

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКОЙ

**ФЕДОРОВ СЕРГЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ**, докт. техн. наук, доцент

E-mail: momd@yandex.ru

**ИВАНОВА ЮЛИЯ СЕРГЕЕВНА**, канд. техн. наук

E-mail: yyulianius@gmail.ru

**ВЛАСОВ МАКСИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ**, аспирант

E-mail: mr.vlasovm@yandex.ru

**ЛАШУКОВ МИХАИЛ АНДРЕЕВИЧ**, аспирант

E-mail: misha2508@mail.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет); 105005, ул. 2-я Бауманская, д. 5, Москва, Российская Федерация

Упрочнение деталей из стали и чугуна электромеханической поверхностной закалкой является одной из эффективных технологий закалки исполнительных поверхностей изделий концентрированными потоками энергии. В работе приведены результаты сравнительных износных испытаний образцов из стали 38Х2МЮА после упрочнения их наружного диаметра концентрированными потоками энергии азотированием и электромеханической поверхностной закалкой (ЭМПЗ). Продолжительность испытаний составляла 60, 120, 240 и 480 секунд. Азотирование осуществлялось в течение 18 часов при температуре 550°C. ЭМПЗ образцов цилиндрической формы проводилось при температуре в зоне контакта «инструмент-поверхность» 1000...1100°C и оптимальном усилии в зоне контакта инструмента и образцов 400 Н. Сравнительные испытания износостойкости обработанной поверхности образцов проводились на машине трения по методике American Society for Testing and Materials (ASTM G65). Результаты износных испытаний образцов свидетельствуют о высокой эффективности технологии по сравнению с исходными образцами: интенсивность изнашивания образцов за 240 с испытаний для азотирования составила 3,8 мг/мин, а после ЭМПЗ – 4,8 мг/мин; за период испытаний 240-480 с интенсивность изнашивания образцов для азотирования составила 2,6 мг/мин, а после ЭМПЗ – 2,55 мг/мин. Практическая значимость исследований связана с возможностью замены процесса азотирования на менее затратную технологию. Эффективность технологии электромеханической поверхностной закалки связана с возможностью реализации метода на металлорежущих станках с формированием высоких показателей качества поверхностного слоя деталей по твердости, структуре металла и глубине упрочнения. Реализация результатов исследований позволяет использовать электромеханическую поверхностную закалку при изготовлении и восстановлении валов, втулок, зубчатых колес, валов-шестерен и других деталей сельскохозяйственной техники в условиях механических цехов.

**Ключевые слова:** износ, электромеханическая обработка, азотирование, термообработка, упрочнение.

**Формат цитирования:** Федоров С.К., Иванова Ю.С., Власов М.В., Лашуков М.А. Повышение износостойкости деталей электромеханической поверхностной закалкой // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. N2(90). С. 40-44.

## IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF PARTS WITH ELECTROMECHANICAL SURFACE HARDENING

**SERGEI K. FEDOROV**, PhD (Eng), Professor

E-mail: momd@yandex.ru

**YULIYA S. IVANOVA**, PhD (Eng)

E-mail: yyulianius@gmail.ru

**MAKSIM V. VLASOV**, postgraduate student

E-mail: mr.vlasovm@yandex.ru

**MIKHAIL A. LASHUKOV**, postgraduate student

E-mail: misha2508@mail.ru

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University); 2nd Baumanskaya Str., 5, Moscow, 105005, Russian Federation

The hardening of parts made of steel and cast iron by electromechanical surface treatment is one of the effective technologies for hardening the important surfaces of products with concentrated energy flows. The paper presents the results of comparative wear tests of steel 38X2MЮА samples after hardening of their outer diameter by concentrated energy flows by nitriding and electromechanical surface hardening (EMSH). The test duration was 60, 120, 240 and 480 seconds. Nitriding was carried out for 18 hours at a temperature of 550°C. EMSH of cylindrical shaped samples was carried out at a temperature of 1000...1100°C in the "tool-surface" contact zone and an optimum force was 400 N in the contact zone of the instrument and samples. Comparative tests of the wear resistance of the treated surface of the samples were carried out on a friction machine according to the method of the American Society for Testing and Materials (ASTM G65). The results of the wear tests of the samples indicate a high efficiency of the technology as compared to the original samples: the wear rate of the samples for 240 s of tests by nitriding was 3.8 mg/min, and after the EMSH – 4.8 mg/min; for the period of tests 240-480 with the wear intensity of the samples by nitriding was 2.6 mg/min, and after the EMSH – 2.55 mg/min. The practical significance of the research is connected with a possibility of replacing the nitriding process with a less expensive technology. The effectiveness of the electromechanical surface hardening technology is associated with a possibility of implementing the method on metal-cutting machines with the formation of high quality indicators for the surface layer of parts in terms of hardness, metal structure and the depth of hardening. The implementation of research results allows the use of electromechanical surface hardening in the manufacturing and restoration of shafts, sleeves, gear wheels, gear shafts and other farm machinery parts in mechanical repair shops.

**Key words:** wear, electromechanical treatment, nitridation, heat treatment, hardening.

**For citation:** Fedorov S.K., Ivanova Yu.S., Vlasov M.V., Lashukov M.A. Improving the wear resistance of parts with electromechanical surface hardening. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019; 2(90): 40-44. (In Rus.).

**Введение.** Дальнейшее развитие машиностроения невозможно без разработки эффективных технологий, способных повысить надежность работы машин и технологического оборудования в различных условиях эксплуатации [1]. Повышение износостойкости деталей машин решаются главным образом путем улучшения их эксплуатационных показателей, в первую очередь за счет изменения структуры и увеличения твердости поверхностного слоя деталей. В производственных циклах машиностроительных предприятий и на ремонтных участках большое распространение получило изготовление и ремонт механизмов с зубчатыми передачами.

Технология изготовления деталей машин с зубчатым профилем включает в себя как механическую, так и термическую обработку. Традиционно применяемыми методами изготовления зубчатых колес являются объемная термообработка, закалка токами высокой частоты (ТВЧ), химико-термическая обработка, финишные способы обработки (шлифование, зубошевенование, хонингование). Процессы термической и химико-термической обработки являются вредными и экологически небезопасными. При термической обработке присутствуют такие дефекты, как неравномерная твердость по сечению, коробление, возможно появление термических микротрещин и развитие микротрещин, окисление и обезуглероживание поверхностного слоя, сложность последующей финишной обработки шлифованием и хонингованием [2, 3].

Применение объемной термической обработки обеспечивает только общую прочность детали, в то время как по условиям эксплуатации требуется дополнительная закалка зубчатых профилей. Закалка ТВЧ, повышая твердость зубьев, одновременно приводит к их короблению и хрупкости, особенно для зубчатых колес с небольшим модулем. Процесс химико-термической обработки (ХТО) имеет ограничения по размеру и массе зубчатых колес и недостаточной толщине упрочненного слоя зубьев.

Одним из направлений электромеханической обработки (ЭМО) является электромеханическая поверхностная закалка (ЭМПЗ). Процесс ЭМПЗ является способом

контактной обработки поверхностей высококонцентрированным потоком электрической энергии, объединяющим силовое и термическое воздействие инструмента на поверхность заготовки с формированием высоких показателей качества деталей [4-7].

**Цель исследования** – определение износостойкости образцов без упрочнения после азотирования и электромеханической поверхностной закалки в условиях абразивного износа.

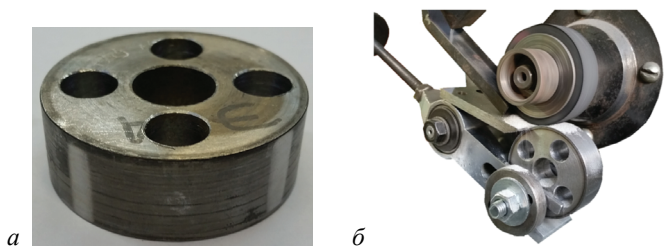
**Методика.** В работе применен эффект электроконтактной закалки и одновременного поверхностного пластического деформирования контактной зоны зубчатого профиля методом электромеханической обработки (ЭМО).

Известно, что для азотирования используются среднеуглеродистые легированные стали, содержащие хром, молибден, вольфрам, алюминий. При азотировании сталей 40X, 38X2MЮА, 35XMЮА образуются устойчивые нитриды, которые обеспечивают высокую твердость поверхностного слоя.

Необходимо отметить, что с точки зрения получения высокой износостойкости при ЭМПЗ, азотируемые стали не являются оптимальными. Более высокие показатели по твердости и износостойкости наблюдаются при ЭМПЗ высокоуглеродистых и инструментальных сталей 65Г, 60С2А, ХВГ, 9ХС, ШХ15.

Исследования проводились на образцах из стали 38X2MЮА, которая широко применяется для изготовления зубчатых колес, гильз цилиндров, червяков, шпинделей, втулок и других деталей сельскохозяйственных машин.

Износные испытания проведены на трех партиях образцов: без упрочнения, после азотирования, после ЭМПЗ. Исследованы по три образца в каждой партии. Все образцы изготовлены методами резания из одного пруткового материала. На каждом образце по четыре поверхности (рис. 1, а), которые поэтапно подвергались абразивному износу в паре с резиновым роликом (рис. 1, б). Продолжительность испытаний составляла 60, 120, 240 и 480 секунд.



**Рис. 1. Фрагмент образца (а) и процесса испытания (б)**  
**Fig. 1. Fragment of the sample (a) and the test process (b)**

Партия образцов подвергалась упрочнению на оборудовании для ионного азотирования модели ION-25I (ION Nitriding installation, IONITECH LTD) на кафедре «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ионное азотирование осуществляется в дуге, возбуждаемой между анодом (стенка камеры) и катодом (образцы) в среде смеси азота с водородом (25% N<sub>2</sub> + 75% H<sub>2</sub>) и аммиака (80...90% N<sub>2</sub> + 20...10% NH<sub>3</sub>). Тлеющий разряд протекает при пониженном давлении (133...1330 Па), разности потенциалов 400...800 В и температуре 300...600°C. В прикатодной области образуются положительные ионы азота, бомбардирующие поверхность образцов, в результате чего они нагреваются (высокая кинетическая энергия, которую имели ионы азота, переходит в тепловую). Вследствие чего образцы за короткое время (15-30 минут) разогреваются и происходит диффузия азота вглубь металла, т.е. идет процесс азотирования. По окончании насыщения образцы остывают в разряженной атмосфере инертного газа. При достижении температуры 150°C камера открывается, образцы охлаждаются.

Процесс азотирования продолжался в течение 18 часов при температуре 550°C в автоматизированном режиме. Регулирование всех основных параметров процесса осуществлялся главным контроллером.

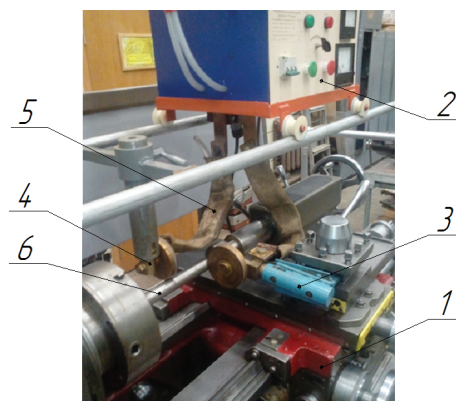
ЭМПЗ образцов цилиндрической формы проводилось на токарно-винторезном станке 16K20 кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, модернизированном под ЭМПЗ (рис. 2).

Установка электромеханической обработки 2 (рис. 2) состоит из силового понижающего трансформатора, аппаратуры регулирования электрических параметров, приборов контроля, наблюдения и защиты, собранных в едином шкафу. Установка изготовлена таким образом, что возможна плавная регулировка электрических параметров посредством использования тиристорного привода. Державка 3 крепится в резцедержателе токарно-винторезного станка 1 и изолируется от металлических частей станка текстолитовыми прокладками. Подвод электрического тока на заготовку осуществляется через вращающийся бронзовый ролик токоподводящего устройства 4. Подвод электрического тока в зону контакта инструмента и поверхности заготовки 6 от вторичной обмотки трансформатора установки выполняется за счет силовых токоподводящих медных шин 5.

Технические характеристики установки электромеханической обработки следующие:

- напряжение питания 380/220 В;
- номинальная частота 50 Гц;
- номинальная мощность 25 кВт;

- ток вторичной цепи 0...3000 А;
- напряжение вторичной цепи 0...4 В;
- габаритные размеры (высота, ширина, длина) 350 × 460 × 420 мм;
- вес установки 35 кг.



**Рис. 2. Фрагмент размещения оборудования и процесса ЭМПЗ образцов на токарно-винторезном станке 16K20:**

- 1 – станок; 2 – установка электромеханической обработки; 3 – державка телескопическая; 4 – токоподводящее устройство; 5 – шины токоподводящие; 6 – заготовка

**Fig. 2. Fragment of equipment and process placement of electromechanical surface hardening samples processed with a 16K20 turning-screw-cutting lathe:**

- 1 – a lathe; 2 – an installation of electromechanical processing; 3 – a telescopic holder; 4 – a current supply device; 5 – power feed bars; 6 – a sample

При ЭМПЗ на поверхность инструмента одновременно воздействуют электрические и механические факторы. Для выполнения процессов ЭМПЗ необходимо, чтобы инструмент имел высокую износостойкость и красностойкость до 1200°C. Температура в зоне контакта «инструмент-поверхность» достигает 1000...1100°C. Оптимальное усилие в зоне контакта инструмента и образцов установлено 400 Н.

Сравнительные испытания износостойкости обработанной поверхности образцов проводили на машине трения по методике American Society for Testing and Materials (ASTM G65) «Стандартная методика измерения абразивного истирания при помощи установки «Сухой песок / Резиновое колесо» и ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий» по схеме «резиновый ролик – неподвижный образец». Образцы, затянутые гайкой, фиксировали на оправке. Такой способ закрепления образцов и схема проведения испытаний обеспечивали хорошую воспроизводимость результатов при повторных опытах. Образец неподвижно закреплен на основании маятникового рычага, с торца которого ввинчен рычаг. На правый край этого рычага подвешивался груз, который обеспечивал постоянную нагрузку в зоне контакта образца и резинового ролика. Через вращающийся дозатор по направляющему лотку в зону контакта образца и резинового ролика подавался абразив – кварцевый песок размером 16 мкм. Нагрузка в зоне трения создавалась за счёт груза весом 1050 г, который крепился на расстоянии 185 мм от точки контакта. Испытание

проводилось при частоте вращения резинового ролика 500 об/мин.

Износ образцов определялся взвешиванием до и после испытаний на весах фирмы AND GR200.

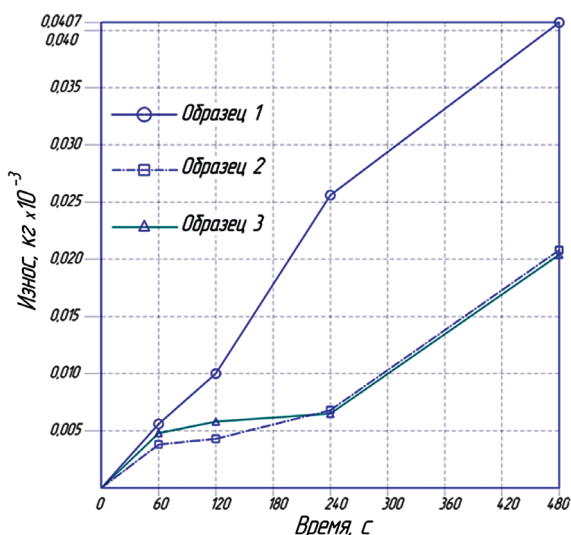
Образцы до и после испытаний очищались ацетоном и сушились в муфельной печи при температуре 60°C. Результаты износных испытаний образцов приведены в таблице.

**Результаты износных испытаний образцов**

**Sample wear test results**

Продолжительность испытания, сек.	Износ образцов, г		
	без упрочнения	после азотирования	после ЭМПЗ
60	0,0056	0,0038	0,0048
120	0,0100	0,0043	0,0058
240	0,0256	0,0068	0,0065
480	0,0407	0,0208	0,0204

Динамика износа образцов приведена на рисунке 3.



**Рис. 3. Зависимости износа образцов от времени испытаний:**

1 – исходный образец, 2 – азотирование, 3 – ЭМПЗ

**Fig. 3. Relationships between sample wear and testing time:**

1 – initial sample, 2 – nitriding, 3 – electromechanical surface hardening

Результаты износных испытаний образцов из стали 38Х2МЮА после азотирования и ЭМПЗ свидетельствуют о высокой эффективности технологии, по сравнению с исходными образцами. При этом образцы после азотирования, на начальной стадии испытаний, показали более высокую износостойкость в сравнении с образцами после ЭМПЗ. Интенсивность изнашивания образцов за 240 секунд испытаний составляет для азотирования 3,8 мг/мин, а после ЭМПЗ – 4,8 мг/мин. Однако уже после 240 секунд испытаний износостойкость образцов после ЭМПЗ была выше, чем за аналогичное время испытаний азотированных образцов (табл. 2 и рис. 5.). За интервал испытаний 240-480 секунд интенсивность изнашивания образцов для азотирования составила 2,6 мг/мин, а после ЭМПЗ – 2,55 мг/мин.

Данное обстоятельство объясняется специфичной структурой и переменной твердостью поверхностного

слоя после ЭМПЗ. В результате ЭМПЗ на образцах из стали 38Х2МЮА формируется градиентная структура металла с более высокой твердостью на удалении от поверхности 0,05...0,1 мм. Такое явление при ЭМПЗ характерно для большинства способов закалки сталей, основанных на использовании концентрированных потоков энергии, например, закалки сталей лазерным лучом.

Способ ЭМПЗ основан на контактной обработке поверхностей высококонцентрированным потоком электрической энергии промышленной частоты, когда силовое и термическое воздействие инструмента на поверхность образцов осуществляется одновременно. Высокая скорость нагрева и отвода тепла нижележащими слоями металла позволяет получать твердость выше, чем при объемной закалке, закалке ТВЧ и исключить дефекты, характерные для традиционных методов термической обработки [4].

Теоретические данные свидетельствуют, что, азотирование обеспечивает твердость до 1200 HV. Однако незначительная толщина упрочненного слоя (0,1...0,5 мм) делает поверхности чувствительными к перегрузкам и непригодными для работы в условиях повышенного абразивного износа и больших контактных нагрузок [7].

**Выводы**

1. В условиях абразивного износа существующая технология изготовления и упрочнения деталей из стали 38Х2МЮА твердостью до 32...36HRC не обеспечивает высокой износостойкости поверхностного слоя.

2. Износостойкость образцов из стали 38Х2МЮА после азотирования и ЭМПЗ по сравнению с исходным состоянием увеличилась в 2 раза, что позволяет использовать результаты исследований для закалки деталей машин при их изготовлении и ремонте.

3. Конкурентной особенностью технологии ЭМПЗ стали 38Х2МЮА является возможность гибкого управления параметрами скоростного электронагрева и одновременного термопластического деформирования материала поверхностного слоя наиболее нагруженных участков деталей с целью формирования градиентных быстрозакаленных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственных машин.

**Библиографический список**

1. Ерохин М.Н., Казанцев С.П. Детали машин: Учебник. М: ТРАНСЛОГ, 2018. 410 с.
2. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. М.: Университетская книга, 2009. 488 с.
3. Казанцев С.П. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионными хромонитридными покрытиями: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 182 с.
4. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 197 с.
5. Федорова Л.В., Федоров С.К. Расширение технологических возможностей токарно-винторезного станка // Техника и оборудование для села. 2005. № 12. С. 22-24.
6. Федорова Л.В., Федоров С.К., Семенов А.Н. Повышение надежности быстроизнашивающихся деталей // Технологии мира. 2008. № 06. С. 30-32.
7. Федорова Л.В., Стрельцов В.В., Алексеева (Иванова) Ю.С., Федоров С.К. Электромеханическая обработка и восстановление деталей дорожно-строительной техники // Строительные и дорожные машины. 2008. № 8. С. 32-35.

**References**

1. Yerokhin M.N., Kazantsev S.P. Detali mashin: Uchebnik [Machine parts: Study manual]. Moscow, TRANSLLOG, 2018: 410. (In Rus.).

**Критерии авторства**

Федоров С.К., Иванова Ю.С., Власов М.В., Лашуков М.А. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Федоров С.К., Иванова Ю.С., Власов М.В., Лашуков М.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 30.01.2019

2. Yelagina O.Yu. Tekhnologicheskiye metody povysheniya iznosostoykosti detaley mashin [Technological methods to improve the wear resistance of machine parts]. Moscow, Universitetskaya kniga, 2009: 488. (In Rus.).

3. Kazantsev S.P. Vosstanovleniye plunzhernykh par toplivnykh nasosov raspredelitel'nogo tipa diffuzionnymi khromonitridnymi pokrytiyami: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Restoration of plunger pairs of distribution-type fuel pumps with diffusion chromonitride coatings: PhD (Eng) thesis]. Moscow, 1988: 182. (In Rus.).

4. Askinazi B.M. Uprochneniye i vosstanovleniye detaley mashin elektromekhanicheskoy obrabotkoy [Hardening and restoration of machine parts by electromechanical treatment]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1989: 197. (In Rus.).

5. Fedorova L.V., Fedorov S.K. Rasshireniye tekhnologicheskikh vozmozhnostey tokarno-vintoreznogo stanoka [Extending the technological capabilities of a screw-cutting lathe]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2005; 12: 22-24. (In Rus.).

6. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Semenov A.N. Povysheniye nadezhnosti bystroiznashivayushchikhsya detaley [Improving the reliability of wearing parts]. *Tekhnologii mira*, 2008; 6: 30-32. (In Rus.).

7. Fedorova L.V., Strel'tsov V.V., Alekseyeva (Ivanova) Yu.S., Fedorov S.K. Elektromekhanicheskaya obrabotka i vosstanovleniye detaley dorozhno-stroitel'noy tekhniki [Electromechanical treatment and restoration of road construction equipment parts]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*, 2008; 8: 32-35. (In Rus.).

**Contribution**

Fedorov S.K., Ivanova Yu.S., Vlasov M.V., Lashukov M.A. carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Fedorov S.K., Ivanova Yu.S., Vlasov M.V., Lashukov M.A. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on January 30, 2019