

Повышение износостойкости инструментальной стали У8А плазменно-электролитным сульфидированием

Т. Л. Мухачева^{a,b,*}, И. В. Тамбовский^{a,b}, А. О. Комаров^b,
В. М. Феклистова^b, С. А. Кусманов^{a,b,**}

^aКостромской государственный университет, г. Кострома, 156005, Россия,

^bМосковский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, 127994, Россия

*e-mail: mukhachevatl@mail.ru

**e-mail: sakusmanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.08.2025

После доработки 28.09.2025

Принята к публикации 30.09.2025

Представлены результаты применения плазменно-электролитной обработки для сульфидирования углеродистой инструментальной стали У8А. Анализ структурно-фазовых изменений сульфидированной поверхности выявил образование сульфидов железа FeS, Fe₃S₄ и Fe₂S₃, количество которых определяется применением термической обработки до и после насыщения, формирование мартенсита после закалки и оксидов Fe₃O₄ в результате высокотемпературного окисления. Проведены трибологические испытания в режиме сухого трения по схеме «вал–колодка» при нагрузке 10 Н, скорости скольжения образца по контртелу 1,555 м/с на 1000 м пути трения. Установлено снижение массового износа после плазменно-электролитного сульфидирования с закалкой в 17 раз по сравнению с необработанным образцом, в 13 раз по сравнению с закаленными в воде и масле образцами и в 14 раз по сравнению с отожженными в печи. Износостойкость сульфидированной стали У8А определяется структурой материала зоны деформации, содержащей сульфиды железа, при трении.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, сульфидирование, инструментальная сталь, износостойкость, коэффициент трения.

УДК 544.558+66.088

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.5.11>

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение демонстрирует тенденцию к повышению скорости работы, мощности, производительности и точности машин [1]. В связи с этим задача обеспечения надежности и продления срока службы оборудования в полной мере обретает свою актуальность [2]. Нередко наблюдается ситуация, когда машины с идентичными конструктивными особенностями обладают различной надежностью [3]. Причиной этого выступают отличия в технологических процессах производства отдельных компонентов. Данная ситуация послужила основой для формирования тренда в технологии машиностроения, основанного на управлении эксплуатационными характеристиками машин посредством применения технологических методов [4]. Совершенствование прогрессивных технологических методов приводит к созданию более современных машин, снижению производственных затрат и уменьшению трудозатрат на их изготовление [5]. Новые горизонты для повышения надежности машин открывает разработка методов повышения качества поверхности обработанных деталей [6]. Многие эксплуатаци-

онные характеристики машин, такие как износостойкость, контактная жесткость, усталость, устойчивость к коррозии, электрическое и тепловое сопротивление соединений, герметичность соединений и ряд других параметров, в значительной степени зависят от контактного взаимодействия деталей, которое определяется свойствами их поверхностных слоев.

Плазменно-электролитная обработка представляет собой современную экологически чистую технологию инженерии поверхности металлических и полупроводниковых изделий в водных растворах солей [7–13]. Наряду с высокой производительностью плазменно-электролитная обработка характеризуется высокими скоростями нагрева и охлаждения детали до 100 °C/с, ускоренным формированием диффузионных слоев при проведении химико-термической обработки и качеством обработанной поверхности: отсутствием абразивных загрязнений, эффектом обезжиривания и классом чистоты поверхности [14–19]. При подаче рабочего напряжения на деталь, погруженную в электролит, вокруг нее формируется стабильная парогазовая оболочка толщиной десятки микрометров, являющаяся нагревающей и насыщающей средой в процессе обработки

[20–25]. Технология полностью соответствует санитарным требованиям и реализуется на компактном оборудовании, отличающемся простотой управления и высокой надежностью.

Концепции конструирования в современной технике часто требуют, чтобы материал сочетал в себе противоречивые свойства, например, высокий коэффициент трения и низкую интенсивность изнашивания, высокую механическую прочность и значительную податливость, высокую прочность при низкой плотности и т.п. В случае металлов и сплавов существенное улучшение трибологических и иных характеристик за счет только легирования уже вряд ли достижимо, однако сохраняется громадный резерв влияния на трибологические характеристики путем модифицирования структуры и инженерии поверхности.

Данная работа посвящена модифицированию поверхностного слоя инструментальной стали У8А высокоскоростной плазменно-электролитной обработкой с целью повышения износостойкости. В качестве диффузанта для проведения плазменно-электролитного насыщения была выбрана сера, так как формирование сульфидного слоя в структуре модифицированной поверхности предотвращает образование мостиков холодной сварки контактирующих поверхностей при трении с высокими нагрузками, снижает коэффициент трения, что особенно важно для деталей, работающих в условиях сухого или граничного трения, например, в пищевой промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для плазменно-электролитного сульфидирования (ПЭС) использовались цилиндрические образцы диаметром и высотой 10 мм из инструментальной стали У8А (0,76–0,83% С; 0,17–0,33% Si; 0,17–0,28% Mn; <0,2% Ni; <0,018% S; <0,025% P; <0,2% Cr; <0,2% Cu; остальное Fe).

Лабораторная установка для проведения плазменно-электролитной обработки состоит из следующих рабочих частей: рабочей камеры, системы охлаждения электролита, системы электропитания, механизма перемещения модифицируемого образца, системы управления и контроля (рис. 1). Рабочая камера имеет цилиндрическую форму. Подача охлажденного раствора электролита производится вдоль оси рабочей камеры. Во время проведения ПЭС стенки камеры являлись отрицательным электродом, а обрабатываемый образец – положительным. Погружение образца в раствор электролита осуществлялось с помощью линейного электропривода с питанием от

отдельного источника. В качестве источника тока использовался блок питания ГОРН-К-360В/20А с диапазоном выходного напряжения от 0 до 360 В, силой тока до 20 А и возможностью смены полярности с цифровым управлением.

В качестве электролита применялся водный раствор состава: 10 мас.% сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 10 мас.% диметилсульфоксида $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$.

ПЭС образцов из стали У8А в состоянии поставки проводилось при температуре 550 °С в течение 7 мин. Затем выполнялся разогрев обрабатываемого образца – анода до температуры закалки 780 °С. Разогрев образца осуществлялся увеличением подаваемого на него напряжения. Большая часть мощности источника тока рассеивалась в парогазовой оболочке, так как именно она обладает наибольшим сопротивлением в системе «металлический анод–парогазовая оболочка–раствор электролита». Локализация первичных джоулевых источников тепла вблизи нагреваемой поверхности образца – анода в тонкой малоинерционной пленке обеспечивала высокие скорости разогрева изделий в парогазовой оболочке порядка 100°С/с. После нагревания до закалочной температуры напряжение отключалось, парогазовая оболочка конденсировалась и возобновлялся контакт образца с непрерывно охлаждаемым раствором электролита, температура которого поддерживалась на уровне 25 °С. Температура образца – анода измерялась хромель-алюмелевой термопарой, вставленной в глухое осевое отверстие в центре анода. Скорость охлаждения при отключении напряжения соответствовала по порядку величины скорости разогрева, что обеспечивало закалку образца (образец 1 в таблице).

Для оценки качества сульфидированной поверхности стали У8А с позиции трибологии были изготовлены партии контрольных образцов, обработанных разными методами:

- закаленные в воде после нагрева в печи до закалочной температуры 780 °С (образец 4 в таблице);
- закаленные в масле после нагрева в печи до закалочной температуры 780 °С (образец 5 в таблице);
- отожженные при температуре 780 °С в течение 30 мин с медленным охлаждением вместе с печью (образец 6 в таблице);
- необработанные образцы из стали У8А в состоянии поставки (образец 7 в таблице).

Часть образцов после отжига подвергалась ПЭС: одна часть образцов сульфидировалась в течение 7 мин при 550 °С и затем закаливалась при температуре от 780 °С (образец 2 в таблице),

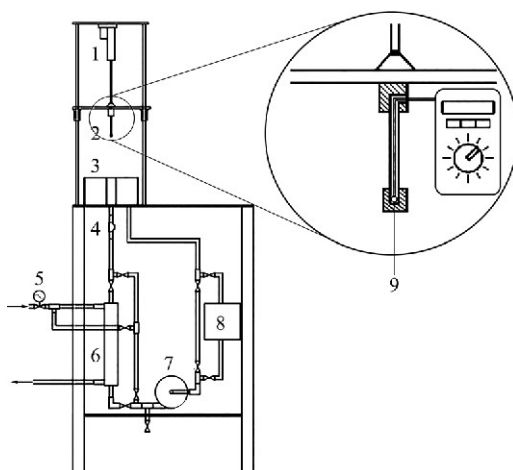


Рис. 1. Схема установки с указанием размещения основных элементов: 1 – линейный привод; 2 – образец; 3 – цилиндрическая рабочая камера (электролизер); 4 – расходомер; 5 – клапан с электроприводом; 6 – теплообменник (холодильник); 7 – насос; 8 – нагреватель; 9 – система измерения температуры хромель-алюмелевой термопарой.

Таблица. Значения убыли массы образцов при трении Δm и среднего коэффициента трения за последние 100 м пути μ после различных видов обработки

№ образца	Вид обработки	Δm , мг	μ
1	ПЭС с последующей закалкой	0,64	0,147
2	ПЭС с предварительным отжигом и последующей закалкой	0,82	0,153
3	ПЭС с предварительным отжигом и без последующей закалки	6,03	0,394
4	Нагревание в печи с закалкой в воде	8,61	0,430
5	Нагревание в печи с закалкой в масле	8,26	0,392
6	Отжиг в печи в течение 30 минут	8,97	0,461
7	Без обработки	10,7	0,509

а вторая часть после сульфидирования охлаждалась на воздухе без закалки (образец 3 в таблице).

Для определения фазового состава образцов до и после обработки использовался рентгено-структурный анализ с помощью дифрактометра PANalytical Empyrean при излучении $\text{CoK}\alpha$. Морфология поверхности исследовалась с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3 с применением детектора энергодисперсионного анализа X-Act для элементного анализа.

Исследование трибологических свойств после ПЭС проводилось на боковой поверхности образцов по схеме трения «вал–колодка» (рис. 2). Малогабаритный цилиндрический образец 1 закреплялся на торце ведущего вала 2, а контртело 3, закрепленное на ведомом валу 4 вместе с системой нагружения посредством кривошипа 5, может свободно вращаться вместе с системой нагружения, что исключает нарушение соосности элементов пары трения по мере изнашивания и приводит к отсутствию вибраций и биений, влияющих на результаты измерения момента силы трения. Контртело выполняется в форме пластины с полукруглой выемкой и в процессе испытания охватывает

половину дуги окружности образующей цилиндрической поверхности образца, оставляя свободной дорожку трения для бесконтактного измерения температуры сразу на выходе из зоны сопряжения образца и контртела. По мере изнашивания пары трения в процессе испытаний контртело неизменно охватывает половину дуги окружности образующей цилиндрической поверхности образца, в результате чего коэффициент взаимного перекрытия остается неизменным. Система нагружения состоит из малогабаритного пневматического цилиндра 6 и направляющих 7, по которым движется держатель контртела. Испытания проводились при нагрузке 10 Н и скорости скольжения образца по контртелу 1,55 м/с. Продолжительность трибологических испытаний соответствовала пройденному пути скольжения 1000 м.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным рентгеновского анализа, на поверхности всех сульфидированных образцов обнаружены сульфиды железа FeS , Fe_3S_4 и Fe_2S_3 (рис. 3). В образцах, которые после ПЭС подвергались закалке, в структуре присутствует мартенсит. Присутствие оксида железа Fe_3O_4 в

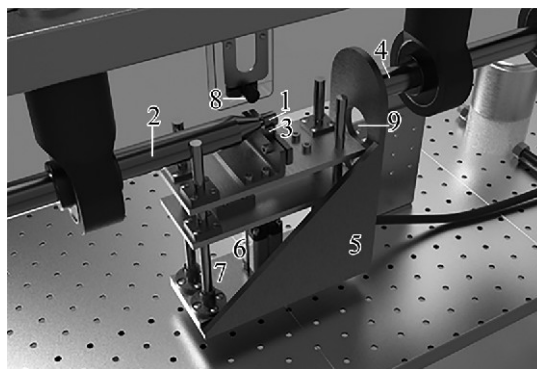


Рис. 2. Общий вид узла трения: 1 – образец; 2 – ведущий вал; 3 – контртело; 4 – ведомый вал; 5 – кривошип; 6 – пневматический цилиндр; 7 – направляющие; 8 – инфракрасный цифровой термометр; 9 – тензодатчик балочного типа.

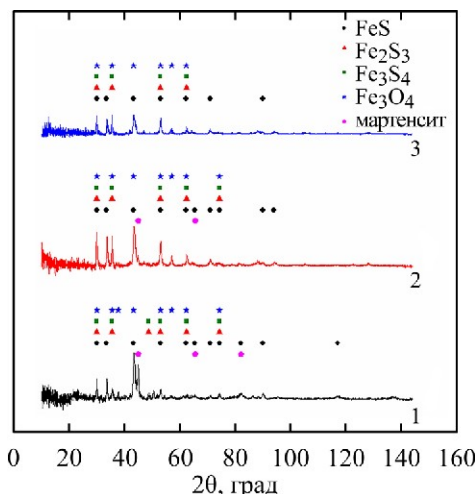


Рис. 3. Дифрактограммы поверхностного слоя стали У8А после ПЭС: с последующей закалкой (1); с предварительным отжигом и последующей закалкой (2); с предварительным отжигом и без последующей закалки (3).

поверхностном слое образцов после сульфидирования связано с высокотемпературным окислением поверхности стали У8А в парогазовой оболочке в процессе обработки. На рентгенограммах закаленных образцов обнаружено большее количество сульфидов, чем на рентгенограмме образца без закалки. В свою очередь, у закаленного образца в состоянии поставки без предварительной термической обработки количество сульфидов в поверхностном слое большее, чем у образца с предварительным отжигом.

Содержание сульфидов в поверхностном слое в значительной степени зависит от приоритетного механизма диффузии растворенных атомов серы в железной матрице. На содержание сульфидов в поверхностном слое решающее влияние оказывает механизм преимущественной диффузии атомов серы в железную матрицу, обусловленный разницей в размерах растворенных атомов серы и атомов железа в решетке основного металла. Согласно правилу Хэгга, в плотно упакованной атомной решетке с координационным числом 8 или 12 твердый раствор внедрения возникает в том случае, если фактический радиус атомов растворенного элемента

достигает не более чем 0,59 действительного радиуса атомов основного металла. Фактический радиус атома железа составляет 0,126 нм, атома серы – 0,104 нм. Отношение радиусов атомов серы и железа равно $0,83 > 0,59$, а значит, образование твердых растворов внедрения невозможно. Поэтому диффузия атомов серы в железную матрицу происходит преимущественно по вакансионному механизму и по дислокациям, так как в этом случае потенциальный барьер для атома серы имеет пониженное значение и атом может достаточно легко его преодолевать.

Различные режимы химико-термической обработки образцов, рентгенограммы которых показаны на рис. 3, приводят к разному количеству дефектов кристаллического строения. Во время закалки в структуре мартенсита происходит значительное увеличение плотности дефектов кристаллической решетки. Так как диффузия крупных атомов серы в железной матрице легче идет по дефектам из-за пониженного потенциального барьера, большее количество сульфидов выявлено в поверхностном слое закаленных образцов. Образец, прошедший предварительный отжиг перед

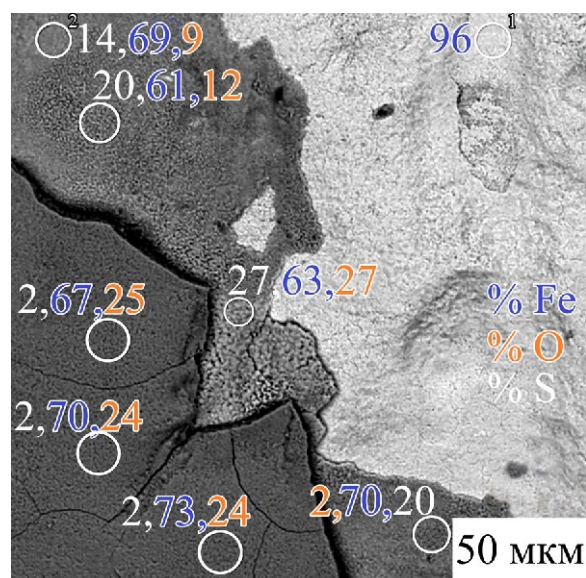


Рис. 4. СЭМ-изображение поверхности стали У8А после ПЭС с закалкой.

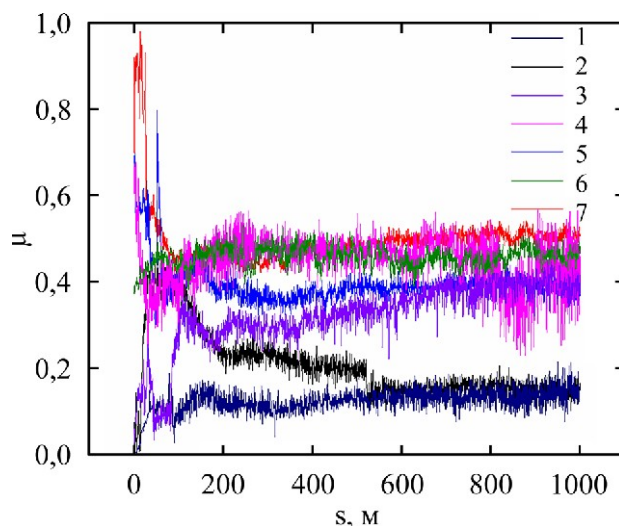


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения образцов из стали У8А после различных видов обработки, указанных в таблице, от пути трения.

сульфидированием, обладает равновесной структурой и содержит минимальное количество дефектов в кристаллической решетке для диффузии крупных атомов серы, поэтому содержание сульфидов в нем меньше, чем в образцах без предварительной термической обработки.

На СЭМ-изображении поверхности образца после ПЭС с закалкой дифференцируются три области (рис. 4). Наружный слой, согласно данным элементного анализа, обогащен кислородом, под ним располагаются слой с максимальным содержанием серы и далее мартенсит.

Результаты трибологических испытаний (таблица, рис. 5) показали, что наименьший коэффициент трения 0,147 зафиксирован у образца после ПЭС с закалкой. Потери массы при трении после обработки в данном режиме в 17 раз меньше, чем у необработанного образца, в 13 раз ниже, чем у образцов, закаленных в воде и масле, и в 14 раз ниже, чем у отожженного в печи. Коэффициент трения образца, сульфиди-

рованного после предварительного отжига, имеет близкое значение к коэффициенту трения сульфидированного образца без предварительной обработки. Убыль массы при трении образца с предварительным отжигом в 1,3 раза больше, чем у образца без предварительной термической обработки.

Небольшая разница в трибологических характеристиках сульфидированных образцов без предварительной термической обработки и отожженных перед сульфидированием связана с различным количеством дефектов кристаллического строения. Предварительный отжиг обеспечивает более равновесную структуру с меньшим количеством дефектов кристаллического строения, чем у необработанного образца в состоянии поставки. Диффузия серы идет преимущественно по вакансионному механизму и вдоль дислокаций из-за большого радиуса растворенных атомов в железной решетке растворителя. В связи с этим для

образцов без предварительного отжига возникает принципиальная возможность для диффузии более крупных сульфидов и итоговое содержание сульфидов в них больше. Кроме того, при таком механизме диффузии связь сульфидов с решеткой твердого раствора преимущественно некогерентная или полуккогерентная. Износостойкость стали тем выше, чем в большей степени нарушается когерентная связь между сульфидами и железной матрицей в сульфидированном слое.

ВЫВОДЫ

1. Показана принципиальная возможность проведения плазменно-электролитного сульфидирования инструментальной стали У8А в водном растворе электролита на основе диметилсульфоксида и сульфата аммония.

2. Определены структурно-фазовые изменения при обработке стали: при сульфидировании в поверхностном слое образуются сульфиды железа FeS , Fe_3S_4 и Fe_2S_3 , количество которых определяется применением термической обработки до и после насыщения, закалка после ПЭС приводит к формированию мартенсита, а в результате высокотемпературного окисления на поверхности образуются оксиды Fe_3O_4 .

3. Установлено, что убыль массы при трении образца после плазменно-электролитного сульфидирования с закалкой в 17 раз меньше, чем у необработанного образца, в 13 раз ниже, чем у образцов, закаленных в воде и масле, и в 14 раз ниже, чем у отожженного в печи. Износостойкость сульфидированной стали У8А определяется структурой материала зоны деформации, содержащей сульфиды железа FeS , Fe_2S_3 , Fe_3S_4 , при трении.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20082, <https://rscf.ru/project/24-29-20082/>

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Ali, S., The future of mechanical engineering: Trends and technologies in machine and equipment development, *Int. J. Multiphys.*, 2024, vol. 18, no. 4, p. 313.
- Suslov, A., Petreshin, D., Shalygin, M.G. and Khandozhko, V., Automated technological support and improvement of the operational properties of machine parts, *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2024, vol. 157, no. 7, p. 24
<https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-24-33>
- Colledani, M. and Yemane, A., Impact of machine reliability data uncertainty on the design and operation of manufacturing systems, *Procedia CIRP*, 2013, vol. 7, p. 557.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.032>
- Vasiliev, A.S., Controlled forming of machine components operating characteristics, *Proc. Eng.*, 2016, vol. 150, p. 975.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.073>
- Suslov, A., Gorlenko, A., Shalygin, M. and Shohiyon, A., Science behind of high-tech tribotechnologies development, *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2025, no. 6, p. 2.
<https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-5-3-10>
- Ribeiro, J.E., César, M.B. and Lopes, H., Optimization of machining parameters to improve the surface quality, *Proc. Struct. Integr.*, 2017, vol. 5, p. 355.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.182>
- Apelfeld, A., Grigoriev, S., Krit, B., Ludin, V., et al., Improving the stability of the coating properties for group plasma electrolytic oxidation, *Manuf. Lett.*, 2022, vol. 33, p. 54.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.08.005>
- Grigoriev, S., Peretyagin, N., Apelfeld, A., Smirnov, A., et al., Investigation of tribological characteristics of PEO coatings formed on Ti6Al4V titanium alloy in electrolytes with graphene oxide additives, *Materials*, 2023, vol. 16, art. ID 3928.
<https://doi.org/10.3390/ma16113928>
- Valizade, N., Sabour Rouh, Aghdam, A. and Jarjoura, G., Corrosion and biological study on biofunctionalized porous coating on titanium produced by plasma electrolytic oxidation, *Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2024, vol. 688, art. ID 133567.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133567>
- Grigoriev, S.N., Kondratsky, I.O., Krit, B.L., Ludin, V.B., et al., Protective and thermophysical characteristics of plasma-electrolytic coatings on the ultralight magnesium alloy, *J. Eng. Mater. Technol.*, 2022, vol. 144, art. ID 021006.
<https://doi.org/10.1115/1.4052718>
- Witzke, K., Kensbock, R., Willsch, C.U., Fricke, K., et al., Mechanical and plasma electrolytic polishing of dental alloys, *Materials*, 2023, vol. 16, art. ID 6222.
<https://doi.org/10.3390/ma16186222>
- Xiang, Y., Sun, H., Yang, D., Ji, G., et al., Material removal model for describing the plasma discharge effect in magnetic-electrolytic plasma polishing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, vol. 131, art. ID 5023.
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13328-x>
- Grigoriev, S., Peretyagin, N., Apelfeld, A., Smirnov, A., et al., Investigation of the characteristics of MAO coatings formed on Ti6Al4V titanium alloy in electrolytes with graphene oxide additives, *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, p. 142.
<https://doi.org/10.3390/jcs7040142>

14. Apelfeld, A., Borisov, A., Dyakov, I., Grigoriev, S., et al., Enhancement of medium-carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing, *Metals*, 2021, vol. 11, art. ID 1599.
<https://doi.org/10.3390/met11101599>
15. Tambovskiy, I., Mukhacheva, T., Gorokhov, I., Suminov, I., et al., Features of cathodic plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel in an aqueous electrolyte of ammonium nitrate and glycerin, *Metals*, 2022, vol. 12, art. ID 1773.
<https://doi.org/10.3390/met12101773>
16. Chongyang, N., Tianlin, Z., Yue, X., Lixia, Y., et al., Study on preparation and friction characteristics of steel 1045 modified layer based on plasma electrolytic carbonitriding, *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 33, art. ID 104518.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104518>
17. Belkin, P.N., Dyakov, I.G., Zhironov, A.V., Kusmanov, S.A., et al., Effect of compositions of active electrolytes on properties of anodic carburization, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2010, vol. 46, no. 6, p. 715.
<https://doi.org/10.1134/S2070205110060158>
18. Pérez, H., Vargas, G., Magdaleno, C., Silva, R., Oxy-nitriding AISI 304 stainless steel by plasma electrolytic surface saturation to increase wear resistance, *Metals*, 2023, vol. 13, art. ID 309.
<https://doi.org/10.3390/met13020309>
19. Kusmanov, S.A., Tambovskii, I.V., Korableva, S.S., Mukhacheva, T.L., et al., Wear resistance increase in Ti6Al4V titanium alloy using a cathodic plasma electrolytic nitriding, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, no. 5, p. 451.
<https://doi.org/10.3103/S1068375522050088>
20. Jiang, Y.F., Bao, Y.F. and Yang, K., Effect of C/N concentration fluctuation on formation of plasma electrolytic carbonitriding coating on Q235, *J. Iron Steel Res.*, 2012, vol. 19, p. 39.
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60018-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60018-7)
21. Shen, D.J., Wang, Y.L., Nash, P. and Xing, G.Z., A novel method of surface modification for steel by plasma electrolysis carbonitriding, *Mater. Sci. Eng.: A*, 2007, vol. 458, p. 240.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.067>
22. Kusmanov, S., Mukhacheva, T., Tambovskiy, I., Naumov, A., et al., Increasing hardness and wear resistance of austenitic stainless steel surface by anodic plasma electrolytic treatment, *Metals*, 2023, vol. 13, art. ID 872.
<https://doi.org/10.3390/met13050872>
23. Aliofkhazraei, M., Taheri, P., Sabour Rouh, Aghdam, A. and Dehghanian, C., Study of nanocrystalline plasma electrolytic carbonitriding for CP-Ti, *Mater. Sci.*, 2007, vol. 43, p.791.
<https://doi.org/10.1007/s11003-008-9055-5>
24. Qin, Y., Xiong, D., Li, J. and Tyagi, R., Corrosion and bio-tribological properties of Ti(CN)_x hard coating on titanium alloy by the pulsed plasma electrolytic carbonitriding process, *Tribol. Int.*, 2015, vol. 82, p. 543.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.07.023>
25. Kusmanov, S.A., Tambovskii, I.V., Korableva, S.S., Silkin, S.A., et al., Increase in hardness and corrosion resistance of a medium-carbon steel surface using cathodic plasma electrolytic nitriding, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, no. 4, p. 323.
<https://doi.org/10.3103/S106837552204010X>

Summary

The paper presents the results of using plasma electrolytic treatment for sulfiding of carbon tool steel. The steel surface was saturated with sulfur in an electrolyte based on ammonium sulfate and dimethylsulfoxide at a temperature of 550 °C. Before and after diffusion saturation, various types of heat treatment were applied: quenching from a temperature of 780 °C after sulfiding, tempering before and after saturation from a temperature of 780 °C. An analysis of the structural and phase changes in the sulfided surface revealed the formation of FeS, Fe₃S₄, and Fe₂S₃ iron sulfides, the amount of which is determined by the use of heat treatment before and after saturation, the formation of martensite after quenching and Fe₃O₄ oxides as a result of high-temperature oxidation. Tribological tests were conducted in the dry friction mode using the "shaft-bushing" scheme under a load of 10 N, the sliding speed of the sample on the counter body of 1.555 m/s per 1000 m of the friction path. An increase in weight wear after plasma electrolytic sulfiding with quenching was found to be 17 times greater than that of an untreated sample, 13 times greater than that of water- and oil-quenched samples, and 14 times greater than that of tempered samples. The wear resistance of sulfided steel was determined by the structure of the deformation zone material during friction, containing iron sulfides.

Keywords: plasma electrolytic treatment, sulfiding, carbon tool steel, wear resistance, friction coefficient