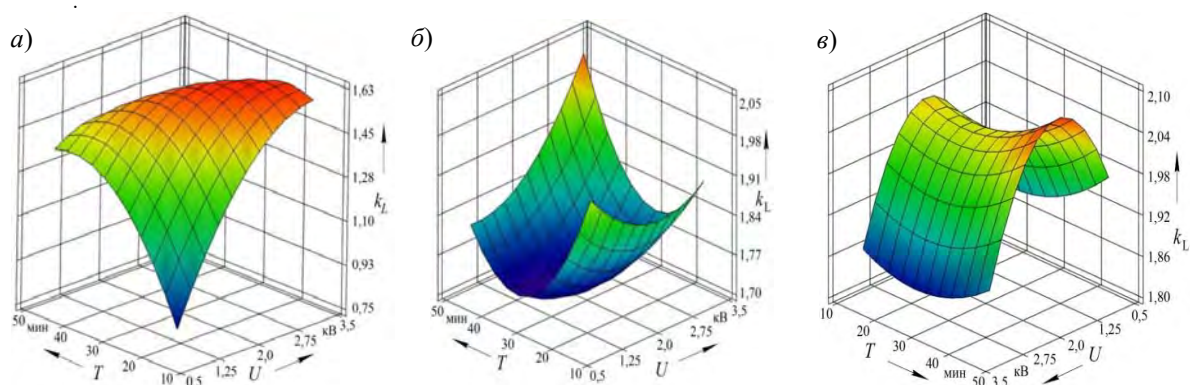


Рис. 6. Влияние напряжения U , кВ, тлеющего разряда и времени обработки T , мин, на коэффициент износостойкости образцов из стали X12MF: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

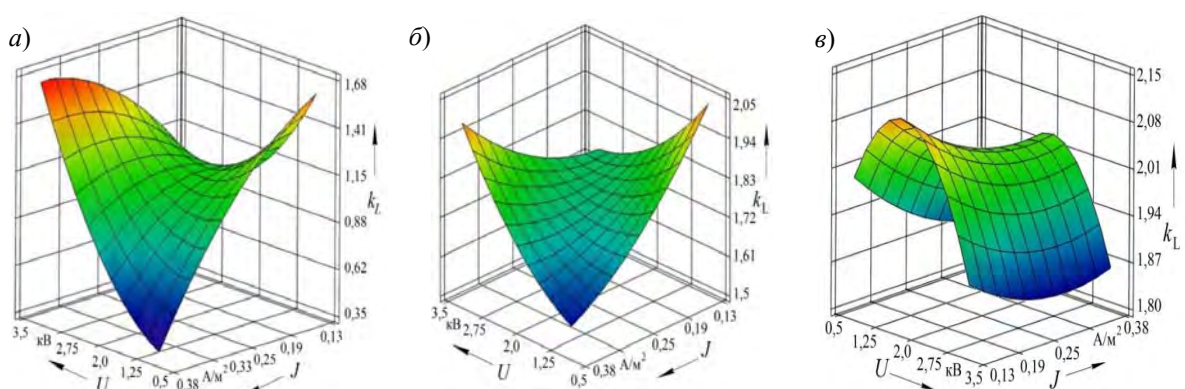


Рис. 7. Влияние напряжения U , кВ, тлеющего разряда и плотности тока J , A/m^2 , на коэффициент износостойкости образцов из стали X12MF: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

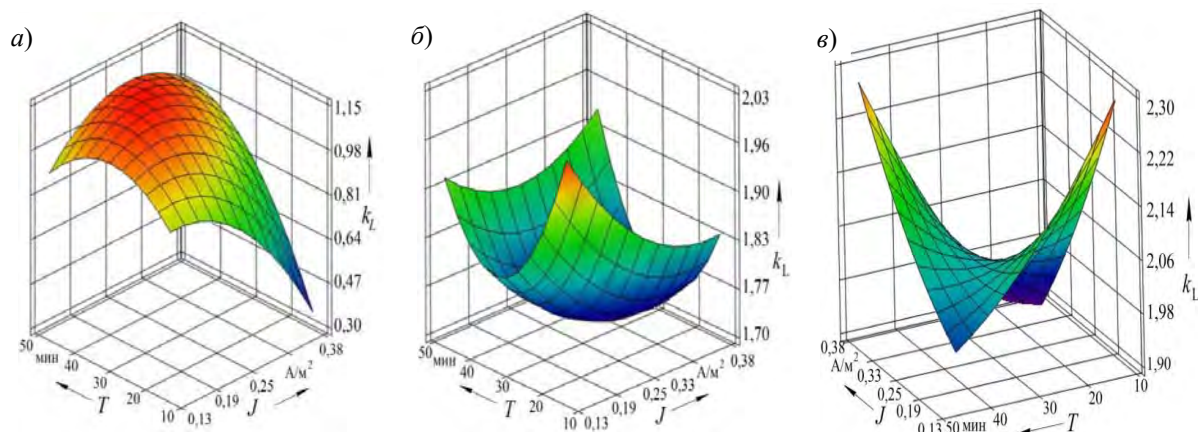


Рис. 8. Влияние плотности тока J , A/m^2 , тлеющего разряда и времени обработки T , мин, на коэффициент износостойкости образцов из стали X12MF: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

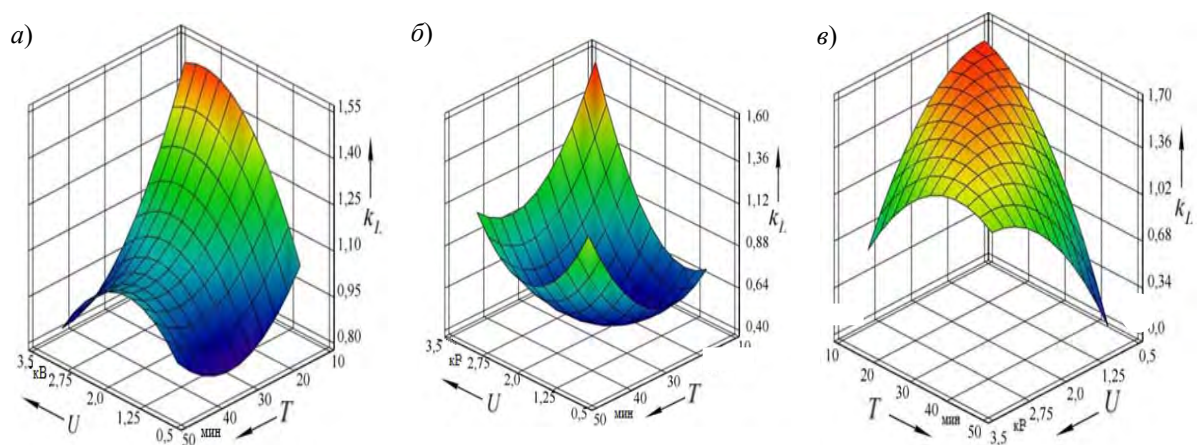


Рис. 9. Влияние напряжения U , кВ, тлеющего разряда и времени обработки T , мин, на коэффициент износостойкости образцов из стали 40X13: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

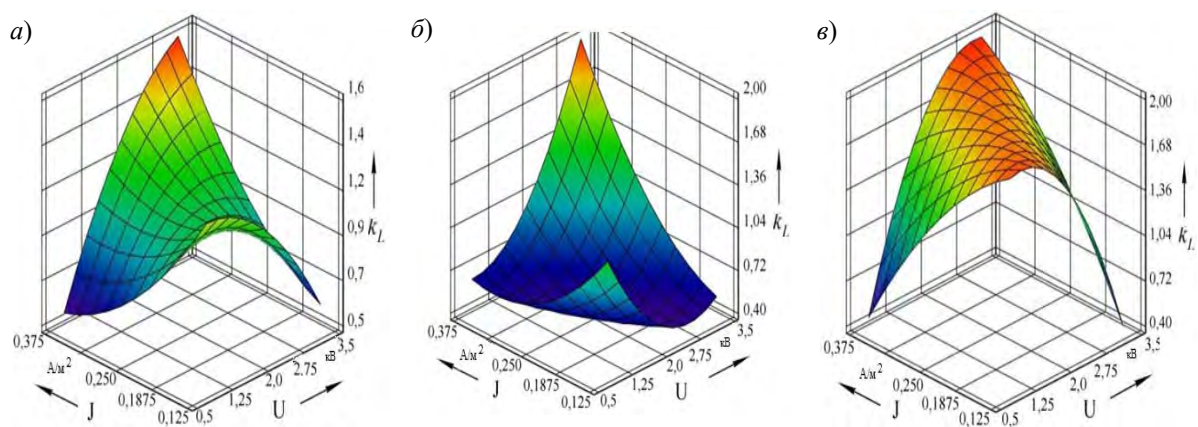


Рис. 10. Влияние напряжения U , кВ, тлеющего разряда и плотности тока J , A/m^2 , на коэффициент износостойкости образцов из стали 40X13: a – при обработке тлеющим разрядом; b – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; v – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

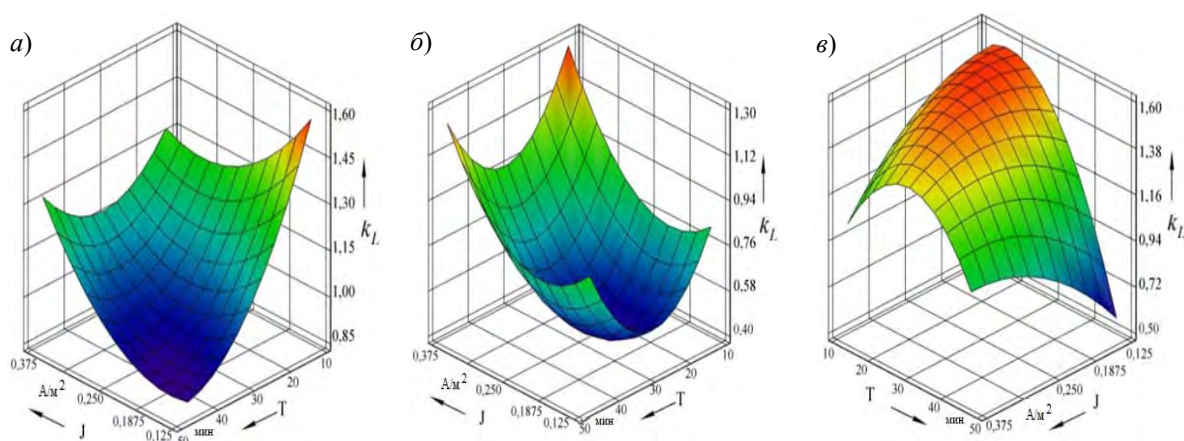


Рис. 11. Влияние плотности тока J , A/m^2 , тлеющего разряда и времени обработки T , мин, на коэффициент износостойкости образцов из стали 40X13: *a* – при обработке тлеющим разрядом; *б* – при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; *в* – при обработке тлеющим разрядом с эффектом полого катода

На основании анализа графических интерпретаций зависимостей приращение коэффициента износостойкости от двух факторов при значении третьего, находящегося на основном уровне, можно сделать вывод, что максимальная

износостойкость образцов из сталей достигается при упрочнении их с технологическими параметрами, указанными в табл. 2–4, в зависимости от вида обработки.

Табл. 2. Оптимальные режимы обработки образцов из стали тлеющим разрядом

Сталь	Оптимальное значение технологических параметров обработки				Приращение коэффициента износостойкости k_L
	U , кВ	J , A/m^2	T , мин	W , кВт/ m^2	
5X3B3MФC	1,8...2,0	0,250	25	0,25	1,3
X12MФ	3,0...3,2	0,375	30	1,2	1,6
40X13	2,7...3,0	0,375	20	0,2	1,6

Табл. 3. Оптимальные режимы обработки образцов из стали тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Сталь	Оптимальное значение технологических параметров обработки					Приращение коэффициента износостойкости k_L
	U , кВ	J , A/m^2	T , мин	W , кВт/ m^2	B , Тл	
5X3B3MФC	1,1...1,25	0,190	15	0,2	0,04...0,06	2,0
X12MФ	1,3...1,5	0,250	20	0,8		2,0
40X13	2,5...2,7	0,250	15	0,17		1,7

Табл. 4. Оптимальные режимы обработки образцов из стали тлеющим разрядом с эффектом полого катода

Сталь	Оптимальное значение технологических параметров обработки				Приращение коэффициента износостойкости k_L
	U , кВ	J , А/м ²	T , мин	W , кВт/м ²	
5Х3ВЗМФС	1,1...1,25	0,250	13	0,18	2,24
X12МФ	1,1...1,25	0,190	13	0,8	2,30
40Х13	1,1...1,25	0,190	10	0,14	2,00

Проанализировав результаты в табл. 2–4, можно сделать вывод о том, что использование эффекта полого катода приводит к повышению коэффициента износостойкости до 1,2 раза относительно износостойкости образцов, обработанных тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем с магнитной индукцией 0,04...0,06 Тл. Также необходимо отметить, что наблюдается сокращение оптимального значения мощности горения разряда W , кВт/м², и, как следствие, увеличение энергоэффективности процесса упрочнения.

В табл. 5 приведен сравнительный анализ максимальных значений износостойкости образцов, подвергнутых обра-

ботке как классическим тлеющим разрядом, так и с использованием прикатодного магнитного поля, и с эффектом полого катода.

Исходя из анализа данных, приведенных в табл. 5, можно сделать вывод о том, что применение магнитного поля с эффектом полого катода при обработке изделий тлеющим разрядом приводит к дополнительному росту износостойкости образцов.

Результаты дюрметрического анализа изделий представлены на рис. 12–14.

Табл. 5. Максимальные значения коэффициента износостойкости при различных методах обработки образцов

Сталь	Износостойкость образцов после упрочнения классическим тлеющим разрядом	Износостойкость образцов после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем	Износостойкость образцов после упрочнения тлеющим разрядом с эффектом полого катода	Приращение коэффициента износостойкости k_L , %
5Х3ВЗМФС	1,339	1,940	2,140	10...15
X12МФ	1,586	2,001	2,270	9...13
40Х13	1,475	1,618	1,987	17...22

Табл. 6. Максимальные значения глубины упрочненного слоя при различных методах упрочнения образцов

Сталь	Глубина упрочненного слоя после упрочнения тлеющим разрядом, мкм	Глубина упрочненного слоя после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, мкм	Глубина упрочненного слоя после упрочнения тлеющим разрядом с эффектом полого катода, мкм
5Х3ВЗМФС	50	80	110
X12МФ	75	100	120
40Х13	70	90	110

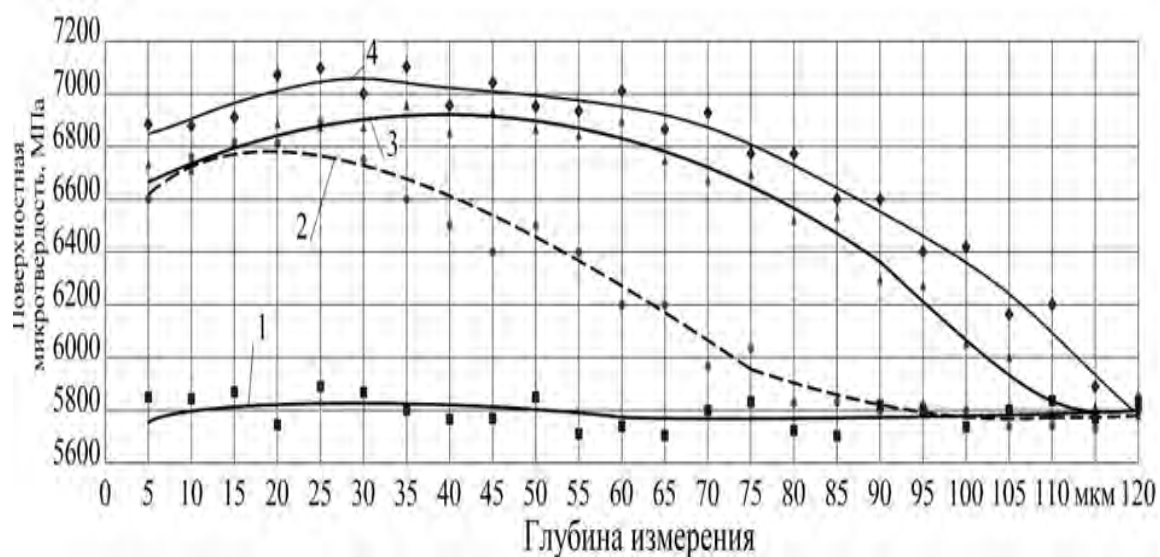


Рис. 12. Профиль микротвердости в поверхностном слое образцов из стали 5Х3ВЗМФС: 1 – до обработки; 2 – после обработки тлеющим разрядом с оптимальными параметрами; 3 – после обработки тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; 4 – после обработки тлеющим разрядом с эффектом полого катода с оптимальными параметрами

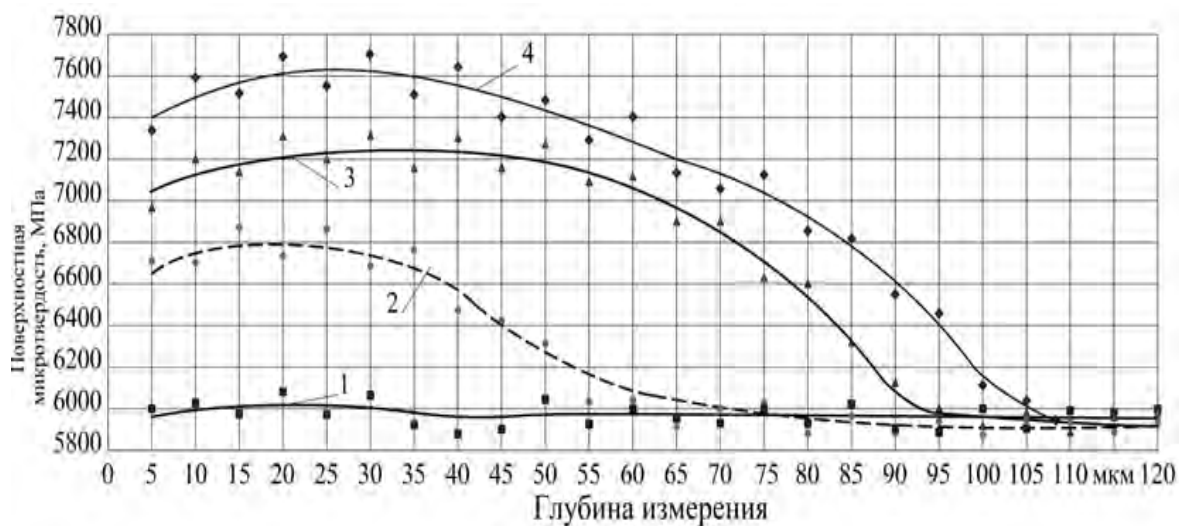


Рис. 13. Профиль микротвердости в поверхностном слое образцов из стали 40Х13: 1 – до обработки; 2 – после обработки тлеющим разрядом с оптимальными параметрами; 3 – после обработки тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; 4 – после обработки тлеющим разрядом с эффектом полого катода с оптимальными параметрами

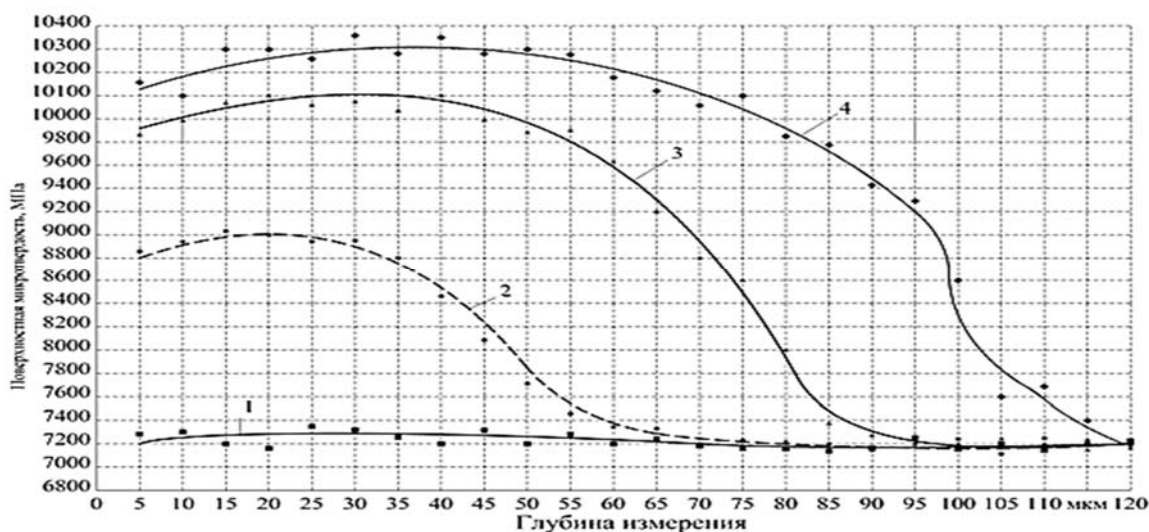


Рис. 14. Профиль микротвердости в поверхностном слое образцов из стали X12МФ: 1 – до обработки; 2 – после обработки тлеющим разрядом с оптимальными параметрами; 3 – после обработки тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем; 4 – после обработки тлеющим разрядом с эффектом полого катода с оптимальными параметрами

На основании анализа данных, приведенных в табл. 6 и на рис. 12–14, можно сделать вывод о том, что применение эффекта полого катода при обработке изделий тлеющим разрядом приводит к дополнительному росту микротвердости их поверхностей, а также к увеличению глубины упрочненного слоя.

Заключение

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что обработка тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем и эффектом полого катода является высокоэффективным энергосберегающим методом поверхностного упрочнения штамповых и конструкционных сталей. Для всех трёх исследованных марок сталей применение конфигурации полого катода обеспечило максимальное повышение износостойкости по сравнению как с классической закалкой, так и с обработкой классическим тлеющим разрядом без магнитного поля, а также с обработкой тлеющим разрядом только с прикатодным магнитным полем. Коэффициент износостойкости k_L при использовании эффекта полого катода достиг значе-

ний 2,14...2,30, что в среднем на 10 %...22 % выше, чем при обработке тлеющим разрядом с магнитным полем без эффекта полого катода, и в 1,5–1,7 раза выше по сравнению с классическим тлеющим разрядом. Глубина упрочненного слоя, оцененная по микротвердости, составила 110...120 мкм, что в 1,5–2,2 раза превышает показатели, полученные после классической обработки тлеющим разрядом.

Важным технологическим преимуществом предложенного метода является значительное сокращение времени обработки до 10...15 мин (против 25...30 мин для классического тлеющего разряда и 15...20 мин для разряда с магнитным полем без полого катода) при одновременном снижении удельных энергозатрат в 1,2–1,7 раза. Это достигается за счет многократного увеличения плотности ионного тока в плазме полого катода и синхронизации пульсаций разряда с частотой магнитного поля, что позволяет управлять энергетическим спектром бомбардирующих поверхность ионов. Обработка осуществляется в среде разреженного воздуха без введения специальных газов-реагентов, что исключает образование хрупких нитридных или

карбидных слоев и обеспечивает формирование градиентного упрочнённого слоя с плавным переходом свойств к сердцевине. Температура образцов в процессе обработки не превышает 250 °С...300 °С, поэтому исходная структура сердцевины, сформированная после закалки, полностью сохраняется, а геометрические параметры изделий не изменяются.

Полученные результаты позволяют рекомендовать обработку тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем с эффектом полого катода для промышленного внедрения при финишном упрочнении инструментальной технологической оснастки – штампов горячего и холодного деформирования, пресс-форм, вырубных и гибочных штампов, а также деталей из коррозионно-стойких сталей, работающих в условиях абразивного износа и контактных нагрузок.

Для стали 5Х3ВЗМФС, используемой при горячем штамповании, особенно важным является сохранение теплостойкости и сопротивления термической усталости при одновременном повышении износостойкости в 2,14 раза. Для стали Х12МФ, склонной к хрупкому выкрашиванию крупных карбидов, эффект полого катода позволяет перераспределить карбидную фазу и увеличить ресурс холодноштампового инструмента в 2,3 раза. Для стали 40Х13, работающей в слабоагрессивных средах, упрочнение предложенным методом повышает износостойкость в 2 раза без снижения коррозионной стойкости, что подтверждается сохранением блеска поверхности и отсутствием точечной коррозии после обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом : монография / под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с. : ил.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. 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.
6. 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.
7. **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.
8. **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 // Вестник Белорусско-Российского университета – 2022. – № 3 (76). – С. 77–86.

Статья сдана в редакцию 29 мая 2026 г.

Контакты:

vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович);

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

ann.yumanova@mail.ru (Юманова Анна Николаевна);

alla.shemenkova@yandex.by (Шеменкова Алла Леонидовна).

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

INFLUENCE OF GLOW DISCHARGE TREATMENT IN A MAGNETIC FIELD WITH A HOLLOW CATHODE EFFECT ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF TOOL STEELS

Abstract

The article presents the results of an experimental study on the influence of glow discharge treatment in various configurations on the wear resistance and depth of the hardened layer of specimens made of 5Kh3V3MFKh and Kh12MF die steels, and 40Kh13 structural steel. Three modes are compared: a classical glow discharge, a glow discharge with a near-cathode magnetic field, and a glow discharge with a near-cathode magnetic field utilizing the hollow cathode effect. It was established that applying the hollow cathode effect increases the wear resistance coefficient to values of 2,14...2,30, which is 1,2 times higher than with magnetic field treatment alone, and 1,5–1,7 times higher compared to the classical glow discharge. The depth of the hardened layer reaches 110...120 μm , which is 1,5–2,2 times greater than that of conventional treatment.

Keywords:

glow discharge, hollow cathode, magnetic field, wear resistance, microhardness, surface hardening, die steels.

For citation:

Influence of glow discharge treatment in a magnetic field with a hollow cathode effect on the performance properties of tool steels / V. M. Shemenkov, M. A. Rabyko, A. N. Yumanova, A. L. Shemenkova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 3 (92). – P. 86–100.