

DOI: 10.58168/TBiEc2025_211-218

УДК 629.3.083

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

RESTORATION OF MACHINE PARTS AS A RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY

Марков В.А., кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия.

Марков А.Н., кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия.

Шульман Г.З., доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия.

Markov V.A., candidate of Technical Sciences, Associate Professor FGBOU VO «St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design», St. Petersburg, Russia.

Markov A.N., candidate of Technical Sciences, Associate Professor FGBOU VO «St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design», St. Petersburg, Russia.

Shulman G.Z., associate Professor FGBOU VO «St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design», St. Petersburg, Russia.

Аннотация: статья посвящена вопросам ресурсосберегающих технологий в машиностроении и при ремонте машин, акцентируя внимание на восстановлении деталей машин и оборудования как эффективном способе экономии материалов и энергоресурсов. Рассматривается перспективность альтернативных методов восстановления и поверхностной обработки деталей. Особое внимание уделено электромеханическому упрочнению (ЭМУ), которое позволяет увеличить твердость и износостойкость поверхностей, повышая эксплуатационные свойства деталей и сокращая расходы на материалы и энергию. Приводятся данные экспериментов, подтверждающие эффективность метода, а также описаны особенности реализации данной технологии и перспективы ее дальнейшего внедрения в промышленное производство. Отмечается высокая экологичность представленного метода восстановления.

Abstract: the article is devoted to the issues of resource-saving technologies in mechanical engineering and machine repair, focusing on the restoration of machine and equipment parts as an effective way to save materials and energy resources. The prospects of alternative methods of restoration and surface treatment of parts are considered. Special attention is paid to electromechanical hardening (EMU), which increases the hardness and wear resistance of surfaces, increasing the performance properties of parts and reducing material and energy costs. Experimental data confirming the effectiveness of the method are presented, as well as the specifics

of the implementation of this technology and the prospects for its further introduction into industrial production. The high environmental friendliness of the presented recovery method is noted.

Ключевые слова: восстановление деталей, электромеханическая обработка, ресурсосбережение, ресурс деталей, экологичные технологии.

Keywords: restoration of parts, electromechanical processing, resource conservation, parts resource, eco-friendly technologies.

Ресурсосбережение — одна из ключевых тенденций современного производства, направленная на экономию материалов, энергии и природных ресурсов. Одним из эффективных способов достижения этих целей является восстановление деталей машин и оборудования. Эта технология позволяет значительно продлить срок службы изделий, снизить затраты на производство новых компонентов и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

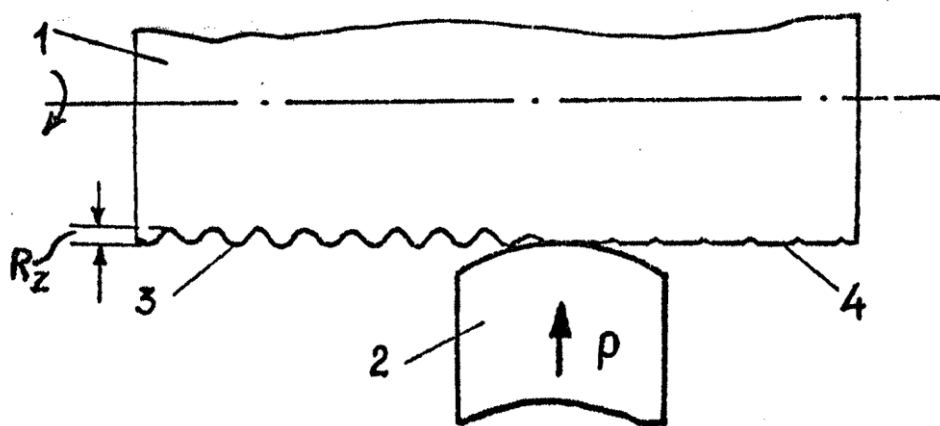
Существует множество методов восстановления деталей, каждый из которых имеет свои преимущества, недостатки и области применения. Большая часть методов восстановления изношенных поверхностей деталей связаны с нанесением покрытий различными технологиями. Восстановленные такими методами детали не всегда имеют ресурс новых. Причинами снижения долговечности восстановленных деталей являются несовершенство методов восстановления, нарушение технологического процесса, неправильный выбор материала для нанесения покрытия и множество других факторов, которые как по отдельности, так и в совокупности влияют на эксплуатационные показатели деталей.

Для достижения необходимых геометрических параметров, детали обрабатывают механически на различных металлорежущих станках, однако существуют альтернативные технологии поствосстановительных работ.

Электромеханическое упрочнение (ЭМУ) представляет собой финишную операцию, обеспечивающую повышение чистоты поверхности после токарной обработки, устраняя необходимость последующего шлифования. Благодаря этому методу возможно увеличение твердости поверхностного слоя более чем в 2 раза и износостойкости контактирующих поверхностей до 2-х раз, в зависимости от предшествующей термической обработки детали. Помимо этого, ЭМУ способствует увеличению циклической прочности изделия в пределах от 2 до 6 раз, что зависит от конструктивных особенностей детали и характеристик её поперечных сечений. Следовательно, в ряде случаев данная процедура способна заменить специализированные процессы термического и химико-термического воздействия [1].

На рисунке 1 представлена схема электромеханического упрочнения поверхности. Детали 1 сообщается вращательное движение, а инструменту 2 – поступательное. Грубая поверхность 3, обработанная резцом, после прохода сглаживающего инструмента принимает профиль 4.

Технология электромеханического упрочнения реализуется следующим образом. Изделие закрепляется на стандартном токарном оборудовании. Ток величиной 350-1500А и напряжением 2-6В подается непосредственно в область соприкосновения обрабатываемого элемента и инструмента посредством силового понижающего трансформатора, подключенного к сети переменного напряжения 220/380 вольт. Один вывод вторичной обмотки трансформатора соединяется с электрооборудованием, передающим ток через вращающийся патрон на заготовку, второй же вывод направляется к специальному инструменту, зафиксированному изолированным способом в держателе станка. Сам инструмент оснащен роликом из твердого сплава, который постоянно контактирует с поверхностью вращающегося изделия [2].



1 – деталь; 2 – выравнивающий ролик; 3 – первоначальная поверхность;
4 – поверхность после упрочнения

Рисунок 1 - Схема электромеханического упрочнения поверхности

Из-за небольшой площади зоны контакта возникает значительное электрическое сопротивление, вследствие чего в точке взаимодействия резко возрастает температура благодаря выделению электрической энергии. Под действием радиальной силы инструмента обрабатываемая поверхность подвергается деформации: либо сглаживанию, либо формированию выступов, в зависимости от конфигурации самого инструмента. Поскольку величина разогретых слоев крайне незначителен относительно общей массы заготовки, тепло быстро отводится внутрь детали, обеспечивая интенсивное охлаждение поверхностного слоя и последующую закалку до высоких значений твердости. Инструмент (державка) с твёрдосплавным роликом представлен на рисунке 1 [3].

Основным выходным технологическим параметром при электромеханическом упрочнении является глубина прокаливания, от нее зависят физико-механические свойства восстанавливаемой поверхности и адгезия покрытия с основным материалом. Экспериментально установлено, что для оптимальной прочности сцепления наносимого материала на деталь, прокаливание должно быть на глубину не менее 120% от толщины покрытия. Глубину упрочнения можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{K\mu(0,24 \eta JU + Pvf / 42,7)}{cvB\rho T_{\phi}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий количество поглощаемой теплоты,

$K_{\text{ср}} = 0,234$;

μ – коэффициент, определяющий количество теплоты, создаваемой в зоне контакта и отводимой в упрочняемую деталь (0,5–0,6);

η – коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора (0,42);

J – сила тока А;

U – напряжение тока во вторичной цепи, 2–6 В;

P – нормальное давление, $P = 300$ – 600 Н;

v – скорость сглаживания;

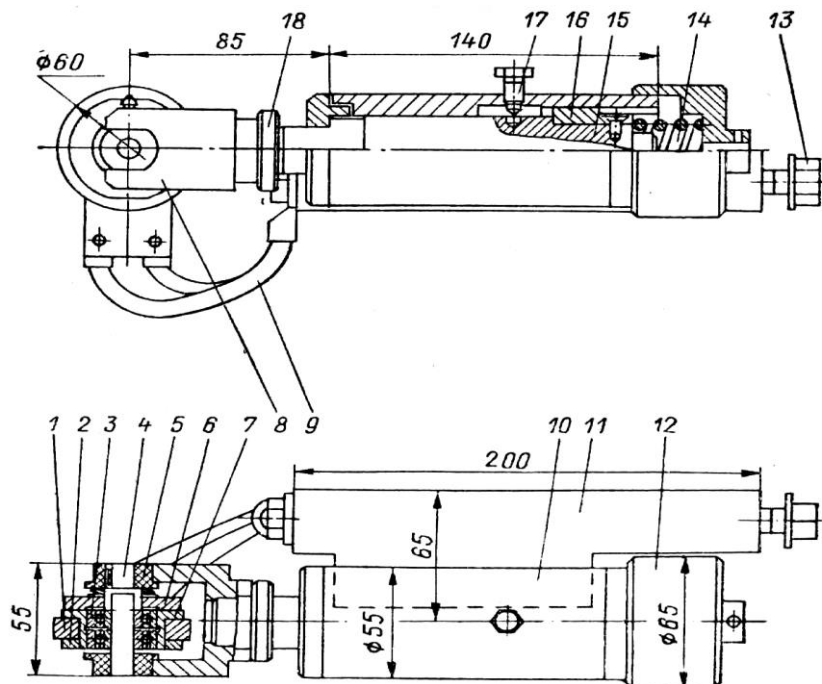
f – коэффициент трения (0,65–0,75);

c – удельная теплоемкость металла, Дж / (г·°С);

B – ширина контакта, мм;

ρ – плотность, г/мм³;

T_{ϕ} – температура фазового превращения металла.



1 – твердосплавное кольцо; 2 – шайба; 3 – подшипники; 4 – ось;

5 – изоляционная втулка; 6 – токосъемное кольцо; 7 – ролик; 8 – вилка;

9 – токоподводящая шина; 10 – корпус; 11 – место для крепления

в резцодержателе; 12 – колпачковая гайка; 13 – гайка крепления токопровода;

14 – пружина; 15 – шток; 16 – шпонка; 17 – болт; 18 – гайка крепления вилки

Рисунок 2 - Державка для выполнения электромеханического упрочнения.

Давление обрабатывающей пластины ЭМУ создает тангенциально направленную силу трения, которая способствует вытягиванию наружных слоев металла и возникновению растягивающих остаточных напряжений.

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие зависимости выходных факторов (H_{50} – микротвердость, R_a – шероховатость поверхности, δ – глубина упрочнения) от режимов обработки при электромеханическом упрочнении покрытия, нанесенного наплавкой в CO_2 с последующим точением:

$$\begin{aligned} H_{50} &= 1,0384 J^{0.9051} p^{0.1073} v^{-0.0127} s^{-0.459} \\ R_a &= 0,0116 J^{0.4855} p^{-0.3791} v^{0.7159} s^{-0.0323} \\ \delta &= 0,0275 J^{0.4147} p^{0.0162} v^{-0.0971} s^{-0.0262} \end{aligned} \quad (2)$$

При упрочнении покрытия, полученного железнением и хромированием, эксплуатационные показатели повышаются ниже, чем при наплавках. Режимы электромеханического упрочнения деталей, восстановленных железнением: $J = 650-850$ А, $v = 12-20$ м/мин; $p = 600-700$ Н; $S = 0,2-0,4$ мм/об.; число проходов 1-2. В ряде случаев железнение снижает предел выносливости восстановленных деталей до 50%, в результате же применения ЭМУ он повышается на 63%, а для стали 45 превышает ее исходные значения на 13%. Прочность сцепления покрытия с основным металлом при ЭМУ превышает на 15-40%. Большой процент увеличения прочности относится к более глубокому упрочнению.

Операция сглаживания может выполняться как движущимся, так и стационарным инструментом. Если условия электромеханической обработки идентичны, толщина упрочнённого слоя получается больше при обработке неподвижным инструментом. Здесь наблюдается эффект трения скольжения, приводящий к возникновению завихрённой микроструктуры и более мелкому измельчению поверхностного слоя. Однако детали, прошедшие обработку подвижным инструментом, отличаются повышенной долговечностью и устойчивостью к истиранию. Во время работы неподвижным инструментом с радиусом, на нём довольно быстро формируется плоская рабочая зона. Чтобы существенно повысить долговечность такого инструмента, на радиальном участке делают кольцевую фаску шириной около 0,5 мм. Для предотвращения быстрого износа перед началом каждого цикла обработки инструмент — роlikовое устройство — проворачивается на угол порядка 10–15°, обновляя рабочую поверхность. Среди недостатков неподвижного инструмента отмечается ограниченный срок его службы [4].

Преимущества вращающегося ролика: высокая стойкость, возможность упрочнения деталей на большую глубину. Вращающийся ролик применяют при обработке широких поверхностей, когда не предъявляются высоких требований к волнистости.

Для повышения стойкости инструмента целесообразно применять охлаждение сжатым воздухом, эмульсией или любой пожаробезопасной охлаждающей средой.

В результате термомеханического воздействия при электромеханическом упрочнении происходит значительное повышение износостойкости и циклической прочности деталей.

Износостойкость повышается в 1,4-1,8 раза, предел выносливости – на 10-20% по сравнению с новыми деталями.

Электромеханическое упрочнение нашло применение для повышения твердости металлопокрытий (предела выносливости), улучшения качества цилиндрических, плоских, винтовых и зубчатых поверхностей, при ремонте деталей из чугуна, подшипниковых сплавов и т.д.

Следует отметить, что ЭМУ возможно проводить парой роликов (высаживающий и сглаживающий) восстанавливая тем самым незначительный износ поверхности трения. Приспособление такого типа представлено на рисунке 3. При данном способе восстановления не применяется нанесения дополнительного материала на поверхность детали, а увеличение изношенного размера происходит за счет создания рельефа поверхности с выступами и впадинами. Восстановленная поверхность при этом обладает повышенной твердостью и износостойкостью по сравнению с исходным материалом, однако рельеф и хрупкость поверхности не позволяют говорить о высокой долговечности. Метод можно отнести к альтернативным восстановительным технологиям и рекомендовать как временный ремонт для поддержания работоспособного состояния узла в случае производственной необходимости или отсутствия запасных частей [5,6].

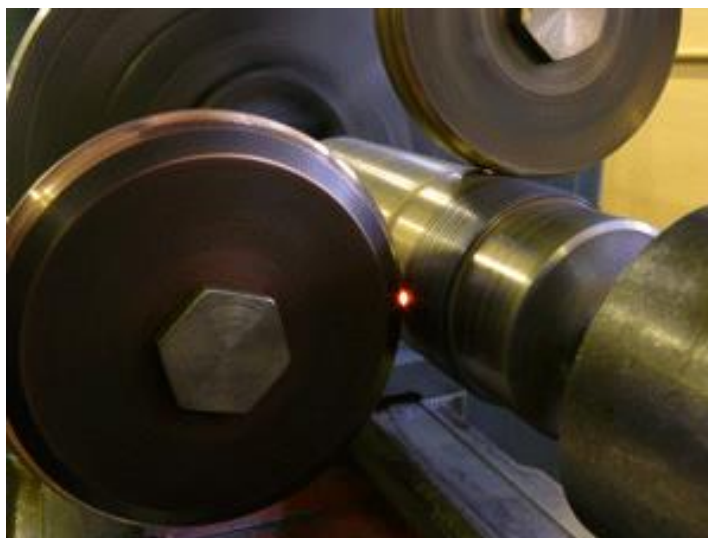


Рисунок 3 - Двухроlikовое приспособление

Электромеханический процесс является экологичной технологией, так как основан исключительно на механическом воздействии и не требует использования агрессивных химических веществ, растворителей или специальных газовых сред, что значительно снижает риск загрязнения окружающей среды и минимизирует образование токсичных сточных вод и газообразных продуктов реакции. Метод позволяет повысить ресурс детали без изменения химического состава поверхности, следовательно, исключается необходимость применения дорогостоящих легирующих элементов и редких материалов, снижаются затраты энергии и материальные издержки. Восстановление деталей

представляет собой ряд перспективных технологий, позволяющих эффективно решать проблемы ресурсосбережения и экологии. Развитие инновационных методов и совершенствование существующих технологий открывают новые возможности для оптимизации производственных процессов и сокращения издержек. Внедрение таких технологий становится важным фактором устойчивого развития экономики и сохранения окружающей среды [7].

Список литературы

1. Технология и организация восстановления деталей и сборочных единиц при сервисном обслуживании / В. В. Быков, И. Г. Голубев, В. В. Балихин [и др.]. – Йошкар-Ола : Марийский государственный технический университет, 2008. – 335 с.
2. Оптимизация выбора технологических процессов восстановления деталей / В. А. Марков, А. Н. Марков, В. И. Кретинин [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – № 217. – С. 194-205.
3. Пастухов, А. Г. Примеры применения установки для электромеханической обработки при упрочнении деталей машин / А. Г. Пастухов, О. А. Шарая // Главный механик. – 2021. – № 1. – С. 38-45.
4. Физико-механические свойства поверхностного слоя деталей после упрочнения электромеханической обработкой / А. П. Яковлева, В. Н. Зарипов, Т. Р. Хуснетдинов, В. Т. Нго // Главный механик. – 2019. – № 2. – С. 26-31.
5. Шифрин, Б. М. Оптимизация процесса резания металла на основе нечеткой логики / Б. М. Шифрин // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2024. – № 16. – С. 13-16.
6. Погодина, Э. Е. Применение электромеханической обработки для восстановления деталей машин / Э. Е. Погодина, Ф. А. Журавский, В. А. Марков // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : материалы XXII Международной научно-технической конференции, Вологда, 05 декабря 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2024. – С. 190-192.
7. Results of stand tests for wear resistance of Ploughshare after strengthening with electromechanical hardening / A. V. Morozov, S. N. Petryakov, A. L. Ignatov, I. D. Fedotov // Volga Region Farmland. – 2019. – No. 1(1). – P. 83-87.

References

1. Technology and organization of restoration of parts and assembly units during maintenance / V. V. Bykov, I. G. Golubev, V. V. Balikhin [et al.]. – Yoshkar-Ola: Mari State Technical University, 2008. – 335 p.

2. Optimization of the choice of technological processes for the restoration of parts / V. A. Markov, A. N. Markov, V. I. Kretinin [et al.] // *Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy*. – 2016. – № 217. – pp. 194-205.
3. Pastukhov, A. G. Examples of the application of installations for electromechanical processing when hardening parts machines / A. G. Pastukhov, O. A. Sharaya // *Chief mechanic*. – 2021. – No. 1. – pp. 38-45.
4. Physical and mechanical properties of the surface layer of parts after hardening by electromechanical processing / A. P. Yakovleva, V. N. Zaripov, T. R. Khusnetdinov, V. T. Ngo // *Chief Mechanic*. 2019. No. 2. pp. 26-31.
5. Shifrin, B. M. Optimization of the metal cutting process based on fuzzy logic / B. M. Shifrin // *Automated design in mechanical engineering*. - 2024. - No. 16. - P. 13-16.
6. Pogodina, E. E. The use of electromechanical processing for the restoration of machine parts / E. E. Pogodina, F. A. Zhuravsky, V. A. Markov // *Actual problems of the development of the forest complex : proceedings of the XXII International Scientific and Technical Conference, Vologda, December 05, 2024 of the year*. Vologda: Vologda State University, 2024, pp. 190-192
7. Results of stand tests for wear resistance of Ploughshare after strengthening with electromechanical hardening / A. V. Morozov, S. N. Petryakov, A. L. Ignatov, I. D. Fedotov // *Volga Region Farmland*. – 2019. – No. 1(1). – P. 83-87.