

Напряженно-деформированное состояние при несвободном объемном электромеханическом дорновании тонкостенных бронзовых втулок

А. В. Морозов¹, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология производства и ремонт машин»

А. Н. Еремеев^{1✉}, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология производства и ремонт машин»

А. А. Болтенков², кандидат технических наук, доцент, декан факультета заочного обучения

¹ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432000, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

✉erem.an@mail.ru

²ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ

656049, Алтайский край, г. Барнаул, проспект Красноармейский, 98

Резюме. В работе рассмотрено влияние натяга между инструментом (дорном) и обрабатываемой поверхностью на величину остаточных напряжений при несвободном объемном электромеханическом дорновании (ОЭМД) тонкостенных бронзовых втулок. Существующие технологии по замене изношенных бронзовых втулок имеют большую трудоемкость процесса и не решают задачи повышения долговечности соединений «вал-втулка» и «корпус – втулка». Для устранения данных недостатков предлагается выполнять ОЭМД бронзовых втулок, предварительно установленных в корпус с переходной посадкой. Остаточные напряжения в бронзовой втулке, возникающие при реализации ОЭМД зависят от многих параметров: режимов ОЭМД, геометрических размеров инструмента и детали, свойств материала втулки, свойств материала инструмента и т.д. Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на долговечность как подвижных, так и неподвижных соединений. С целью определения влияния режимов ОЭМД на величину остаточных напряжений тонкостенных бронзовых втулок было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния при ОЭМД бронзовых втулок марки Бр ОЦС 4-4-2,5, установленных в обоймы из стали марки 40Х. При моделировании были получены следующие результаты: с увеличением натяга от $i = 0,3$ мм до $i = 0,5$ мм при ОЭМД бронзовых втулок наблюдается увеличение напряжений на обрабатываемой поверхности с 1325 МПа до 1526 МПа. Также при ОЭМД происходит равномерное распределение осевых усилий, возрастающих при увеличении натяга. Было определено, что при увеличении натяга от $i = 0,3$ мм до $i = 0,5$ мм осевые усилия возрастают на 28%, а остаточные напряжения на поверхности втулок увеличиваются с 24 МПа до 49 МПа.

Ключевые слова: тонкостенные бронзовые втулки, объемное электромеханическое дорнование, напряженно-деформированное состояние, натяг, остаточные напряжения, моделирование.

Для цитирования: Морозов А.В., Еремеев А.Н., Болтенков А. А. Напряженно-деформированное состояние при несвободном объемном электромеханическом дорновании тонкостенных бронзовых втулок // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 4 (72). С. 207-213. doi:10.18286/1816-4501-2025-4-207-213

Stress-strain state during constrained volume electromechanical mandling of thin-walled bronze bushings

A. V. Morozov¹, A. N. Eremeev^{1✉}, A. A. Boltenkov²

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Agrarian University

432000, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1

✉erem.an@mail.ru

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Altai State Agrarian University

656049, Altai Krai, Barnaul, Krasnoarmeysky Ave, 98

Abstract. This paper examines the effect of interference between the tool (mandrel) and the workpiece on the magnitude of residual stresses during constrained volume electromechanical mandling (VEMM) of thin-walled bronze bushings. Existing technologies for replacing worn bronze bushings are labor-intensive and fail to improve the durability of shaft-to-bushing and housing-to-bushing connections. To address these shortcomings, it is proposed to perform VEMM on bronze bushings pre-installed in a housing with a transition fit. Residual stresses in a bronze bushing arising during VEMM depend on many parameters, including VEMM modes, the geometric dimensions of the tool and part, the properties of the bushing material, the properties of the tool material, etc. Residual stresses have a significant impact on the durability of both sliding and fixed connections. To determine the effect of VEMM modes on the residual stresses of thin-walled bronze bushings, a stress-strain state simulation was conducted for VEMM on Br OTSS 4-4-2.5 bronze bushings installed in 40X steel cages. The following results were obtained during modeling: with increasing interference from $i = 0.3$ mm to $i = 0.5$ mm during electromechanical mandrel boring of bronze bushings, stresses on the machined surface increase from 1325 MPa to 1526

MPa. Also, with electromechanical mandrel boring, axial forces are uniformly distributed, rising with increasing interference. It was determined that with increasing interference from $i = 0.3$ mm to $i = 0.5$ mm, axial forces increase by 28%, and residual stresses on the bushing surface increase from 24 MPa to 49 MPa.

Keywords: thin-walled bronze bushings, volumetric electromechanical mandrel boring, stress-strain state, interference, residual stresses, modeling.

For citation: Morozov A. V., Ereemeev A. N., Boltenev A. A. Stress-strain state during constrained volume electromechanical mandrel boring of thin-walled bronze bushings // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025.4 (72): 207-213 doi:10.18286/1816-4501-2025-4-207-213

Введение

Бронзовые втулки нашли широкое применение в конструкциях машин и механизмов благодаря своим свойствам, а именно высоким показателям механической прочности, пластичности, износостойкости, хорошей теплопроводности и теплоемкости. Благодаря хорошим антифрикционным свойствам бронзовые втулки широко применяются в подшипниках скольжения, например, в таких агрегатах, как: редукторы, насосы, электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, генераторы, турбины и т.д. В процессе эксплуатации бронзовые втулки подвергаются воздействию ударных и знакопеременных нагрузок, и в силу высокой пластичности металла деформируются, тем самым компенсируя их разрушительное воздействие. Исходя из своего функционального предназначения, бронзовые втулки выполняют функцию расходного материала.

При ремонте агрегатов изношенную бронзовую втулку меняют на новую. Как правило, при этом изготавливают ремонтную втулку и запрессовывают в отверстие корпусной детали. Для обеспечения необходимого размера и шероховатости внутреннюю поверхность втулки растачивают и развертывают или раскатывают многороликовой раскаткой под номинальный размер. При такой технологии приходится выполнять большое количество операций и, соответственно, операция замены втулки является трудоемкой. Вместе с тем данная технология восстановления не обеспечивает необходимую долговечность соединений «вал – втулка» и «корпус – втулка».

Для повышения долговечности данных соединений предлагается выполнять ОЭМД бронзовых втулок, предварительно установленных в корпус с переходной посадкой [1, 2, 3].

При несвободном ОЭМД отверстий тонкостенных бронзовых втулок ($1,1 \leq D/d \leq 1,2$) охватывающая поверхность корпусной детали ограничивает радиальные перемещения по наружной поверхности втулки. В результате этого деформации происходят относительно равномерно по всему объему втулки, обеспечивая образование больших контактных давлений в зоне деформации при ограниченной поперечной жесткости детали, что способствует достижению повышенной точности внутренней поверхностей втулки, снижению шероховатости и получению качественного поперечно-прессового соединения втулки с корпусом. Нагрев в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью бронзовой втулки в совокупности с радиальным давлением способствует повышению твердости вследствие горячего наклепа

и выдавливанию свинца на поверхность (если он присутствует в составе бронзы), что повышает антифрикционные свойства внутренней поверхности втулки [4, 5, 6].

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на долговечность как подвижных, так и неподвижных соединений.

Остаточные напряжения в бронзовой втулке, возникающие при реализации ОЭМД зависят от многих параметров: режимов ОЭМД, геометрических размеров инструмента и детали, свойств материала втулки, свойств материала инструмента и т.д. Для получения благоприятных остаточных напряжений и определения рациональных режимов ОЭМД необходимо установить обобщенные зависимости остаточных напряжений от этих параметров.

Цель работы – исследование влияния режимов ОЭМД на величину остаточных напряжений тонкостенных бронзовых втулок для определения области рациональных режимов и повышения долговечности соединений «тонкостенная бронзовая втулка – поверхность вала» и «тонкостенная бронзовая втулка – корпус».

Материалы и методы

Исследования проводились на базе кафедры «Технология производства и ремонт машин» и центра коллективного пользования научным оборудованием «Научно-исследовательская лаборатория технологий металлов» ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ.

При использовании ОЭМД для втулок, установленных в обойму (корпус), возникает ограничение увеличения внешнего диаметра втулки, при этом возрастают нормальные напряжения на внутренней поверхности втулки в месте контакта ее с инструментом. При этом применяют схему сжатия или растяжения, если направление течения металла при пластической деформации совпадает с направлением движения дорна, то используют схему растяжения, если металл перемещается в обратном направлении по отношению к движению дорна, то применяют схему сжатия [7, 8, 9].

Геометрия пластической деформации и её размеры существенно влияют на параметры и итоговые свойства технологического процесса ОЭМД тонкостенных бронзовых втулок.

Предполагается, что область деформации при ОЭМД представляет собой совокупность взаимосвязанных деформируемых участков. Эта совокупность включает в себя как зоны непосредственного взаимодействия деформируемой поверхности с инструментом, так и области, где такой контакт отсутствует,

причём между этими зонами наблюдается плавный переход.

При изучении контактных трехмерных задач и анализа напряженно-деформированного состояния тел сложной формы с ограниченными размерами наиболее эффективным подходом является применение численных методов. Данные методы строятся на дискретном представлении с последующей аппроксимацией непрерывных функций, описывающих характеристики перемещений, напряжений и деформаций. Среди разнообразных численных подходов, относящихся к этой категории, метод конечных элементов является одним из наиболее часто используемых [10, 11, 12].

В рамках этого способа твердое тело представляется в виде набора дискретных конечных элементов, полученных в результате его разделения на части. Этот способ дает возможность преобразовать исходные дифференциальные уравнения в систему алгебраических уравнений, которые определяют искомые параметры, тем самым приводя задачу к установлению уравнений, описывающих характеристики этих параметров.

Расчет проводили в программе ANSYS 14.5.7 в среде Workbench в двухмерном виде в осесимметричной постановке.

Для расчета была определена следующая модель: в качестве инструмента применялся дорн, в обойму устанавливали втулку. Рабочая часть дорна выполнена в виде конуса со сферическим пояском диаметром 30 мм. Размеры дорна и втулки соотносили таким образом, чтобы возникал натяг при их соединении. Длина отверстия втулки составляет 30 мм. Для расчетов был установлен временной промежуток в 1 сек, что соответствует примерно 800 итерациям.

При проведении моделирования были установлены граничные условия: нагрев обеспечивался посредством подвода тепловой энергии к внешней стороне цилиндрической части втулки; внешняя цилиндрическая поверхность втулки была зафиксирована неподвижно; перемещение граней втулки в направлении, перпендикулярном к их поверхности, исключалось; дорн перемещался вдоль оси втулки на расстояние 30 мм; любое смещение дорна в направлении, отличном от осевого исключалось; исходная температура упрочняющего инструмента составляла 22 °С.

При проведении моделирования использовались следующие материалы: бронзовая втулка – Бр ОЦС 4-4-2,5; инструмент (дорн) – твердый сплав ВК8; корпус (обойма) – сталь 40Х.

При выполнении вычислений принималось во внимание изменение модуля упругости (модуля Юнга) и термодинамических характеристик, возникающие при увеличении температуры.

В расчетах пренебрегали влиянием температуры, образующейся из-за трения между инструментом и втулкой, так как её величина незначительна по

сравнению с тепловой энергией, выделяющейся при прохождении электричества. Учитывалось лишь давление, действующее на точки контакта поверхностей, и относительная скорость перемещения. Влияние микронеровностей и изменения фазового состояния материала не рассматривалось. Было сделано предположение о полном преобразовании механической работы в тепловую и о равномерном распределении тепла между взаимодействующими телами.

Расчеты ОЭМД тонкостенных бронзовых втулок выполняли по схеме сжатия (рис. 1).

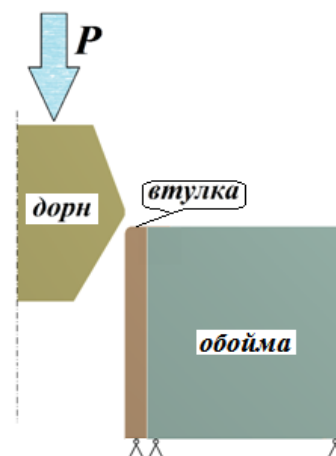


Рис. 1. Схема для расчета процесса ОЭМД тонкостенных бронзовых втулок (по схеме сжатия)

Для оценки напряжений, деформаций и тепловых нагрузок, обусловленных процессом ОЭМД, при моделировании использовали элемент PLANE 223. Этот выбор дал возможность эффективно решать задачи по двумерным моделям и неравномерным нагрузкам, возникающим из-за механического и теплового воздействия.

Зависимость механических напряжений можно представить следующим образом [13, 14, 15]:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\}$$

где ε – линейная деформация.

Распределение механических напряжений в каждом конечном элементе можно представить в виде схемы (рис. 2).

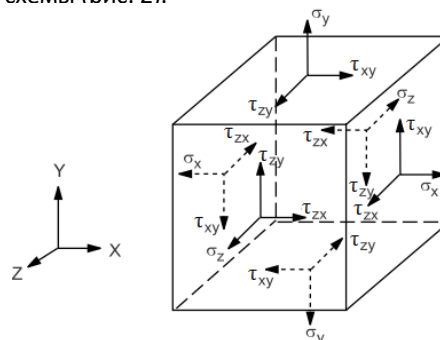


Рис. 2. Расчетная схема девятиатора напряжений

Тогда в соответствие с рис. 2 матрица жесткости примет следующий вид:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix}$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона

Так как в нашем случае задача осесимметричная, то расчетная схема будет иметь вид (рис. 3).

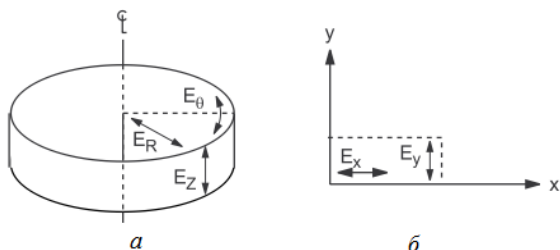


Рис. 3. Расчетные схемы: а – полярная система координат для 3-D тел; б – аксиально-симметричный элемент

С целью вычисления напряжений, связанных с изменением формы тела при деформации, с учетом расчетной схемы, представленной на рис. 3, был разработан девиатор напряжений:

$$[D_{R-\theta-Z}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_R & -\nu_{RZ}/E_R & -\nu_{R\theta}/E_R \\ -\nu_{ZR}/E_Z & 1/E_Z & -\nu_{Z\theta}/E_Z \\ -\nu_{\theta R}/E_\theta & -\nu_{\theta Z}/E_\theta & 1/E_\theta \end{bmatrix}$$

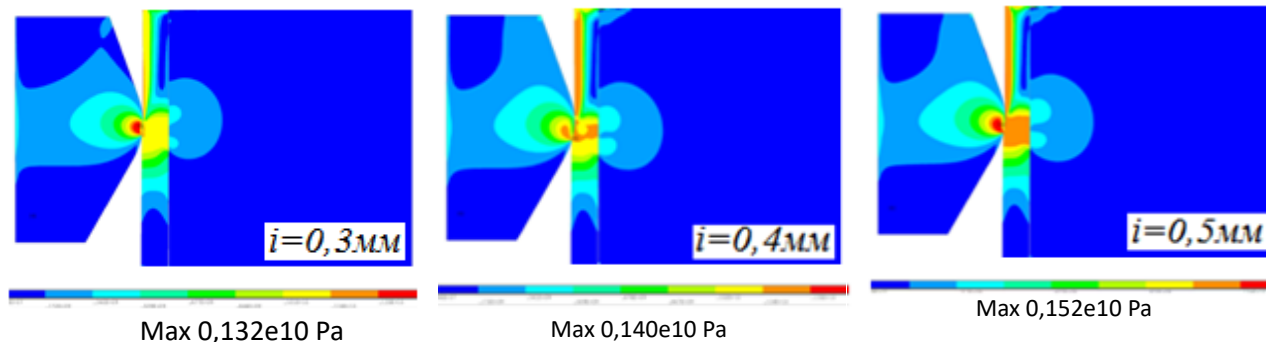


Рис. 5. Распределение механических напряжений при ОЭМД от величины натяга i : $I = 5300$ А; $u = 66$ мм/мин

Анализ результатов моделирования позволил построить диаграммы, отображающие динамику изменения осевого усилия по всей протяженности втулки (рис. 6).

В результате исследования выяснилось, что при обработке бронзовых втулок методом ОЭМД пиковое значение осевого усилия, воздействующего на инструмент, увеличилось с 1,38 кН до 1,92 кН при увеличении величины натяга от 0,3 мм до 0,5 мм (рис. 6).

Определяются эквивалентные напряжения:

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

Для решения поставленной задачи моделирования напряженно-деформируемого состояния строится неструктурированная расчетная сетка (рис. 4).

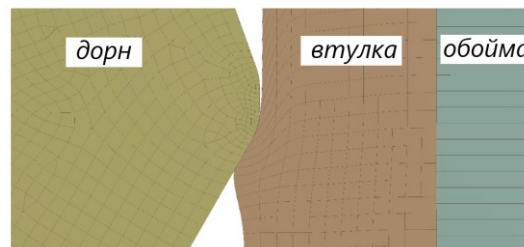


Рис. 4. Конечноэлементная модель процесса ОЭМД тонкостенных бронзовых втулок

Результаты

При определении зависимости влияния величины натяга на величину напряжений при ОЭМД установлено, что при натяге $i = 0,3$ мм напряжения составили 1325 МПа, а при увеличении натяга $i = 0,5$ мм напряжения увеличились до 1526 МПа (рис. 5).

Полученные результаты позволят рационально подбирать технологическое оборудование и проектировать технологическую оснастку для реализации процесса ОЭМД бронзовых втулок.

В ходе моделирования были выявлены зависимости распределения остаточных напряжений после ОЭМД, возникающих на наружной поверхности тонкостенных бронзовых втулок, установленных в стальной обойме, от величины натяга инструмента и внутренней поверхности втулки (рис. 7).

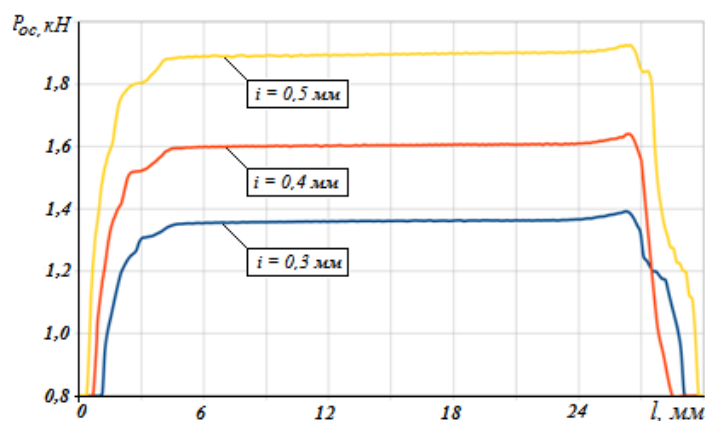


Рис. 6. Влияние натяга на осевые усилия при ОЭМД тонкостенной бронзовой втулки из Бр ОЦС 4-4-2,5 в стальной обойме по схеме сжатия при $I = 5300$ А; $u = 66$ мм/мин

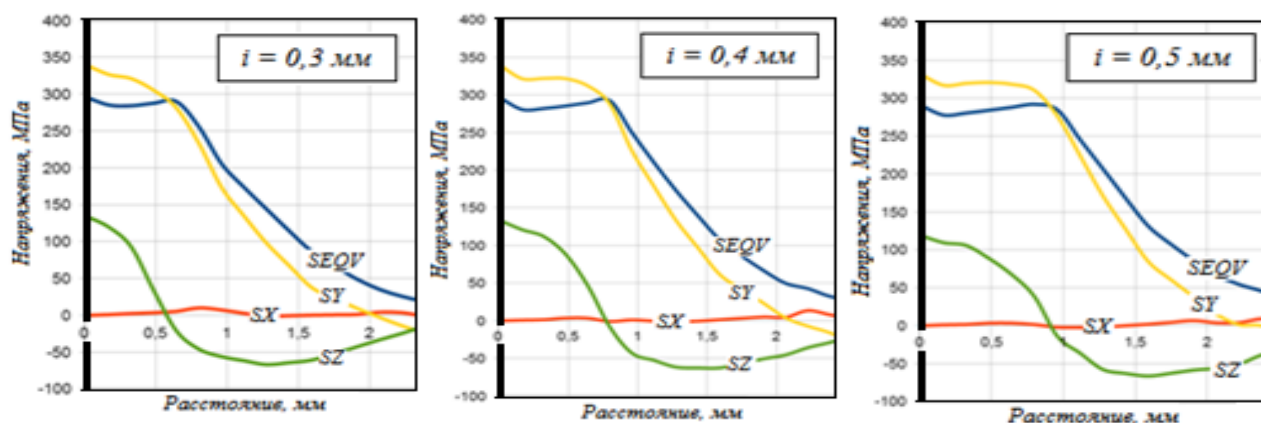


Рис. 7. Влияние натяга ОЭМД на величину остаточных напряжений: SX – поперечная составляющая; SY – продольная составляющая; SZ – окружная составляющая и SEQV – эквивалентные напряжения

Обсуждение

В результате моделирования напряженно-деформированного состояния тонкостенных бронзовых втулок после ОЭМД в обойме методом конечных элементов установлено, что увеличение натяга с 0,3 до 0,5 мм приводит к повышению остаточных напряжений на поверхности втулок с 24 МПа до 49 МПа.

Также можно отметить, что нагрев контактируемой кольцевой поверхности при ОЭМД существенно влияет на снижение контактных напряжений и осевых усилий на инструмент и их стабилизацию в сравнении с традиционным процессом дорнования [16, 17, 18], что способствует при прочих равных условиях повышению долговечности технологического оборудования и стойкости инструмента (дорна).

Заключение

Получены модели влияния натяга i на напряженно-деформированное состояние тонкостенных бронзовых втулок в процессе и после (остаточные напряжения) ОЭМД. Установлено, что с увеличением натяга от 0,3 мм до 0,5 мм осевые усилия увеличиваются в 1,4 раза, а остаточные напряжения на поверхности втулок – в 2 раза.

Полученные результаты позволят при практической реализации процесса рационально выбирать режимы с целью повышения долговечности как подвижного соединения «тонкостенная бронзовая

втулка – поверхность вала», так и неподвижного соединения «тонкостенная бронзовая втулка – корпус».

Литература

1. Морозов А. В., Кундротас К. Р. Повышение качества ремонта верхней головки шатуна двигателей ЯМЗ 236 - 240 применением объемного электромеханического дорнования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 219-225.
2. Морозов А. В., Абрамов А. Е., Байгулов А. В. Качество прессового соединения, полученного объемным электромеханическим дорнованием бронзовых втулок в замкнутом объеме // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 91-97.
3. Исследование конструкций прессовых соединений "втулка-обойма" и "вал-втулка-обойма" образованных методом дорнования отверстий / А. Н. Исаев, С. В. Лесняк, О. В. Лесняк и др. // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Сборник статей 9-й международной научно-практической конференции в рамках 19-й международной агропромышленной выставки "Интерагромаш-2016", Ростов-на-Дону, 02-04 марта 2016 года. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2016. С. 213-215.

4. Морозов А. В., Байгулов А. В. Рентгеноструктурный анализ поверхности втулки, изготовленной из бронзы Бр ОЦС 5-5-5, обработанной объемным электромеханическим дорнованием // Вестник ФГБОУ ВПО МГАУ. № 2. Москва 2011. С 31-33.

5. Григорян А. С. Экспериментальное исследование шероховатости наружной поверхности втулок в процессе дорнования корпуса с одновременной запрессовкой втулки // Молодежь - Барнаул: Материалы XVI научно-практической конференции молодых ученых. Барнаул, 17–25 ноября 2014 года. – Барнаул: Алтайский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2014. С. 426-428.

6. Рябичева Л. А., Белозир И. И. Экспериментальные и теоретические исследования процесса дорнования заготовок втулок из различных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Т. 23. № 1. С. 48-51. doi: 10.36652/1684-1107-2025-23-1-48-51.

7. Лебедев А. Р., Исаев А. Н., Власкин С. В. Моделирование геометрических параметров очага деформирования при дорновании отверстий // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Сборник статей 11-й международной научно-практической конференции в рамках 21-й международной агропромышленной выставки "Интерагромаш - 2018", Ростов-на-Дону, 28 февраля – 02 2018 года. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2018. С. 186-189.

8. Лысак И. А., Лю Ю., Лысак Г. В. Численное исследование остаточных напряжений в цилиндрических образцах, подвергнутых одноцикловому дорнованию по схеме сжатия // Ползуновский альманах. 2021. № 4. С. 33-35.

9. Кулеш С. Г., Лысак И. А. Численное исследование деформированного состояния толстостенных втулок, подвергнутых одноцикловому поверхностному дорнованию по схеме сжатия // Ползуновский альманах. 2021. № 4. С. 49-51.

10. Мальнев А. С., Оглукова К. Д. Метод конечных элементов // Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: сборник научных статей Всероссийской молодежной научной конференции: в 3 т., Курск, 30 мая 2023 года. Том 3. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. С. 233-234.

11. Яковлев С. С., Галкин Ю. С., Грибачев Я. В. Анализ программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 314-316. doi: 10.24412/2071-6168-2024-2-314-315.

12. Донева О. В., Нигорожина Е. С. Использование численных методов при решении инженерных задач // Университетская наука. 2020. № 2(10). С. 171-173.

13. Шишкин С. В. К расчету концентрации контактной нагрузки в соединениях с натягом

тонкостенных деталей // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22, № 3. С. 79-91. doi: 10.26467/2079-0619-2019-22-3-79-91.

14. Буланов В. Б., Семенов-Ежов И. Е., Ширшов А. А. Концентрация напряжений в прессовых соединениях деталей // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 2(39). С. 53-58.

15. Тутанов С. К., Даненова Г. Т., Коккоз М. М. Компьютерное моделирование контактных напряжений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 36-39.

16. Рябичева Л. А., Решетняк Д. В. Анализ напряженно-деформированного состояния при дорновании втулки // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2020. № 4 (33). С. 10-20.

17. Лю Ю., Лысак И. А. Влияние натяга дорнования и геометрических параметров втулок на величину остаточных напряжений // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: Сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26–28 апреля 2022 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. С. 511-514.

18. Бузинаева Е. М., Зайдес С. А. Определение напряженного состояния при дорновании толстостенной втулки // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ, Липецк, 17–19 мая 2012 года / Под общей редакцией А.М. Козлова. Том Часть 1. Липецк: Липецкий государственный технический университет. 2012. С. 69-73.

References

1. Morozov A. V., Kundrotas K. R. Improving the quality of repair of the upper end of the connecting rod of YaMZ 236-240 engines using volume electromechanical mandrel burnishing // Vestnik of Tula State University. Engineering Sciences. 2018. No. 10. P. 219-225.

2. Morozov A. V., Abramov A. E., Baigulov A. V. Quality of a pressed joint obtained by volume electromechanical mandrel burnishing of bronze bushings in a confined volume // Scientific Review. 2013. No. 1. P. 91-97.

3. Study of the designs of "bushing-cage" and "shaft-bushing-cage" press joints formed by the method of hole burning / A. N. Isaev, S. V. Lesnyak, O. V. Lesnyak et al. // State and prospects of the development of agricultural engineering: Collection of articles of the 9th international scientific and practical conference within the framework of the 19th international agro-industrial exhibition "Interagromash-2016", Rostov-on-Don, March 2-4, 2016. Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2016. P. 213-215.

4. Morozov A. V., Baigulov A. V. X-ray structural analysis of the surface of a bushing made of Br OTsS 5-5-5 bronze processed by volumetric electromechanical

mandrel burning // Vestnik of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Moscow State Agrarian University. No. 2. Moscow 2011. P. 31-33.

5. Grigoryan A. S. Experimental study of the roughness of the outer surface of bushings in the process of mandrel burning of the housing with simultaneous pressing in of the bushing // Youth to Barnaul: Proceedings of the XVI scientific and practical conference of young scientists. Barnaul, November 17-25, 2014. Barnaul: Altai State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2014. P. 426-428.

6. Ryabicheva L. A., Belozir I. I. Experimental and theoretical studies of the process of mandrel burning of bushing blanks from various materials // Blank production in mechanical engineering. 2025. Vol. 23. No. 1. P. 48-51. doi: 10.36652/1684-1107-2025-23-1-48-51

7. Lebedev A. R., Isaev A. N., Vlaskin S. V. Modeling the geometric parameters of the deformation zone during mandrel boring // State and prospects of development of agricultural engineering: Collection of articles of the 11th international scientific and practical conference within the framework of the 21st international agro-industrial exhibition "Interagromash - 2018", Rostov-on-Don, February 28 2018. Rostov-on-Don: Limited Liability Company "DSTU-PRINT". 2018. P. 186-189.

8. Lysak I. A., Liu Yu., Lysak G. V. Numerical study of residual stresses in cylindrical specimens subjected to single-cycle mandrel pressing under compression // Polzunovsky Almanac. 2021. No. 4. P. 33-35.

9. Kulesh S. G., Lysak I. A. Numerical study of the deformed state of thick-walled bushings subjected to single-cycle surface mandrel burning according to the compression scheme // Polzunovsky Almanac. 2021. No. 4. P. 49-51.

10. Malnev A. S., Oglukova K. D. Finite element method // The Future of Science: Young scientists' view of the innovative development of society: collection of scientific articles of the All-Russian youth scientific conference: in 3 volumes, Kursk, May 30. 2023. Volume 3. Kursk: Closed Joint-Stock Company "University Book". 2023. P. 233-234.

11. Yakovlev S. S., Galkin Yu. S., Gribachev Ya. V. Analysis of software for computer modeling of metal forming processes // Vestnik of Tula State University. Technical sciences. 2024. No. 2. P. 314-316. doi: 10.24412/2071-6168-2024-2-314-315

12. Doneva O. V., Nigorzhina E. S. Using numerical methods in solving engineering problems // University Science. 2020. No. 2(10). P. 171-173.

13. Shishkin S. V. On the calculation of contact load concentration in interference joints of thin-walled parts // Scientific Vestnik of Moscow State Technical University of Civil Aviation. 2019. Vol. 22. No. 3. P. 79-91. doi: 10.26467/2079-0619-2019-22-3-79-91

14. Bulanov V.B., Semenov-Ezhov I.E., Shirshov A.A. Stress concentration in press joints of parts // Mechanical Engineering and Engineering Education. 2014. No. 2 (39). P. 53-58.

15. Tutanov S. K., Danenova G. T., Kokkoz M. M. Computer modeling of contact stresses // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2014. No. 4. P. 36-39.

16. Ryabicheva L. A., Reshetnyak D. V. Analysis of the stress-strain state during mandrel pressing of a bushing // Resource-saving technologies for the production and pressure processing of materials in mechanical engineering. 2020. No. 4 (33). P. 10-20.

17. Liu Yu., Lysak I. A. Influence of mandrel interference and geometric parameters of bushings on the magnitude of residual stresses // Scientific initiative of foreign students and postgraduates: Collection of reports of the II International scientific and practical conference, Tomsk, April 26-28, 2022. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University. 2022. P. 511-514.

18. Buzinaeva E. M., Zaides S. A. Specification of the stress state during mandrel burning of a thick-walled bushing // Fundamental and applied problems of modernization of modern mechanical engineering and metallurgy: Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of Mechanical Engineering Technology of LSTU, Lipetsk, May 17-19. 2012. Under the general editorship of A. M. Kozlov. Vol. Part 1. Lipetsk: Lipetsk State Technical University. 2012. P. 69-73.