

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-49-55



УДК 621.9.047; 621.92

UDC 621.9.047; 621.92

2.5.6 – технология машиностроения

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОХИМИКОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПОЛИРОВАНИЯ**

**EXPERIMENTAL STUDIES ON
THE COMBINED PROCESS
OF ELECTROCHEMICAL MECHANICAL
POLISHING**

✉¹ **Перова Алла Владимировна,**
к.т.н, доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный тех-
нический университет, г. Воронеж,
e-mail: pva7@mail.ru

✉¹ **Perova Alla Vladimirovna,**
cand. of tech. sc., associate professor of mechanical
engineering technology chair of the Voronezh state
technical university, Voronezh,
e-mail: pva7@mail.ru

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н, профессор кафедры технологии
машиностроения, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Ivanovich,
dr. of tech. sc., professor of mechanical engineering
technology chair of the Voronezh state technical
university, Voronezh.

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н, доцент кафедры технологии
машиностроения, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Aleksandrovich,
cand. of tech. sc., associate professor of mechanical
engineering technology chair of the Voronezh state
technical university, Voronezh.

Григораш Владимир Васильевич,
к.т.н, доцент кафедры металлических и
деревянных конструкций,
Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Grigorash Vladimir Vasilyevich,
cand. of tech. sc., associate professor of chair of
metal and wooden structures of the Voronezh state
technical university, Voronezh.

Падурец Анна Александровна,
магистрант кафедры технологии
машиностроения, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Padurets Anna Alexandrovna,
master's student of the mechanical engineering
technology chair of the Voronezh state technical
university, Voronezh.

Аннотация. В статье представлены резуль-
таты экспериментальных исследований про-
цесса электрохимикомеханического полирова-
ния, сочетающего в себе анодное растворение,
обладающее высокими локализирующими свой-
ствами, с динамическими воздействиями абра-
зивных зерен. Описана сущность комбиниро-
ванного процесса, когда под воздействием

Annotation. This article presents the results of
experimental studies of the electrochemical me-
chanical polishing process, which combines an-
odic dissolution, possessing high localizing prop-
erties, with the dynamic effects of abrasive
grains. The essence of the combined process is
described, when, under the influence of operating
voltage, a continuous electrochemical dissolution

рабочего напряжения происходит непрерывное электрохимическое растворение обрабатываемой поверхности с образованием на ней окисных пленок с последующим их удалением вместе с обрабатываемым металлом посредством абразивных зерен, квазизакрепленных в полировальнике. Приведено описание и условия проведенных экспериментов. Показано влияние весового содержания абразива в составе электролитно-абразивной смеси на съем металла и шероховатость обрабатываемой поверхности. Отмечается влияние на ход комбинированного процесса частоты вращения полировальника и давления обрабатываемой детали на него. При оптимальных значениях исследуемых параметров электрохимикомеханическое полирование позволяет обеспечить высокое геометрическое качество обработанной поверхности и высокую производительность процесса.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОХИМИКОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА, ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ.

of the treated surface occurs with the formation of oxide films on it, followed by their removal together with the treated metal by means of abrasive grains quasi-fixed in the polishing pad. The description and conditions of the conducted experiments are given. The influence of the weight content of the abrasive in the composition of the electrolyte-abrasive mixture on the removal of metal and the roughness of the treated surface is shown. The impact on the course of the combined process of the frequency of rotation of the polishing pad and the pressure of the workpiece on it is noted. At optimal values of the studied parameters, electrochemical-mechanical polishing makes it possible to ensure high geometric quality of the treated surface and high process productivity.

Keywords: COMBINED PROCESSING, ELECTROCHEMICAL MECHANICAL POLISHING, PROCESS PRODUCTIVITY, SURFACE ROUGHNESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Технология производства деталей современных машин и приборов требует широкого применения методов, обеспечивающих высокое качество обработки. Повышению качества и точности обработки способствует применение ряда методов финишной обработки, например, доводки свободным абразивом [1-5].

Однако, несмотря на широкое распространение этот процесс обладает рядом существенных недостатков: процесс трудно поддается автоматизации, обладает сравнительно низкой производительностью, обслуживать оборудование должны операторы высокой квалификации. Такой процесс существенно зависит от обрабатываемого материала, материала инструмента, абразивного материала, состава жидкой фазы, формы и геометрии обрабатываемой поверхности, кинематики движения инструмента и детали, силового режима обработки и многих других факторов. По-видимому, это обстоятельство и является причиной того, что для объяснения физической сущности процесса до сегодняшнего дня высказывается ряд гипотез: механическая, пластического деформирования, химическая, оплавления [6, 7].

Известные недостатки доводочных методов заставляют искать пути и средства повышения эффективности финишных операций, а также новые методы обработки. К числу прогрессивных методов финишной обработки можно отнести электрохимикомеханическое полирование (ЭХМП) [8-10]. Однако его широкое промышленное использование сдерживается недостаточным исследованием механизма процесса, физико-технологическими особенностями, в том числе влиянием основных параметров процесса на технологические возможности и показатели.

2 Материалы и методы

Сочетание анодного растворения, обладающего высокими локализирующими свойствами, с динамическими воздействиями абразивных зерен позволяет обеспечить высокое геометрическое качество обработанной поверхности и высокую производительность процесса. Массоперенос при ЭХМП обусловлен процессами анодного растворения и абразивного резания обрабатываемой поверхности. Под воздействием технологического напряжения происходит непрерывное электрохимическое растворение обрабатываемой поверхности с образованием на ней окисных пленок. Абразивные зерна, квазизакрепленные в полировальнике, удаляют эти окисные пленки и часть основного металла. Работа, затрачиваемая абразивными зернами на удаление окисных пленок, значительно меньше работы по удалению основного металла, что можно объяснить, в частности, меньшей механической прочностью окисных пленок по сравнению с основным металлом [11-13]. Это способствует повышению производительности обработки.

Для более широкого изучения механизма процесса ЭХМП и для выявления оптимальных режимов обработки необходимы экспериментальные исследования по изучению влияния параметров процесса на его технологические показатели, в частности, на производительность и шероховатость обрабатываемой поверхности.

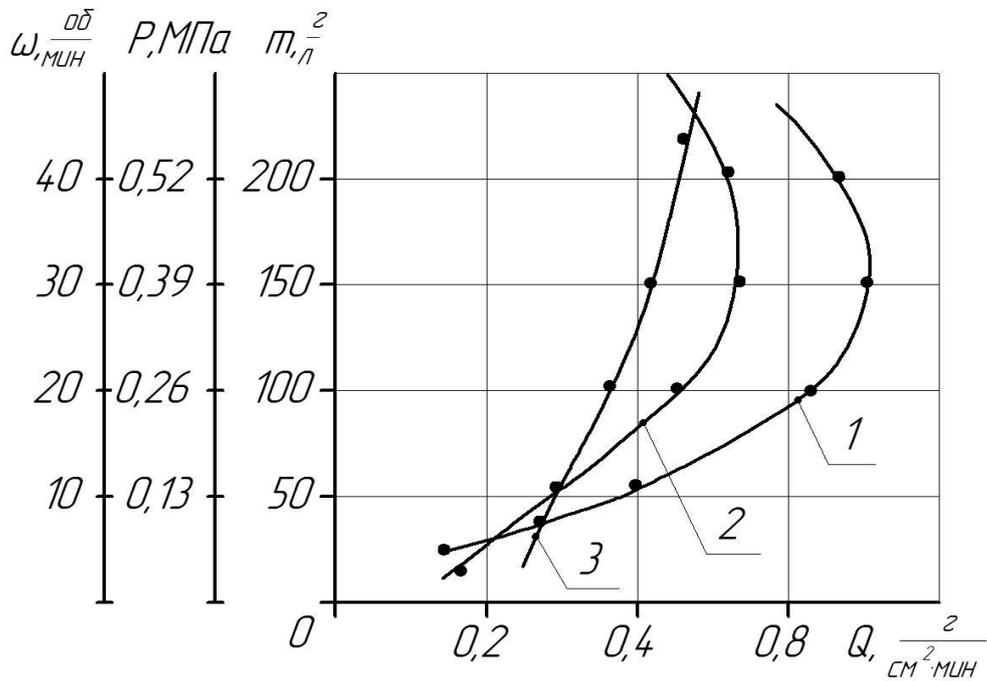
Исследования выполнялись в АО «Конструкторское бюро химавтоматики» (г. Воронеж) на экспериментальных установках, выполненных на базах универсального притирочного станка мод. И-400 и полировально-доводочного станка мод. ПД-500М. Были разработаны инструмент и необходимая технологическая оснастка для обработки как плоских, так и сферических поверхностей.

Обрабатывались медные образцы площадью 80 см², имевшие шероховатость поверхности Ra = 2,5 мкм. Шероховатость обрабатываемой поверхности при анодном растворении зависит от ряда факторов, одним из которых является структура обрабатываемого металла. Известно, что кислород мало растворим в меди в твердом состоянии. При затвердевании меди кислород выделяется в виде эвтектики медь-закись меди, располагающейся по границам кристаллитов. При анодном растворении электрохимическая гетерогенность границы и зерна обуславливает существенное различие в скоростях их растворения, что в конечном счете отрицательно скажется на шероховатости поверхности. Поэтому при обработке медных образцов методом ЭХМП применялась медь с пониженным содержанием кислорода М1Ф (ГОСТ 1173-2006). Электролит для обработки выбирался согласно рекомендациям, имеющимся в литературных источниках [14-16], а также на основе предварительных экспериментов. В качестве электролита в исследованиях использовался водный раствор NaNO₂ и CaCl₂. При обработке мягких материалов рекомендуется в качестве абразива использовать окислы мягких металлов [17, 18]. Поэтому для исследований была выбрана окись хрома, концентрация которого в растворе электролита составляла 50, 100, 200 г/л. В ходе экспериментов напряжение было постоянным. В качестве материала полировальника, поддерживающего гарантированный межэлектродный зазор между обрабатываемой деталью и катодом, использовались различные натуральные и искусственные ткани [19].

3 Результаты исследований

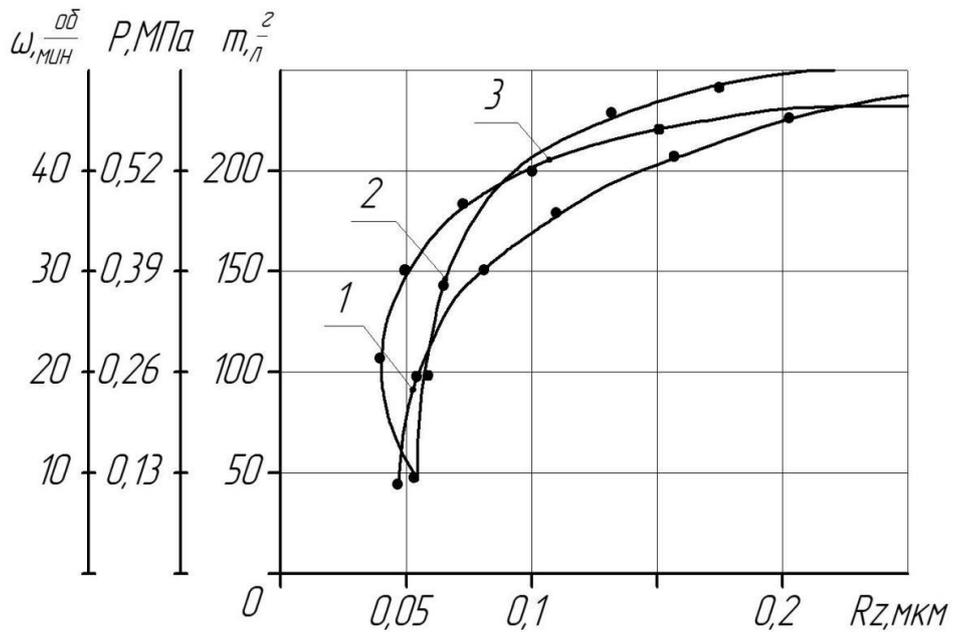
Проведенные исследования показали, что увеличение весового содержания абразива в составе электролитно-абразивной смеси приводит к некоторому повышению съема металла (рис. 1), но при достижении концентрации абразива 100-150 г/л происходит увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности (рис. 2). Это можно объяснить, в частности, тем, что электролитно-абразивная смесь при повышенной концентрации абразива более густая и при попадании на полировальник распределяется неравномерно по его рабочей поверхности. С

другой стороны, повышенное содержание абразива на рабочей поверхности полировальника уменьшает долю электрохимической составляющей.



1 – концентрации абразива; 2 – скорости абразива; 3 – давления абразива

Рисунок 1 – Зависимости скорости съема металла от технологических факторов



1 – концентрации абразива; 2 – скорости абразива; 3 – давления абразива

Рисунок 2 – Зависимости шероховатости от технологических факторов

Увеличение давления обрабатываемой детали на полировальник до 0,42 МПа приводит к увеличению производительности процесса (рис. 1). Дальнейшее увеличение давления несколько снижает съём материала, что объясняется выдавливанием электролита краем детали из материала полировальника, а также уменьшением влияния абразива на съём. Низкая шероховатость поверхности получена при давлениях 0,15-0,2 МПа. Отклонение давления от этого значения в ту или иную сторону приводит к некоторому увеличению шероховатости обработанной поверхности (рис. 2). Это, возможно, вызвано тем, что с увеличением давления на обрабатываемой поверхности появляются риски и царапины от материала полировальника.

Частота вращения полировальника незначительно влияет на производительность процесса ЭХМП. Увеличение скорости свыше 25 об/мин приводит к некоторому уменьшению съёма материала. Видимо, под действием центробежных сил с рабочей поверхности полировальника удаляется часть электролитно-абразивной смеси.

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты проведенных экспериментов показали, что при оптимальных значениях исследуемых параметров процесс ЭХМП достаточно производителен и можно получать значение шероховатости обработанной поверхности меди на уровне $Ra \approx 0,1$ мкм. Для получения поверхностей более низкой шероховатости необходимо исследовать влияние других технологических параметров и оптимизировать их.

Список литературы

- 1 Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. 624 с.
- 2 Барон, Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. Л.: Машиностроение, 1975. – 128 с.
- 3 Baron Yu.M., Sung-Lim Ko, Repnikova E.E. Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing (MAF) Method // 2th Asia Pasific Forum on Precision Surface and Deburring Technology. Seoul, 2002. P. 166-178.
- 4 Бурлаков, В. І. Аналіз методів обробки деталей вільним абразивом // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. 2017. – Вип. 35. – С. 132-137.
- 5 Kodacsy J. Apparatus for Cleaning Deburring and Polishing Parts in Magnetic Field // Proc. of 7 th International Conference of Deburring and Surface Finishing/ Berkeley, 2004/ P/ 375-378.
- 6 Павлюкова Н. Л., Полетаев В.А., Волкова Ю.М. Повышение эффективности отделочной обработки художественных изделий из медных сплавов свободными абразивами. Иваново: ИГЭУ, 2010. 100 с.
- 7 Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения. Ростов-на-Дону, 1995. 285 с.
- 8 Иванцова Г. М., Остапчук К.А., Овсянникова В.Е. К вопросу применения электрохимического полирования для чистовой обработки деталей // Вестник Курганского государственного университета. 2008. – № 3. – С. 94-96.
- 9 Zamota T. Electrochemical Bases of Macrorunning in of Flat Friction Process at ECMP(G) // Problems of Technology. 2011. – № 4. –P. 56-61
- 10 Шибаев Б.А., Балмасов А.В. Электрохимическое полирование конструкционных легированных сталей // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. –№ 2. – С.23-30.
- 11 Холевин, В. В. Исследование процесса химико-механического полирования деталей и узлов микросистемной техники // Наука и образование. 2011. – № .10. – С. 24-31.

- 12 Jeffrey J. Sniegowski. Chemical-mechanical polishing: enhancing the manufacturability of MEMS. Intelligent Micromachines Department. Sandia National Laboratories. Albuquerque. NM 87185.
- 13 Lebrecht von Trotha et al. Advanced MEMS fabrication using CMP. Semiconductor International. 8/1/2004.
- 14 Грилихес, С. Я. Электрохимическое полирование, Л.: Машиностроение, 1976. 208 с.
- 15 Болдырев, А. И. Электрохимикомеханическая обработка. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2012. – 243 с.
- 16 Aliakseyeu Yu.G., Korolyov A. Yu., Niss V.S., Parshuto A.E., Budnitskiy A.S. The Use of Pulsed Modes in the Electrochemical Polishing of Corrosion-Resistant Steels // Science & Technique. 2019. № 18(3). P. 200-208.
- 17 Королева, Л. Ф. Трибохимическая активность абразивных материалов на основе смешанных оксидов в процессе полирования металлов // Физика и химия обработки материалов. 2006. – № 4. – С. 84-92.
- 18 Королева, Л. Ф. Модифицированные нанодисперсные оксиды для финишного полирования металлов // Diagnostic, Resource and Mechanical of Materials and Structures. 2016. № 2. С. 48-73.
- 19 Технология электрических методов обработки / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев и др. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т. 2002. – 310 с.

References

- 1 Babichev A.P. Osnovy` vibracionnoj texnologii. Rostov-na-Donu: Izdatel`skij centr DGTU, 2008. 624 s.
- 2 Baron Yu.M. Texnologiya abrazivnoj obrabotki v magnitnom pole. L.: Mashinostroenie, 1975. 128 s.
- 3 Baron Yu.M., Sung-Lim Ko, Repnikova E.E. Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing (MAF) Method // 2th Asia Pasific Forum on Precision Surface and Deburring Technology. Seoul, 2002. P. 166-178.
- 4 Burlakov V.I. Analiz metodiv obrobki detalej vil`nim abrazivom // Visnik Priazovs`kogo derzhavnogo texnichnogo universitetu. Texnichni nauki. 2017. Vip. 35. S. 132-137.
- 5 Kodacsy J. Apparatus for Cleaning Deburring and Polishing Parts in Magnetic Field // Prac. of 7 th International Conference of Deburring and Surface Finishing/ Berkeley, 2004/ P/ 375-378.
- 6 Pavlyukova N.L., Poletaev V.A., Volkova Yu.M. Povy`shenie e`ffektivnosti otdelochnoj obrabotki xudozhestvenny`x izdelij iz medny`x splavov svobodny`mi abrazivami. Ivanovo: IGE`U, 2010. 100 s.
- 7 Tamarkin M.A. Texnologicheskie osnovy` optimizacii processov obrabotki detalej svobodny`mi abrazivami: dis. na soisk. uchenoj step. dokt. texn. nauk: 05.02.08 – texnologiya mashinostroeniya. Rostov-na-Donu, 1995. 285 s.
- 8 Ivanczova G.M., Ostapchuk K.A., Ovsyannikova V.E. K voprosu primeneniya e`lektroximicheskogo polirovaniya dlya chistovoj obrabotki detalej // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. 2008. № 3. S. 94-96.
- 9 Zamota T. Electrochemical Bases of Macrorunning in of Flat Friction Process at ECMP(G) // Problems of Technology. 2011. № 4. P. 56-61
- 10 Shibaev B.A., Balmasov A.V. E`lektroximicheskoe polirovanie konstrukcionny`x legirovanny`x stalej // Gal`vanotexnika i obrabotka poverxnosti. 2019. № 2. S.23-30.
- 11 Xolevin V. V. Issledovanie processa ximiko-mexanicheskogo polirovaniya detalej i uzlov mikrosistemnoj texniki // Nauka i obrazovanie. 2011. № .10. S. 24-31.
- 12 Jeffrey J. Sniegowski. Chemical-mechanical polishing: enhancing the manufacturability of MEMS. Intelligent Micromachines Department. Sandia National Laboratories. Albuquerque. NM 87185.
- 13 Lebrecht von Trotha et al. Advanced MEMS fabrication using CMP. Semiconductor International. 8/1/2004.
- 14 Grilixes S.Ya. E`lektroximicheskoe polirovanie, L.: Mashinostroenie, 1976. 208 s.
- 15 Boldy`rev A.I. E`lektroximikomexanicheskaya obrabotka. Voronezh: IPCz VGU, 2012. 243 s.

16 Aliakseyeu Yu.G., Korolyov A.Yu., Niss V.S., Parshuto A.E., Budnitskiy A.S. The Use of Pulsed Modes in the Electrochemical Polishing of Corrosion-Resistant Steels // Science & Technique. 2019. № 18(3). R. 200-208.

17 Koroleva L.F. Triboximicheskaya aktivnost` abrazivny`x materialov na osnove smeshanny`x oksidov v processe polirovaniya metallov // Fizika i ximiya obrabotki materialov. 2006. № 4. S. 84-92.

18 Koroleva L.F. Modificirovanny`e nanodispersny`e oksidy` dlya finishnogo polirovaniya metallov // Diagnostic, Resource and Mechanical of Materials and Structures. 2016. № 2. S. 48-73.

19 Texnologiya e`lektricheskix metodov obrabotki / V.P. Smolencev, A.V. Kuzovkin, A.I. Boldy`rev i dr. Voronezh: Voronezh. gos. texn. un-t. 2002. 310 s.

© Перова А.В., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Григораш В.В., Падурец А.А., 2023