

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ НА УВЕЛИЧЕНИЕ НАРУЖНОГО ДИАМЕТРА ПОСАДОЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Морозов Александр Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология производства и ремонт машин»

Кнуров Алексей Андреевич, аспирант кафедры «Технология производства и ремонт машин»

Хабиева Лилия Линаровна, соискатель кафедры «Технология производства и ремонт машин»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: 8 (8422) 55-95-97

E-mail: alvi.mor@mail.ru

Ключевые слова: посадочная поверхность, износ, восстановление, объемное электромеханическое дорнование, метод конечных элементов, экспериментальные исследования.

Широкое распространение в технике нашли подшипниковые узлы. Из существующих вариантов установки подшипников качения наиболее часто встречается установка подшипника на вал с гарантированным натягом. В данных случаях износы посадочных поверхностей деталей в 85 % случаев составляют 0,02...0,4 мм. Существующие способы восстановления имеют различные недостатки, ограничивающие их использование, в связи с чем нами был разработан и запатентован новый способ, основанный на перемещении металла из нерабочих зон посредством объемного электромеханического дорнования (ОЭМД). Влияние режимов ОЭМД на увеличение наружного диаметра посадочной поверхности исследовали расчетным (моделированием) и экспериментальными методами. На начальном этапе в стационарном режиме исследовали влияние силы тока I и относительной толщины стенки S экспериментального образца на время теплонасыщения деформируемого объема. Полученные экспериментальные результаты сравнивали с результатами моделирования. Установлено, что изменение силы тока I и относительной толщины стенки S в исследуемом диапазоне не оказывают существенного влияния на время теплонасыщения деформируемого объема. Усредненное расчетное время теплонасыщения составило $t = 2,6$ с, экспериментальное $t = 2,9$ с, при этом максимальное экспериментальное значение температуры деформируемого объема $T = 1178$ °С, при $I = 5400$ А и $S = 1,4$. Полученные результаты позволили определить оптимальную скорость ОЭМД, которая составила $v = 33$ мм/мин, с учетом существующих рабочих скоростей вертикального перемещения стола вертикально-фрезерного станка 6В11. Максимальное увеличение наружного диаметра при экспериментальном исследовании ОЭМД составило 0,71 мм, при $S = 1,4$ и с натяге $i = 1,2$ мм, максимальное расчетное увеличение наружного диаметра составило 0,75 мм, при $S = 1,4$ и $i = 1,2$ мм. Проведенные исследования позволили оценить эффективность разработанного способа, выявить рациональные режимы ОЭМД с учетом геометрических параметров восстанавливаемых деталей.

Введение

В настоящее время отечественные сельскохозяйственные предприятия широко применяют современную высокоэффективную дорогостоящую отечественную и зарубежную технику, кроме того, отечественная техника все чаще оснащается узлами и агрегатами зарубежного производства. В связи с этим появляются сложности в производстве ремонта техники, в частности, в приобретении запасных частей, что влечет за собой ее простой и, как следствие, экономические потери предприятий. Соответственно актуализируется проблема восстановления деталей в условиях предприятий агропромышленного комплекса (АПК).

Подшипниковые узлы получили широкое распространение в сельскохозяйственной технике и оборудовании. Одним из наиболее часто встречающихся вариантов установки подшипника каче-

ния в узлах является его посадка на вал с гарантированным натягом. При этом даже сравнительно малые износы (0,02...0,4 мм в диаметральном выражении) посадочных поверхностей валов приводят к потере служебного назначения узла [1].

Существующие способы восстановления посадочных поверхностей под подшипник качения имеют недостатки, ограничивающие их использование в условиях российских предприятий АПК [2]. В связи с этим, на кафедре «Технология производства и ремонт машин» инженерного факультета Ульяновского ГАУ был разработан способ восстановления данных поверхностей, основанный на перемещении металла из нерабочих зон [3]. Данный способ предполагает возможность многократного восстановления одной и той же посадочной поверхности, а также не требует применения расходных материалов. Для реализации способа могут применяться

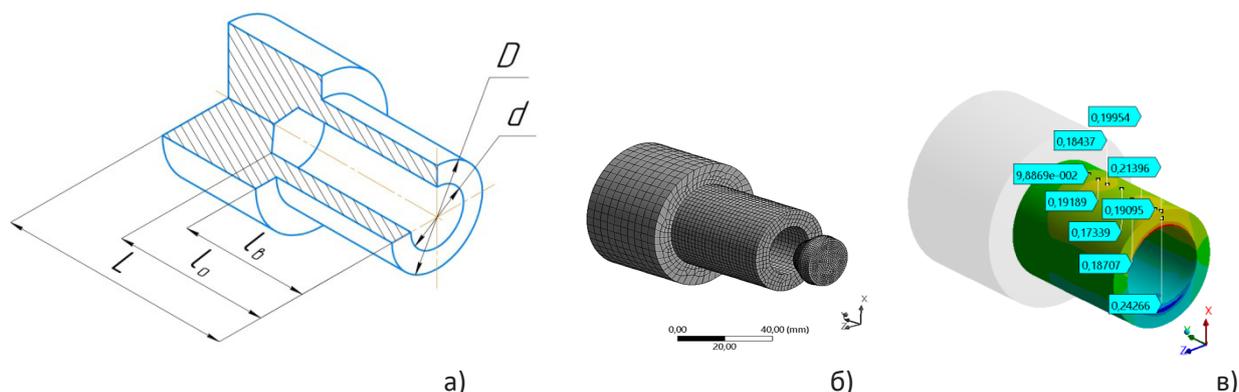


Рис. 1 – Объект исследований: а) эскиз; б) 3D конечно-элементная модель; в) модель деформированного состояния по оси X

распространенные в ремонтных мастерских токарно-винторезные и вертикально-фрезерные станки.

Перемещение металла осуществляется посредством объёмного электромеханического дорнования (ОЭМД) с электроконтактным нагревом восстанавливаемого участка до кованных температур.

Материалы и методы исследований

Для выявления эффективности предлагаемого способа восстановления нами проведены экспериментальные исследования: теплонасыщение деформируемого объема восстанавливаемого участка и влияние режимов ОЭМД на увеличение наружного диаметра восстанавливаемого участка. Экспериментальные исследования проводили на вертикально-фрезерном станке 6В11.

Как известно [4] с повышением температуры нагрева резко изменяются физико-механические характеристики металла и, в первую очередь, его предел прочности и твердость. При температуре нагрева свыше 600 °С происходит резкое понижение предела кратковременной прочности – σ_{σ} и условного предела текучести – $\sigma_{0,2}$, что существенным образом сказывается и на облегчении перемещения металла из нерабочих зон.

При таких высоких температурах нагрева значения предела прочности сталей различной твердости приближаются друг к другу [5], а, следовательно, в зоне этих температур может быть достигнута примерно одинаковая их обрабатываемость. По данным В.Д. Кузнецова [6], не только стали, но и различные металлы, будучи приведенные к определенным тепловым состояниям, могут иметь одинаковые значения временного сопротивления.

При проведении исследования применяли электроконтактный нагрев путем пропуска

электрического тока через деталь и инструмент. На температуру нагрева в данном случае оказывают влияние два параметра: сила электрического тока и время его воздействия.

Предварительно проводили моделирование процессов, используя метод конечных элементов (МКЭ) в среде Workbench программы ANSYS 2020 R1 в трехмерном виде (рис. 1). В процессе моделирования учитывали изменения модуля Юнга и тепловых констант при повышении температуры. Для описания механических деформаций и тепловых нагрузок применен элемент SOLID185 (3-D 8-узловой объемный элемент) [7, 8]. Верификацию полученных моделей выполняли сопоставлением с результатами эксперимента. Граничные и начальные условия задавали, основываясь на ранее проведенных экспериментальных исследованиях [9].

В качестве экспериментальных образцов применяли цилиндрические ступенчатые заготовки из стали 40Х с осевым отверстием в восстанавливаемом участке. Общая длина образца L составляла 100 мм, длина восстанавливаемого участка l_{σ} = 50 мм, длина осевого отверстия l_{σ} = 70 мм. Диаметр восстанавливаемого участка D = 39,5 мм (рис. 1). Размеры выбраны с учетом установки на восстановленный участок одного из наиболее распространенного в технике подшипника 66408 по ГОСТу 3189-75 [10].

Одним из основных параметров, влияющих на увеличение наружного диаметра, является универсальный параметр – относительная толщина стенки – C , которую определяют как отношение диаметра восстанавливаемого участка D к диаметру осевого отверстия d . Было изготовлено три группы образцов с различным параметром C : 2; 1,7 и 1,4. В каждой группе ОЭМД выполняли с натягами $i = 0,4$ мм; $i = 0,6$ мм; $i = 1,2$ мм.

Температуру внутри образцов в ходе экс-

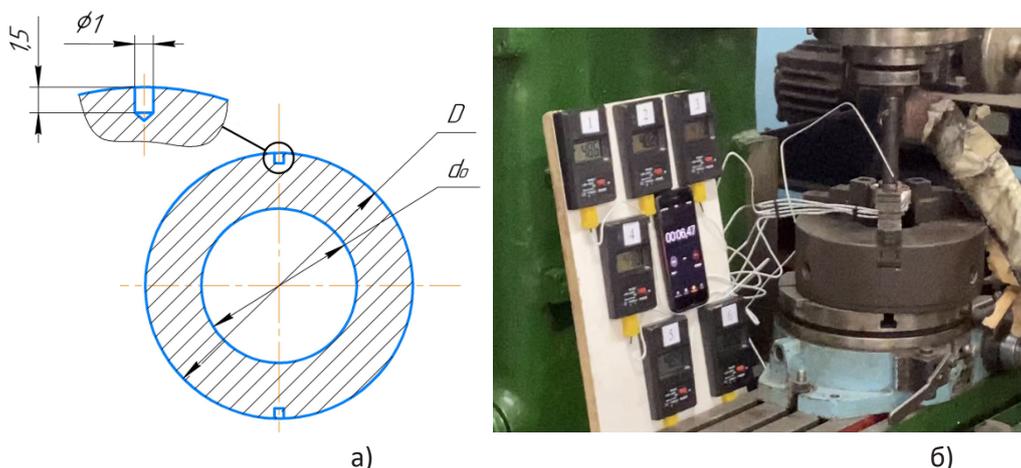


Рис. 2 – Измерение теплонасыщения деформируемого объема: а) схема установки термопар на образце; б) компоновка экспериментальной установки

периментальных исследований измеряли с помощью хромель – алюмелевой термопары (ТХА) с диаметром проволочек 0,2 мм. Данный вид термопар позволяет измерять температуры в диапазоне 200...1350 °С.

С внешней стороны образцов просверливали три отверстия диаметром 1 мм на глубину 1,5 мм от поверхности. Диаметр отверстия выбран с учетом размера спая хромель – алюмелевой термопары. Термопары устанавливали в трех плоскостях, перпендикулярных оси экспериментального образца. В каждой плоскости две термопары устанавливали на одной оси друг напротив друга. Места установки термопар зачеканивали. Схема установки термопар на образце и компоновка экспериментальной установки для измерения теплонасыщения деформируемого объема представлены на рис. 2.

Диаметр осевого отверстия измеряли индикаторным нутромером повышенной точности с ценной деления 0,01 мм, настройка которого осуществлялась по плоскопараллельным концевым мерам длины второго класса. Наружный диаметр экспериментального образца до и после ОЭМД измеряли механическим микрометром с диапазоном измерения 25...50 мм и ценной деления 0,01 мм. ОЭМД выполняли специально изготовленным инструментом с твердосплавным дорном из Т15К6 [11]. С целью повышения электропроводности и снижения потерь электрического тока оправку инструмента для ОЭМД изготавливали из бронзового сплава Бр ОЦС 4-4-2,5.

Результаты исследований

Результаты моделирования теплонасыщения деформируемого объема образца показали, что с увеличением силы подаваемого тока про-

исходит увеличение температуры его наружной поверхности, а также то, что увеличение осевого отверстия, и как следствие уменьшение деформируемого объема, положительно сказывается на прогреве перемещаемого материала.

В результате моделирования было установлено, что прогрев деформируемого объема исследуемого объекта при подаче электрического тока до стабилизации температур происходит за 2,6 с. Наименьшая температура нагрева наружной поверхности в результате исследования составила 895 °С (при: $C = 2$ и $I = 4800$ А), наибольшая температура составила 1203 °С (при: $C = 1,4$ и $I = 5400$ А).

Экспериментальное исследование теплонасыщения деформируемого объема восстанавливаемого участка экспериментального образца проводили в стационарном режиме (без осевого перемещения инструмента). Предварительно инструмент плотно прижимали к отверстию восстанавливаемого участка образца с усилием 30...50 Н, для обеспечения надежного контакта, после чего включали подачу электрического тока на инструмент и экспериментальный образец, вследствие чего происходил нагрев деформируемого объема детали (рис. 3).

Процесс фиксировали на цифровую высокоскоростную камеру для сопоставления показаний приборов измерения температуры и времени. На основании полученных результатов были построены графики, представленные на рис. 4.

Основываясь на данных, полученных при проведении экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что при увеличении силы подаваемого тока и уменьшении отношения C температура деформируемого объема детали



Рис. 3 – Процесс теплонасыщения деформируемого объема образца

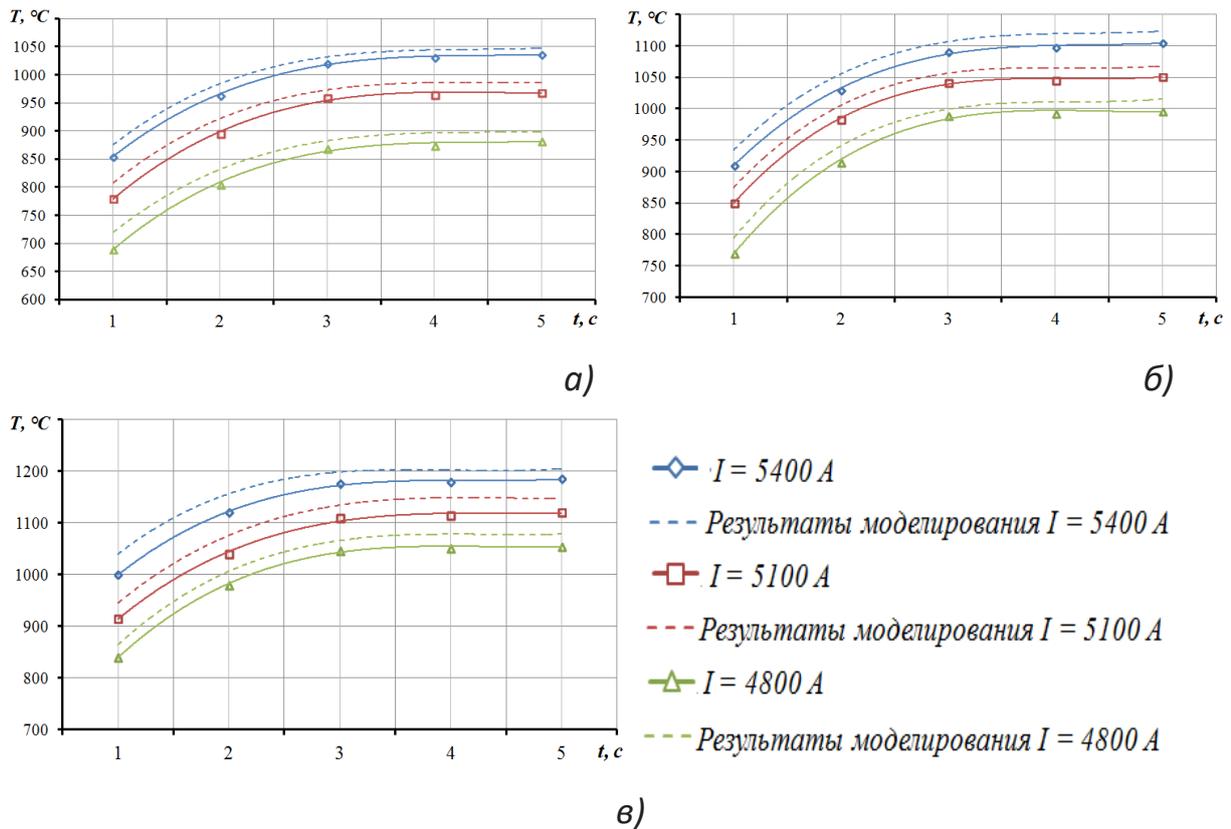


Рис. 4 – Зависимость температуры восстанавливаемой поверхности от силы тока и времени подачи электрического тока: а) $C = 2$; б) $C = 1,7$; в) $C = 1,4$

растет. Уменьшение отношения C происходит за счет увеличения диаметра осевого отверстия, соответственно, уменьшается деформируемый объем детали и время теплонасыщения. Из графиков (рис. 4) следует, что наиболее интенсивный разогрев восстанавливаемой поверхности происходит за первые 2,9 с с момента подачи электрического тока, после чего температура практически не увеличивается. Минимальная температура нагрева наружной поверхности в результате исследования составила 882 °С при $C = 2$ и $I = 4800$ А, а максимальная 1178 °С при $C = 1,4$ и $I = 5400$ А.

Расхождение с расчётными данными в среднем составило 8 %, что объясняется потерями тока в цепи в реальных условиях.

Основываясь на расчетных и экспериментальных результатах теплонасыщения, было установлено, что наиболее рациональная скорость движения инструмента относительно отверстия детали $v = 31$ мм/мин. При данной скорости происходит прогрев деформируемого объема детали, необходимый для уменьшения осевого усилия перемещения инструмента в процессе ОЭМД. Исходя из вышесказанного и существую-

щих рабочих скоростей перемещения вертикального стола, применяемого в исследованиях станка, была выбрана скорость $u = 33$ мм/мин.

Результаты исследований влияния натяга i ОЭМД и относительной толщины стенки C восстанавливаемого участка на увеличение наружного диаметра представлены в виде графика (рис. 5) в сравнении с результатами моделирования.

Расчеты и результаты экспериментальных исследований показали, что при увеличении натяга i и уменьшении относительной толщине стенки C восстанавливаемой посадочной поверхности происходит наибольшее увеличение наружного диаметра при ОЭМД. Максимальное расчетное увеличение наружного диаметра восстанавливаемой поверхности составило 0,75 мм при относительной толщине стенки $C = 1,4$ и натяге $i = 1,2$ мм. При экспериментальном исследовании максимальное увеличение наружного диаметра восстанавливаемого участка составило 0,71 мм, при аналогичных значениях - C и i . Расхождение с расчётными данными в среднем составило 11 %, что объясняется суммарными погрешностями изготовления инструмента и экспериментальных образцов.

Обсуждение

Результаты исследований показывают, что подача электрического тока силой $I = 5100$ А в течение 2,9 с позволяет нагреть деформируемый объём экспериментального образца до температур, при которых резко изменяются предел прочности и твердость металла, что позволяет существенно снизить осевое усилие перемещения дорна при ОЭМД. Установлено, что наиболее эффективная скорость u перемещения дорна вдоль детали при ОЭМД на станке 6В11 составляет 33 мм/мин. Установлено влияние относительной толщины стенки C и натяга i на увеличение диаметра восстанавливаемой ОЭМД поверхности. Максимальное увеличение наружного диаметра составило 0,71 мм, это позволяет сделать вывод об эффективности разработанного способа восстановления.

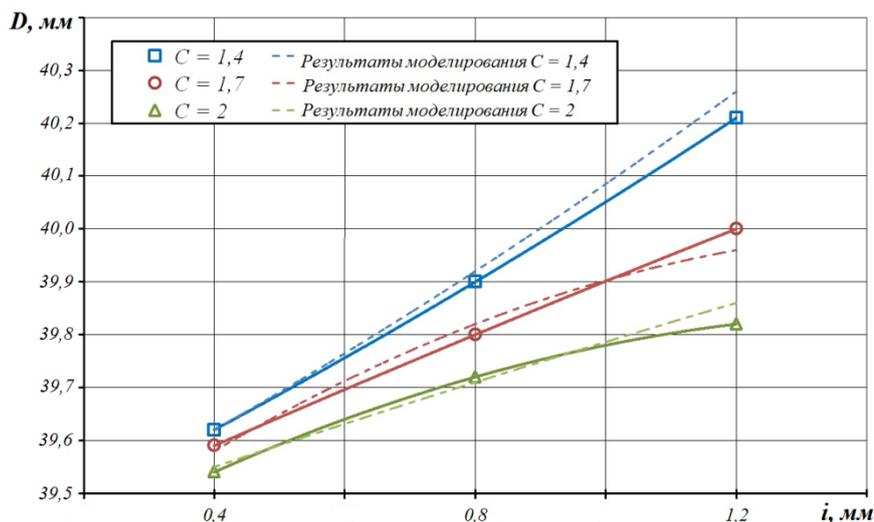


Рис. 5 – График изменения наружного диаметра после ОЭМД в зависимости от толщины стенки C и натяга i при: $I = 5100$ А; $u = 33$ мм/мин

Заключение

Полученные результаты исследований позволили оценить эффективность разработанного способа восстановления посадочных поверхностей валов и осей под подшипник качения и определить рациональные режимы ОЭМД в зависимости от величины износа. Сравнение экспериментальных и расчетных данных указывает на адекватность полученных результатов моделирования.

Библиографический список

1. Крагельский, И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 420 с.
2. Морозов, А.В. Анализ способов восстановления посадочных шеек валов и осей под подшипники качения / А.В. Морозов, А.А. Кнуров, Л.Л. Хабиева, Н.И. Шамуков // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы XI Международной научно-практической конференции. Том 2021-3. Ульяновск, 2021. С. 65-74.
3. Пат. 2744076. Российская федерация, МПК В 23 Р 6/00 (2006.01), В 24 В 39/02 (2006.01), СПК В 23 Р 6/00 (2020.08), В 24 В 39/02 (2020.08). Способ восстановления посадочной поверхности под подшипник качения / А.В. Морозов, Л.Л. Хабиева, А.А. Кнуров, Д.Ф. Ляпин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ. – № 2020126624; заявл. 07.08.2020; опубл. 02.03.2021. – Бюл. № 7. – 7 с.
4. Безручко, И.И. Обработка металлов давлением / И.И. Безручко, М.Е. Зубцов, Л.Н. Балакина - М. - Л.: Машиностроение, 1967. - 312 с.

5. Безухов, Н.И. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур. / Н.И. Безухов, В.Л. Бажанов, И.И. Гольденблат и др. – М.: Машиностроение, 1965. – 568 с.

6. Кузнецов, В.Д. Физика твердого тела. Т. 3. - Томск, 1944. - 256 с.

7. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: Справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М: Машиностроение, 2004. – 512 с.

8. Багмутов, В.П. Моделирование структурных превращений при электромеханической обработке стали [Текст] / В.П. Багмутов, И.Н. Захаров // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 4. – С. 29-32.

9. Морозов, А.В. Объемное электромеханическое дорнование тонкостенных стальных втулок / А.В. Морозов. - Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 193 с.

10. Батищев, А.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники. / А.Н. Батищев, И.Г. Голубев, В.П. Лялякин // – М: Информагротех, 1995. – 294 с.

11. Морозов, А.В. Особенности выбора инструмента для электромеханической обработки отверстий деталей машин полосовым высокотемпературным источником / А.В. Морозов, Г.Д. Федотов, С.Н. Петряков, А.Ю. Горшков, Д.Р. Мухарапов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2016. - № 7(2). – С. 258-268.

INFLUENCE OF THE MODES OF VOLUME ELECTRO-MECHANICAL BURNISHING ON INCREASE OF THE OUTER DIAMETER OF THE MOUNTING SURFACE

Morozov A. V., Knyurov A. A., Khabieva L. L.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Agrarian University
432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1; tel.: 8 (8422) 55-95-97
E-mail: alvi.mor@mail.ru

Keywords: mounting surface, wear, restoration, volume electromechanical burnishing, finite element method, experimental studies.

Bearing assemblies are widely used in machinery. Among the existing options for installing rolling bearings, the most common is installation of a bearing on a shaft with a guaranteed tightness. In this case, the wear of the mounting surfaces of the parts is 0.02 ... 0.4 mm in 85% of cases. The existing recovery methods have various disadvantages that limit their usage, in this regard, we have developed and patented a new method based on the movement of the metal from non-working areas by means of volume electromechanical burnishing (VEMB). The influence of the VEMB modes on the increase of the outer diameter of the mounting surface was studied by calculation (simulation) and experimental methods. The influence of the current strength I and the relative wall thickness C of the experimental sample on the time of heat saturation of the deformable volume was studied at the initial stage in the stationary mode. The obtained experimental results were compared with the simulation results. It was found that changes in the current strength I and the relative wall thickness C in the studied range do not significantly affect the time of heat saturation of the deformable volume. The average calculated heat saturation time was $t = 2.6$ s, experimental $t = 2.9$ s, the maximum experimental value of the temperature of the deformable volume is $T = 1178$ °C at $I = 5400$ A and $C = 1.4$. The obtained results enabled to determine the appropriate speed of the VEMB, which was $v = 33$ mm/min, taking into account the existing operating speeds of the vertical movement of the table of the 6V11 vertical milling machine. The maximum increase of the outer diameter in the experimental study of VEMB was 0.71 mm, at $C = 1.4$ and with interference fit $i = 1.2$ mm, the maximum calculated increase of the outer diameter was 0.75 mm, at $C = 1.4$ and $i = 1.2$ mm. The conducted studies allowed to evaluate the effectiveness of the developed method, to identify rational modes of VEMB, taking into account the geometric parameters of the parts to be restored.

Bibliography:

1. Kragelskiy, I.V. Friction and wear / I.V. Kragelskiy. - Moscow: Mashinostroenie, 1968. - 420 p.
2. Analysis of methods for restoring of centering plugs of shafts and axles for rolling bearings / A. V. Morozov, A. A. Knyurov, L. L. Khabieva, N. I. Shamukov // Agrarian science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions: materials of the XI International Scientific and Practical Conference. - Ulyanovsk, 2021. - V. 3. - P. 65-74.
3. Patent 2744076. Russian Federation, IPC B 23 P 6/00 (2006.01), B 24 B 39/02 (2006.01), SPK B 23 P 6/00 (2020.08), B 24 B 39/02 (2020.08). Method for restoring the mounting surface for a rolling bearing : № 2020126624 : Appl. 07.08.2020: publ. 02.03.2020 / Morozov A. V., Khabieva L. L., Knyurov A. A., Lyapin D. F.; applicant and patent holder FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University. – 7 p.
4. Bezruchko, I. I. Pressure metal treatment / I. I. Bezruchko, M. E. Zubtsov, L. N. Balakina. - Moscow - Leningrad: Mashinostroenie, 1967. - 312 p.
5. Calculations for strength, stability and fluctuations under conditions of high temperatures / N. I. Bezukhov, V. L. Bazhanov, I. I. Goldenblat [and others]. - Moscow: Mashinostroenie, 1965. - 568 p.
6. Kuznetsov V. D., Solid State Physics. Volume 3 / V. D. Kuznetsov. - Tomsk, 1944. - 256 p.
7. Chigarev, A. V. ANSYS for engineers: a reference book / A. V. Chigarev, A. S. Kravchuk, A. F. Smalyuk. - Moscow: Mashinostroenie, 2004. - 512 p. – ISBN 5-94275-048-3.
8. Bagmutov, V. P. Modeling of structural transformations during electromechanical processing of steel / V. P. Bagmutov, I. N. Zakharov // Physics and chemistry of material processing. - 2002. - № 4. - P. 29-32.
9. Morozov, A. V. Volumetric electromechanical burnishing of thin-walled steel bushings: monograph / A. V. Morozov. - Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin, 2013. - 193 p. – ISBN 978-5-905970-23-8.
10. Batishchev, A.N. Restoration of parts for agricultural machinery / A. N. Batishchev, I. G. Golubev, V. P. Lyalyakin. - Moscow: Informagrotekh, 1995. - 294 p.
11. Features of tool selection for electromechanical processing of holes in machine parts with a strip high-temperature source / A. V. Morozov, G. D. Fedotov, S. N. Petryakov, A. Yu. Gorshkov, D. R. Muxarapov // Izvestiya of Tula State University. Technical sciences. - 2016. - № 7(2). – P. 258-268.