

УДК 621.77.014

DOI 10.18286/1816-4501-2023-2-208-214

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОГО УСИЛИЯ ПРИ ОБЪЕМНОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ДОРНОВАНИИ

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

**Кнюрлов 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: alexeikn@mail.ru

**Ключевые слова:** наружная цилиндрическая поверхность, износ, восстановление, объёмное электромеханическое дорнование, метод конечных элементов, экспериментальное исследование.

Восстановление гладких наружных цилиндрических поверхностей, является одной из наиболее распространенных задач при ремонте сельскохозяйственной техники. Износы данных поверхностей в 85% составляют 0,02...0,4 мм. Существующие способы восстановления имеют некоторые недостатки, ограничивающие их использование, в связи с чем нами был разработан и запатентован новый способ, основанный на перемещении металла из нерабочих зон, посредством объёмного электромеханического дорнования (ОЭМД). Для определения необходимых параметров оборудования и оснастки для осуществления ОЭМД проводили исследования осевого усилия при ОЭМД. Исследования проводили расчётными (моделированием) и экспериментальными методами. Начальные и граничные условия при моделировании задавали подобными лабораторным экспериментальным исследованиям. При экспериментальном исследовании образец фиксировали в трехкулачковом самоцентрирующем патроне, который в свою очередь был закреплён на станке. Державка устанавливалась в шпиндель станка. Предварительно инструмент плотно прижимали к отверстию восстанавливаемого участка детали с усилием 50 Н для обеспечения надежного контакта, после чего включали подачу электрического тока на инструмент и деталь, вследствие чего происходил нагрев деформируемого объема детали. Затем обеспечивали движение инструмента в осевом направлении со скоростью 33 мм/мин. Скорость движения выбрана на основании ранее проведенных исследований процесса ОЭМД. Исследования показали, что с увеличением натяга  $i$  и относительной толщины стенки –  $C$  также увеличивается осевое усилие перемещения инструмента. Максимальное осевое усилие в процессе ОЭМД при экспериментальном лабораторном исследовании составило 4,92 кН (при:  $C = 2$  и  $i = 1,2$  мм), минимальное – 0,37 кН (при:  $C = 1,4$  и  $i = 0,4$  мм), при моделировании 4,87 кН и 0,36 кН соответственно. Сравнение экспериментальных и расчетных данных указывает на адекватность полученных результатов моделирования. Результаты исследования позволяют определить необходимые параметры оборудования и оснастки для осуществления ОЭМД.

#### Введение

В современном мире сельское хозяйство остается одной из важнейших отраслей экономики, поскольку оно обеспечивает продовольственную безопасность страны. За счет постоянного развития сельскохозяйственной техники и оборудования повышается производительность

труда и эффективность сельскохозяйственного производства. Соответственно при этом повышаются нагрузки и требования к деталям машин, применяемых в сельскохозяйственной технике. За этим так же следуют повышения требований к восстановленным деталям [1, 2].

Для обеспечения эффективной работы

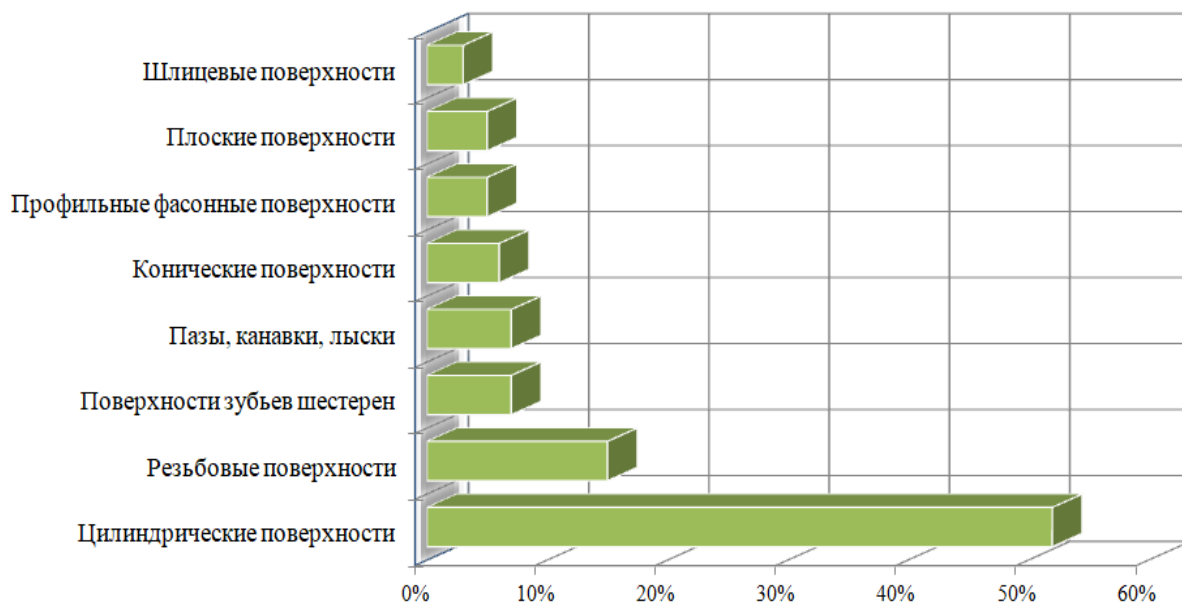


Рис. 1 – Диаграмма распределения износов деталей машин

сельскохозяйственной техники необходимо регулярно производить её техническое обслуживание и ремонт. При этом восстановление гладких наружных цилиндрических поверхностей, широко распространенных в деталях машин, таких как вал, ось и т.д., является одной из наиболее распространенных задач (рис. 1) [3, 4, 5].

Существующие методы восстановления данных поверхностей, применяемые на предприятиях агропромышленного комплекса России, имеют некоторые недостатки, в связи с чем их применение на данный момент ограничено [6, 7, 8]. В связи с этим нами был разработан и защищен патентами способ восстановления наружных гладких цилиндрических поверхностей деталей [9]. Основными преимуществами разработанного способа являются экономичность, возможность неоднократного восстановления одной и той же поверхности, прогнозирование увеличения диаметра восстанавливаемой поверхности, сравнительно малое время, затрачиваемое на восстановление и отсутствие расходных материалов при восстановлении. Перечисленные выше преимущества разработанного способа позволят сократить материальные затраты предприятия и время простоя техники при проведении ремонтных мероприятий.

Разработанный способ предполагает увеличение диа-

метра изношенной поверхности за счет перемещения металла из нерабочих зон восстанавливаемой детали посредством объёмного электромеханического дорнования (ОЭМД) с электроконтактным нагревом. Для реализации разработанного способа необходимо выполнить осевое отверстие длиной, не превышающей восстанавливаемый участок. С целью уменьшения осевых усилий при дорновании предусмотрен электроконтактный нагрев деформируемого металла до температур, при которых заметно снижаются пределы текучести и прочности материала [10, 11].

Реализовывать данный способ позволяют токарно-винторезные и вертикально-фрезерные станки, которые широко распространены в мастерских отечественных предприятий АПК. При отсутствии на предприятии оборудования для электроконтактного нагрева допускается

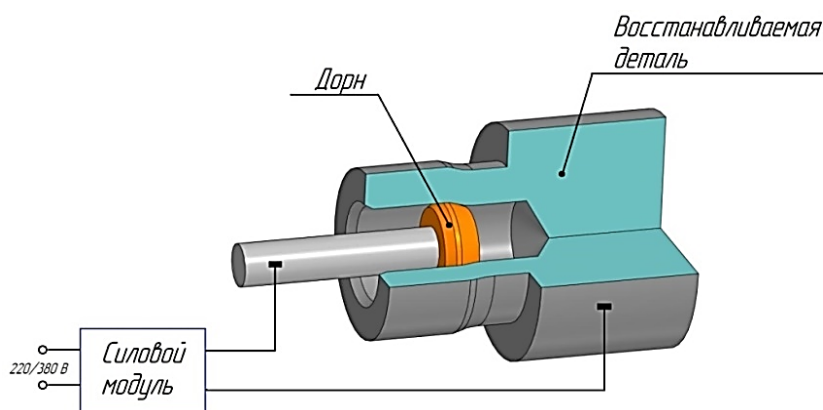


Рис. 2 – Схема процесса восстановления

нагрев до указанных выше температур иными возможными способами.

#### Материалы и методы исследований

Для определения осевого усилия дорнования проводили исследования методом конечных элементов (в системе ANSYS 2020 R1, в среде Workbench в трехмерном виде) и лабораторные экспериментальные исследования осевого усилия перемещения инструмента при ОЭМД. Начальные и граничные условия при исследовании методом конечных элементов задавали подобными лабораторным экспериментальным исследованиям, применен элемент SOLID185 (3-D 8-узловой объемный элемент), использовались условия непроникающего контакта (non-penetrating contact), исключающее проникновение элементов моделей через поверхность друг в друга, и условие скольжения (frictional contact), учитывающее силы трения в зоне контакта. В процессе моделирования учитывались изменения модуля Юнга и тепловых констант при повышении температуры [12, 13].

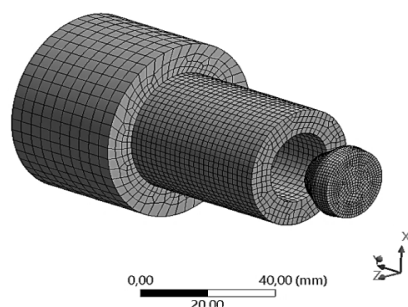


Рис. 3 – 3D конечно-элементная модель, предназначенная для исследования осевого усилия

Верификацию полученных моделей выполняли сопоставлением с результатами эксперимента.

Экспериментальные исследования проводили на вертикально-фрезерном станке 6В11

при помощи специально изготовленного инструмента с дорном из ВК8. Конструкция инструмента позволяла фиксировать осевое усилие при дорновании в реальном времени.

Инструмент для экспериментального исследования осевого усилия при ОЭМД, имеющий дорн, оправку, гильзу, тензодатчик и крышку с хвостовиком, представлен на рисунке 4. Дорн из ВК8 зафиксирован гайкой на установочной поверхности оправки. Для крепления токоподводящего кабеля, на лыске в средней части оправки изготовили сквозное отверстие диаметром 12 мм. На противоположном конце оправки фиксировался поршень (на рисунке 4 не показан), который, перемещаясь внутри гильзы, передавал усилие, приложенное к дорну, на тензодатчик. Гильза по наружной резьбовой поверхности вкручивалась в крышку с хвостовиком, крышка так же служила упором для тензодатчика. Хвостовик в свою очередь фиксировали в установочном конусе вертикально-фрезерного станка через текстолитовую токоизолирующую втулку (на рисунке 4 не показана). При экспериментальном лабораторном исследовании на контактирующие поверхности поршня и гильзы наносили графитовую смазку с целью снижения трения и, как следствие, повышения точности измерения осевого усилия при ОЭМД.

Тарировку тензодатчика осуществляли на машине для испытаний винтовых цилиндрических и плоских пружин МИП-100-2. При этом давление увеличивали постепенно с шагом в 50 Н.

При ОЭМД одним из ключевых параметров, оказывающим влияние на осевое усилие, является относительная толщина стенки –  $C$ , которая представляет собой отношение диаметра восстанавливаемого участка  $D$  к диаметру осевого отверстия  $d$  (рис. 5). Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены три группы образцов с относительными толщинами стенок:  $C = 2$ ;  $C = 1,7$  и  $C = 1,4$ . ОЭМД

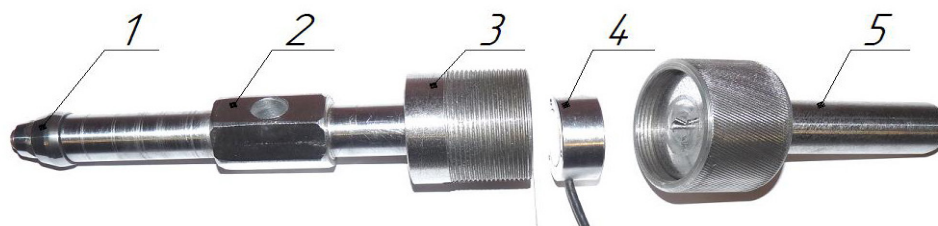
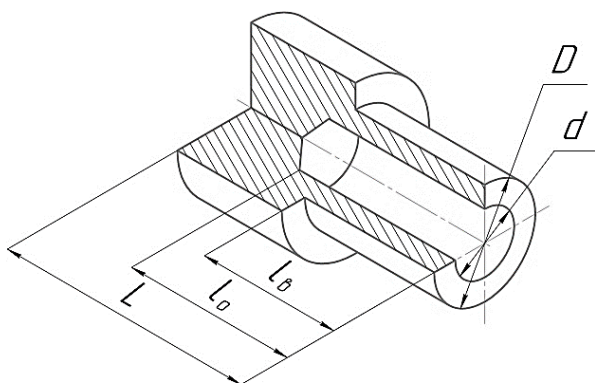


Рис. 4 – Инструмент для ОЭМД: 1 – дорн; 2 – оправка; 3 – гильза; 4 – тензодатчик ML-2,5t; 5 – крышка с хвостовиком

выполняли для каждой группы экспериментальных образцов с натягами  $i = 0,4$  мм;  $i = 0,8$  мм;  $i = 1,2$  мм.

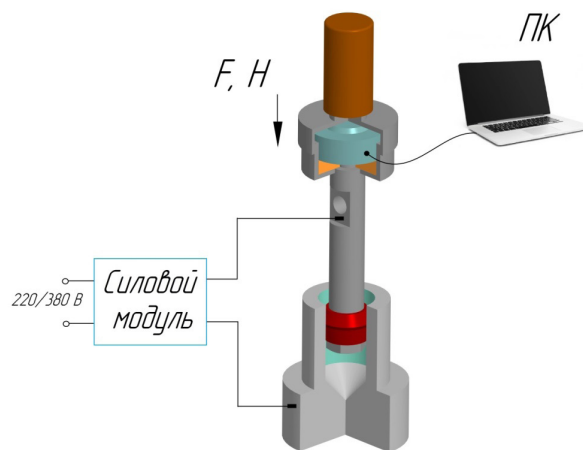


**Рис. 5 - Схема изменения размеров восстанавливаемого участка**

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены ступенчатые цилиндрические заготовки из стали 45. Выбранная марка стали является одной из самых распространенных, используемых для производства деталей с наружными гладкими цилиндрическими поверхностями. В экспериментальных образцах предварительно высверливали глухие осевые отверстия соответствующего диаметра с учётом обеспечения относительной толщины стенки:  $C = 2$ ;  $C = 1,7$  и  $C = 1,4$ . Глубина отверстий составляла  $l_0 = 70$  мм. Общая длина образцов составляла  $L = 100$  мм, при этом восстанавливаемый участок имел длину  $l_в = 50$  мм и диаметр  $D = 39,5$  мм. При выборе материала и размеров образцов учтены наиболее распространённые марки стали, применяемые при производстве деталей машин сельскохозяйственной техники, размеры и величины износов гладких цилиндрических поверхностей деталей.

Экспериментальный образец фиксировали в трехлапчатом самоцентрирующем патроне, который в свою очередь был закреплён на столе станке. Державка устанавливалась в шпиндель станка. Для обеспечения надежного контакта первоначально дорн прижимали к осевому отверстию экспериментального образца с усилием 50 Н, после чего включали подачу электрического тока силой  $I = 4800...5400$  А на деталь и инструмент, вследствие чего происходил нагрев деформируемого объёма экспериментального образца до температур  $850...1200$  °С. После чего обеспечивали движение инструмента в осевом направлении со скоростью 33 мм/мин. Скорость движения выбрана на основании

ранее проведенных исследований процесса ОЭМД и кинематики используемого станка [14]. При исследовании учитывалась средняя величина осевого усилия при перемещении инструмента вдоль всей длины отверстия. Схема процесса измерения осевого усилия в процессе ОЭМД представлена на рисунке 6.



**Рис. 6 – Схема измерения осевого усилия**

Показания тензодатчика отображались в реальном времени на мониторе компьютера, а также сохранялись на жестком диске с целью их последующего анализа. Измерения диаметра осевого отверстия проводили индикаторным нутромером повышенной точности с ценной деления 0,01 мм, настройка которого осуществлялась по плоскопараллельным концевым мерам длины второго класса. Измерение наружного диаметра экспериментального образца до и после ОЭМД выполняли механическим микрометром с диапазоном измерения 25...50 мм и ценной деления 0,01 мм.

#### **Результаты исследований**

Расхождение расчетных значений осевых усилий с результатами экспериментальных исследований в среднем составило 7,6 %, что обусловлено суммарными погрешностями изготовления экспериментальных образцов и дорнов. На основании полученных результатов были построены графики, представленные на рисунке 7.

Основываясь на данных, полученных при проведении исследований, можно сделать вывод, что с увеличением натяга  $i$  и относительной толщины стенки –  $C$  также увеличивается осевое усилие перемещения инструмента. Максимальное осевое усилие дорнования при экспериментальном лабораторном исследовании составило 4,92 кН (при:  $C = 2$  и  $i = 1,2$  мм), минимальное – 0,37 кН (при:  $C = 1,4$  и  $i = 0,4$  мм), при модели-

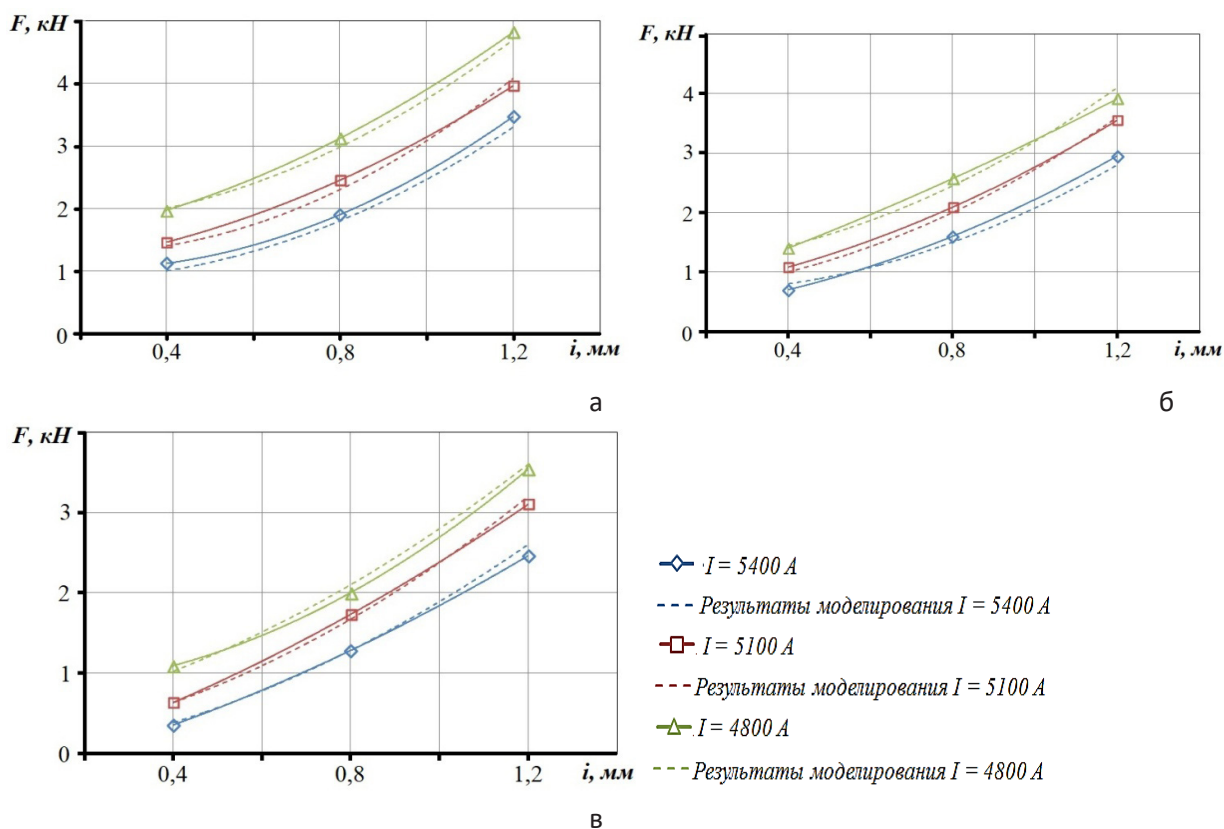


Рис. 7 – Зависимость осевого усилия от силы тока и натяга, при  $u = 33$  мм/мин: а –  $C = 2$ ; б –  $C = 1,7$ ; в –  $C = 1,4$

ровании 4,87 кН и 0,36 кН соответственно.

#### Обсуждение

Ранее проведенные исследования и анализ литературы показали [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], что при восстановлении наружных гладких цилиндрических поверхностей наиболее рационально восстанавливать способами, не требующими нанесения дополнительного материала на восстанавливаемую поверхность. Разработанный способ восстановления имеет так же преимущества перед уже существующими, такими как более низкая энергозатратность, меньшее время, затрачиваемое на восстановление, возможность упрочнения восстанавливаемой детали и т.д. Проведенные исследования показали, что для осуществления ОЭМД могут применяться вертикально-фрезерные и токарно-винторезные станки, широко распространенные на отечественных предприятиях АПК.

#### Заключение

Сравнение экспериментальных и расчетных данных указывает на адекватность полученных результатов моделирования. Полученные данные исследований позволили оценить влияние электроконтактного нагрева при ОЭМД на величину осевого усилия, а также позволяют определить необходимые параметры техноло-

гического оборудования и оснастки для реализации разработанного способа восстановления. Таким образом, ОЭМД представляет собой перспективное направление в области восстановления деталей сельскохозяйственной техники. Результаты исследований могут быть использованы предприятиями, занимающимися производством и ремонтом сельскохозяйственной техники.

#### Библиографический список

1. Григорович, В. В. Техническое обслуживание и ремонт сельскохозяйственной техники в современных условиях / В. В. Григорович // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2021. – № 17. – С. 132-135.
2. Гвоздев, М. А. Технические требования на ремонт сельскохозяйственной техники / М. А. Гвоздев, Ю. Н. Макеева // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2017. – № 8. – С. 50-52.
3. Галиев, И. Г. Модернизация смазочной системы подшипника турбокомпрессора дизельного двигателя / И. Г. Галиев, Е. П. Парлюк, Б. Г. Зиганшин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т.

16. – № 3(63). – С. 67-71. – DOI 10.12737/2073-0462-2021-67-71. – EDN QQSGUF.

4. Ишков, И. О. К износу деталей сельскохозяйственной техники / И. О. Ишков, Н. В. Коняев, Б. С. Блинков // Будущее науки – 2022: сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 21–22 апреля 2022 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – Т. 4. – С. 469-472.

5. Голубев, И. Г. Восстановление деталей как направление импортозамещения запасных частей сельскохозяйственной техники / И. Г. Голубев // Наука в центральной России. – 2015. – № 5(17). – С. 32-37.

6. Кравцова, Т. П. Анализ современных способов восстановления деталей машин / Т. П. Кравцова, В. Н. Проценко // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: Межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж: ВГТУ, 2015. – Вып. 14. – С. 123-128.

7. Технология и оборудование для упрочнения и восстановления деталей электрометаллической обработкой / Л. В. Федорова, В. Ф. Карпенков, С. К. Федоров [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2009. – № 2. – С. 34-35.

8. Жданов, С. И. Новое в технологии восстановления и упрочнения деталей / С. И. Жданов, Н. В. Коняев // Актуальные вопросы инновационного развития агропромышленного комплекса: материалы Международной научно-практической конференции. – Курск, 2016. – С. 190-192.

9. Морозов, А. В. Способы восстановления гладких цилиндрических поверхностей тяжело нагруженных деталей перемещением металла из нерабочих зон / А. В. Морозов, А. А. Кнуров // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции. – Мичуринск-наукоград РФ, 2021. – С. 163-166.

10. Сарина, М. П. Физика твердого тела / М. П. Сарина. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2017. – 107 с. – ISBN 978-5-7782-3319-5.

11. Савинов, А. С. Определение длины зоны пластического деформирования углеродистых сталей при высоких температурах / А. С. Савинов, А. С. Тубольцева // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Магнитогорск, 2011. – С. 24-26.

12. Маркидонов, А. В. Применение компьютерного эксперимента при изучении физики твердого тела и материаловедения / А. В. Маркидонов, В. В. Коваленко // Современные вопросы теории и практики обучения в вузе: сборник научных трудов. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – Т. Вып. 21. – С. 50-55.

13. Основы работы в Ansys 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью ДМК пресс. Электронные книги, 2017. – 210 с. – (САПР от А до Я). – ISBN 978-5-9706-0425-0.

14. Моделирование процесса теплонасыщения деформируемого участка детали при объемном электромеханическом дорновании / А. В. Морозов, А. А. Кнуров, А. Е. Абрамов, Л. Л. Хабиева // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: материалы национальной научно-практической конференции с Международным участием, посвященной 80-летию Ульяновского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина. – Ульяновск, 2022. – С. 889-895.

15. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники с применением новых материалов / В. В. Сафонов, Н. Б. Годунов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 8. – С. 36-40.

16. Чурилов, Д. Г. Восстановление деталей с применением комбинированных композиционных покрытий с дальнейшим упрочнением / Д. Г. Чурилов, Ю. А. Стекольников, И. С. Арапов // Современные материалы, техника и технологии. – 2021. – № 1(34). – С. 52-58.

17. Полищук, С. Д. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники хромовым покрытием с применением нанокремния / С. Д. Полищук // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 113-120.

18. Калущий, Е. С. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники электроосажденными сплавами железо-титан / Е. С. Калущий, В. И. Серебровский, О. С. Серникова // Современные материалы, техника и технологии. – 2023. – № 1(46). – С. 47-52.

19. Серебровский, В. И. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники электроосажденными легированными железными покрытиями / В. И. Серебровский, Е. С. Калущий, О. С. Серникова // Современные материа-

лы, техника и технологии. – 2023. – № 1(46). – С. 85-89.

20. Зологин, В. Г. Восстановление деталей машин технологией СМТ / В. Г. Зологин, Г. А. Пилюшина // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2020. – № 31. – С. 15-18.

21. Завитков, А. В. Восстановление изношенных поверхностей деталей методом лазерной наплавки порошковых материалов / А. В. Завитков, И. С. Печников, С. П. Милитеев // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы. – 2019. – № 1-2. – С. 89-92.

## STUDY OF THE AXIAL FORCE IN CASE OF VOLUMETRIC ELECTROMECHANICAL BURNISHING

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: alexeikn@mail.ru

**Key words:** outer cylindrical surface, wear, restoration, volumetric electromechanical burnishing, finite element method, experimental study.

Restoration of smooth outer cylindrical surfaces is one of the most common tasks in the repairs of agricultural machinery. The wear of these surfaces is 0.02 ... 0.4 mm in 85%. The existing recovery methods have some drawbacks that limit their usage, in this connection we have developed and patented a new method based on the movement of metal from non-working areas by means of volumetric electromechanical burnishing (VEB). To determine the necessary parameters of the equipment and tooling for implementation of VEB, studies of the axial force during VEB were carried out. The studies were carried out by calculation (simulation) and experimental methods. The initial and boundary conditions in the simulation were set similar to laboratory experimental studies. During the experimental study, the sample was fixed in a three-jaw self-centering chuck, which, in turn, was fixed on the machine. The holder was installed in the machine spindle. Previously, the tool was tightly pressed to the hole of the part being restored with a force of 50 N to ensure reliable contact, after that the electric current was put on to the tool and the part, as a result of which the deformed volume of the part was heated. Then the tool was moved in the axial direction at a speed of 33 mm/min. The movement speed was chosen on the basis of previous studies of the VEB process. Studies showed that in case of increase of tension  $i$  and relative wall thickness -  $C$ , the axial force of tool movement also increases. The maximum axial force in the process of VEB in an experimental laboratory study was 4.92 kN (at:  $C = 2$  and  $i = 1.2$  mm), the minimum was 0.37 kN (at:  $C = 1.4$  and  $i = 0.4$  mm), when modeling - 4.87 kN and 0.36 kN, respectively. Comparison of experimental and calculated data indicates the adequacy of the obtained simulation results. The results of the study allow to determine the necessary parameters of the equipment and tooling for implementation of VEB.

### Bibliography:

1. Grigorovich, V. V. Maintenance and repair of agricultural machinery in modern conditions / V. V. Grigorovich // Scientific and educational potential of youth in solving urgent problems of the XXI century. - 2021. - № 17. - P. 132-135.
2. Gvozdev, M. A. Technical requirements for repair of agricultural machinery / M. A. Gvozdev, Yu. N. Makeeva // Scientific and educational potential of youth in solving urgent problems of the XXI century. - 2017. - № 8. - P. 50-52.
3. Galiev, I. G. Improvement of the lubrication system of the diesel engine turbocharger bearing / I. G. Galiev, E. P. Parlyuk, B. G. Ziganshin // Vestnik of Kazan State Agrarian University. - 2021. - V. 16. - № 3 (63). - P. 67-71. - DOI 10.12737/2073-0462-2021-67-71. - EDN QQSGUF.
4. Ishkov, I. O. To the issue of wear of agricultural machinery parts / I. O. Ishkov, N. V. Konyaev, B. S. Blinkov // The future of the science - 2022: collection of scientific articles of the 10th International Youth Scientific Conference, Kursk, April 21–22, 2022. - Kursk: Southwestern State University, 2022. - V. 4. - P. 469-472.
5. Golubev, I. G. Restoration of parts as a direction of import substitution of spare parts for agricultural machinery / I. G. Golubev // Science in Central Russia. - 2015. - № 5(17). - P. 32-37.
6. Kravtsova, T. P. Analysis of modern methods of restoring machine parts / T. P. Kravtsova, V. N. Protsenko // Quality assurance of products at the stages of design and technological preparation of production: Interuniversity collection of scientific papers. - Voronezh: VSTU, 2015. - Issue. 14. - P. 123-128.
7. Technology and equipment for hardening and restoring of spare parts by electromechanical processing / L. V. Fedorova, V. F. Karpenkov, S. K. Fedorov [and others] // Machinery and equipment for the village. - 2009. - № 2. - P. 34-35.
8. Zhdanov, S. I. New issues in the technology of restoration and hardening of spare parts / S. I. Zhdanov, N. V. Konyaev // Current issues of innovative development of the agro-industrial complex: materials of the International scientific and practical conference. - Kursk, 2016. - P. 190-192.
9. Morozov, A. V. Methods of restoration of smooth cylindrical surfaces of heavily loaded parts by moving away metal from non-working areas / A. V. Morozov, A. A. Knyurov // Engineering support of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the International scientific and practical conference. - Michurinsk-science city of the Russian Federation, 2021. - P. 163-166.
10. Sarina, M. P. Physics of the Solid / M. P. Sarina. - Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2017. - 107 p. - ISBN 978-5-7782-3319-5.
11. Savinov, A. S. Specification of the length of plastic deformation zone of carbon steels at high temperatures / A. S. Savinov, A. S. Tuboltseva // Modern methods of design and technology of metallurgical engineering: International collection of scientific papers. - Magnitogorsk, 2011. - P. 24-26.
12. Markidonov, A. V. Application of a computer experiment in the study of physics of the solid state and materials science / A. V. Markidonov, V. V. Kovalenko // Modern issues of theory and practice of teaching at the university: a collection of scientific papers. - Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2019. - V. Issue. 21. - P. 50-55.
13. Fundamentals of work in Ansys 17 / N. N. Fedorova, S. A. Valger, M. N. Danilov, Yu. V. Zakharova. - Moscow: Limited Liability Company DMK press. Electronic books, 2017. - 210 p. - (CAD from A to Z). - ISBN 978-5-9706-0425-0.
14. Modeling the process of heat saturation of a deformable section of a spare part during volumetric electromechanical burnishing / A. V. Morozov, A. A. Knyurov, A. E. Abramov, L. L. Khabieva // Science in modern conditions: from idea to implementation: materials of the national scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 80th anniversary of Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin. - Ulyanovsk, 2022. - P. 889-895.
15. Restoration and hardening of agricultural machinery parts using new materials / V. V. Safonov, N. B. Godunov, S. A. Shishurin, V. S. Semochkin // Repairs. Recovery. Modernization. - 2012. - № 8. - P. 36-40.
16. Churilov, D. G. Restoration of parts using combined composite coatings with further hardening / D. G. Churilov, Yu. A. Stekolnikov, I. S. Arapov // Modern materials, equipment and technologies. - 2021. - № 1 (34). - P. 52-58.
17. Polishchuk, S. D. Restoration of parts of agricultural machinery with a chromium coating using nanocarbon / S. D. Polishchuk // Vestnik of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. - 2022. - V. 14, № 3. - P. 113-120.
18. Kalutsky, E. S. Restoration of parts of agricultural machinery by electrodeposited iron-titanium alloys / E. S. Kalutsky, V. I. Serebrovsky, O. S. Sernikova // Modern materials, equipment and technologies. - 2023. - № 1 (46). - P. 47-52.
19. Serebrovsky, V. I. Restoration of agricultural machinery parts with electrodeposited alloyed iron coatings / V. I. Serebrovsky, E. S. Kalutsky, O. S. Sernikova // Modern materials, equipment and technologies. - 2023. - № 1 (46). - P. 85-89.
20. Zologin, V. G. Restoration of machine parts using MCW technology / V. G. Zologin, G. A. Pilyushina // New materials and technologies in mechanical engineering. - 2020. - № 31. - P. 15-18.
21. Zavitkov, A. V. Restoration of worn surfaces of parts by laser cladding of powder materials / A. V. Zavitkov, I. S. Pechnikov, S. P. Militeev // Young scientists to development of the National Technological Initiative. - 2019. - № 1-2. - P. 89-92.