

Димитър Светлозаров Георгиев, доктор технических наук
Технический университет - Варна, Болгария

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (ППД) ПРИ ЗАВЕРШАЮЩЕЙ
ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В НАПРАВЛЯЮЩИХ ПОДШИПНИКОВ ТИПА
ВЕДУЩИХ БРОНЗОВЫХ ВТУЛКАХ**

Рассматриваются преимущества бесстружечной завершающей обработки, выполненной при помощи ППД, при обработке точных отверстий в бронзовых втулках подшипников. Экспериментально установлены зависимости между режимными факторами при ППД обработке и параметрами качества получаемых поверхностей. На основе сравнительного анализа двух методов завершающей обработки – двукратной расточки и ППД обработки с помощью развальцовки, показаны технологические и эксплуатационные преимущества применения ППД обработки при завершающей обработке бронзовых втулок.

Ключевые слова: точность, шероховатость, бронзовые втулки-подшипники, ППД обработка.

The present article introduces the advantage of finishing treatment of bronze bush bearings, based on burnishing processes (BP). It is proved experimentally dependences between regime factors of finishing treatment of bronze bush bearings, based on burnishing processes (BP), and quality parameters of obtained surfaces. On the ground of comparative analysis of two methods of finishing treatment – two pass turning and burnishing with internal multi-roll burnisher are shown the technological and the performance advantages of using of finishing treatment of bronze bush bearings, based on burnishing processes.

Key words: accuracy, roughness, bronze bush bearings, finishing burnishing processes.

Эксплуатационные характеристики контактных поверхностей различных типов соединений в машиностроении находятся в прямой зависимости от параметров их качества. Очевидным является тот факт, что при присоединении поверхностей с более высокой степенью точности (меньшими полями допуска), меньшей шероховатостью (или шероховатостью с лучшими по форме, высоте и направлению неровностями с точки зрения трибологического контакта) и лучшими физико-механическими характеристиками (более высокая твердость, мелкая зернистая структура и остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое), они должны дать лучшие параметры контакта, более высокие износостойчивость и эксплуатационную надежность. Данное требование особенно необходимо с технологической точки зрения, когда одна из контактных поверхностей изготовлена из цветного металла (бронза, латунь и т.д.). Имеется в виду, что указанные выше цветные металлы или сплавы обеспечивают оптимальный трибологический контакт со стальными (или чугунными) контртелами, а классические схемы механической обработки, основанные на снятии стружки, не обеспечивают достижения эффективных значений их параметров качества после механической обработки.

Объектом настоящего исследования являются параметры качества и связанные с ними особенности трибологического контакта поршневого штока из стали 40X2H2MA (БДС 9802-74) с диаметром Ф45h6, движущегося в бронзовой втулке (CuSn7Zn4Pb6, БДС 10092-75) с диаметром Ф45H8, длиной 96 мм и толщиной стенки втулки 5 мм. Контактная пара вал - бронзовая втулка является элементом направляющих

выталкивающего механизма, работающего в установке по производству искусственного азотного удобрения (гранулята) в условиях Химического завода азотных удобрений – г. Девня. Относительное движение вала по отношению к втулке - линейное и возвратно-поступательное.

Необходимость экспериментальной оптимизации параметров качества контактной поверхности бронзовой втулки продиктована частыми авариями, вызванными застреванием или недопустимым увеличением зазора в подшипнике скольжения, приводящими к простоям в работе из-за необходимости замены изношенных втулок и потерям из-за перерыва в работе установки.

Целью настоящей работы является исследование возможности улучшения параметров качества внутренней (контактной) поверхности ведущей бронзовой втулки при выполнении ее завершающей обработки с помощью ППД. В настоящем исследовании мы заменяем окончательную обработку отверстия во втулке Ф 45Н8, выполняемую с помощью двукратной расточки, двукратной обработкой при помощи ППД (выполняемого одним двойным ходом, без регулирования натяга) при использовании развальцовывающего сепараторного многороликового инструмента, имеющегося на кафедре „ТМММ” ТУ – Варна. Выбор и расчет конструкции инструмента и его изготовление не являются объектом настоящего исследования, но они были сделаны с учетом его оптимальной работы [1, 2, 3, 6, 8].

Бронзовая втулка вступает в выполнение завершающей обработки в двух сравнительных экспериментах со следующими исходными данными:

- мы изготавливаем две серии по 20 втулок каждая (рис. 1), при этом подготавливаем соответствующим образом с помощью чистовой расточки внутренней поверхности втулок для обеих сравниваемых схем завершающей обработки;
- шероховатость поверхностей $Ra = 0,63 \mu m$;
- поверхностная твердость – $Hv = 140$;
- припуск на окончательную обработку составляет 0,8 мм перед двукратной расточкой и 0,14 мм перед ППД [1, 2, 3, 6, 8]. Чистовая расточка, предшествующая обработке поверхности, подлежащей завершающей обработке по двум сравниваемым схемам для

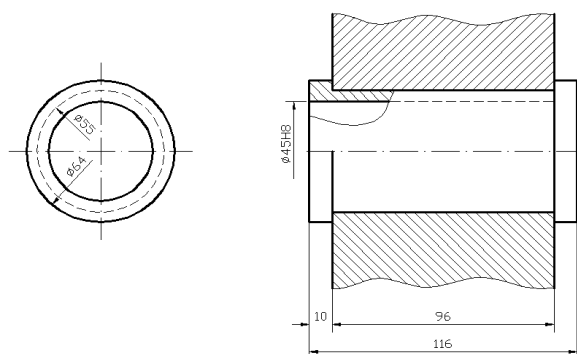


Рис.1. Рабочий эскиз бронзовой ведущей втулки, подлежащей механической обработке при помощи ППД

обеих серий по 20 втулок, производится на одной установке, чтобы обеспечить идентичность распределения размеров и отклонений от правильной геометрической формы (овальность и конусность) для всех обработанных поверхностей.

Анализ схемы завершающей обработки отверстия на основе ППД, реализованной с помощью много-роликового сепараторного инструмента, показывает, что на параметры качества обрабатываемой поверхности

больше всего влияют три режимных фактора – $i, \mu\text{m}$ - **натяг** контакта между диаметром инструмента и обрабатываемым отверстием;

$f, \text{mm/ob}$ – относительная скорость подачи прохода инструмента через сечение втулки в направлении оси и скорость пластической деформации, представленная как величина оборотов, которыми инструмент и обрабатываемая втулка вертятся по отношению друг к другу - $n, \text{ob/min}$) [1, 2, 3, 6, 8].

Экспериментальные исследования выполнялись в два этапа:

- **Первый этап** представляет собой однофакторную оптимизацию по схеме Гаусса-Зейделя с трехкратным повторением каждой экспериментальной точки [5, 7, 9]. Объектом исследования являются параметры качества отверстия бронзовой втулки: - шероховатость, измеренная по высотному критерию $Ra, \mu\text{m}$ (БДС [ISO] 4287/17, ISO 4288), и поверхностная твердость Hv . Мы последовательно изменяем натяг при ППД - $i, \mu\text{m}$, который равен разнице между размером настройки развальцовывающего инструмента и диаметром обрабатываемого отверстия. На основе данных аналогичным образом проведенных экспериментов [1, 2, 3, 6, 8] меняем натяг с $150 \mu\text{m}$ на $900 \mu\text{m}$ с шагом $150 \mu\text{m}$. Однофакторный эксперимент проводим при постоянном значении подачи, равном $0,75 \text{mm/ob}$. Обороты втулки равны 300ob/min .

По аналогичной схеме изменяется и подача инструмента по отношению к обрабатываемой втулке. Она меняется в границах от $0,2$ до $1,0 \text{mm/ob}$ с интервалом в $0,2 \text{mm/ob}$. При проведении этого второго однофакторного эксперимента схемы Гаусса-Зейделя, натяг принимает постоянное значение, равное локальному экстремуму, полученному для натяга из первого эксперимента, при этом обороты втулки остаются постоянными, без изменения и также равными 300ob/min .

В специализированной литературе утверждается, что скорость деформации при ППД незначительно влияет на изменение параметров качества обрабатываемой поверхности. Эти утверждения относятся скорее к ППД черных металлов [1, 2, 3, 6, 8]. Из-за нехватки информации о механизме ППД при обработке цветных металлов, в настоящую схему экспериментального исследования мы включаем и этот режимный фактор. Мы меняем обороты вращения (скорость относительного движения инструмента по отношению к обрабатываемой поверхности втулки) с 150 на 900ob/min . Согласно схеме Гаусса-Зейделя, постоянные значения натяга и подачи будут иметь те же значения этих режимных факторов, при которых параметры качества получают стоимости локальных экстремумов [5, 7, 9].

Экспериментальное исследование проводим на универсальном станке $\text{CU} - 502$, обрабатываемую втулку закрепляем в патроне, а деформирующий инструмент – на задней бабке. При такой схеме обработки сохраняется постоянная стабильность технологической системы во время обработки и во всех ее сечениях.

Измерения шероховатости и поверхностной твердости проведены с помощью профилометра-профилографа „Калибр 205” и прибора для измерения твердости „ZWICK 3202” по стандартным методикам – БДС [ISO] 4287/17, ISO 4288, БДС 5066-81 и БДС 13104-82.

Неравномерность интервалов изменения подачи инструмента и оборотов вращения заготовки (скорости деформации) с учетом особенностей их упорядочивания в металлорежущих машинах (в порядке степеней) аппроксимируются до равномерных интервалов для их удобного представления в файле среды Excell и параметризации экспериментальной зависимости.

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает следующее:

1. Зависимость $Ra, Hv = f(i)$. (табл.1 и рис.2)

Увеличение натяга i до 600 μm снижает пропорционально Ra с 1,12 до 0,16 μm , и в то же время увеличивает твердость Hv со 150 до 191 единицы. Следующее повышение i до 900 μm увеличивает Ra до 0,54 μm и снижает Hv до 184 единиц. Это объясняется увеличением контактного давления между инструментом и обрабатываемой поверхностью, которое до $i = 600 \mu\text{m}$ увеличивает степень смятия шероховатостей, а при более высоком значении перенаклепывает обрабатываемую поверхность, что ухудшает ее шероховатость и поверхностную твердость.

Таблица 1

Изменение шероховатости $-Ra$ и поверхностной твердости Hv при увеличении натяга при ППД

$i, \mu\text{m}$	150	300	450	600	750	900
$Ra, \mu\text{m}$	1,12	0,51	0,29	0,16	0,42	0,54
Hv	150	170	182	191	190	184

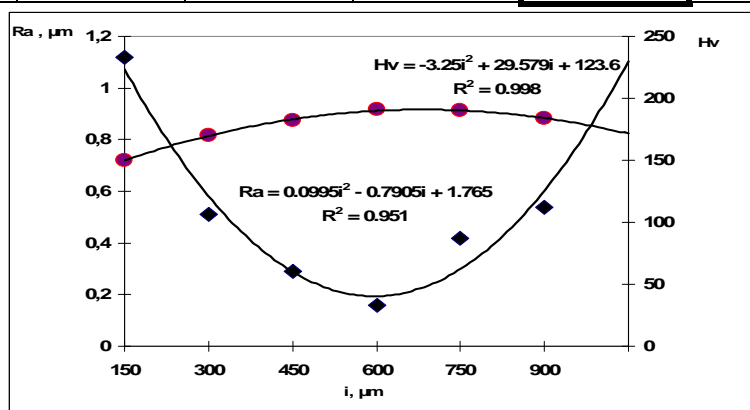


Рис.2 Изменение шероховатости $-Ra$ и поверхностной твердости Hv при увеличении натяга при ППД

2. Зависимость $Ra, Hv = f(f)$ (табл.2 и рис.3)

Увеличение f меняет кратность деформационного воздействия на обрабатываемую поверхность. Очевидно, что это связано с моментами, когда наклеп переходит в пренаклеп, что объясняет развитие показанных на рис.3 зависимостей. Видно, что обе зависимости получают оптимум при $f = 0,6 \text{ mm/ob}$.

Таблица 2.

Изменение шероховатости $-Ra$ и поверхностной твердости Hv при увеличении скорости подачи деформирующего инструмента при ППД

$f, \text{mm/ob}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$Ra, \mu\text{m}$	0,24	0,18	0,16	0,2	0,38	0,6
Hv	184	187	191	188	177	164

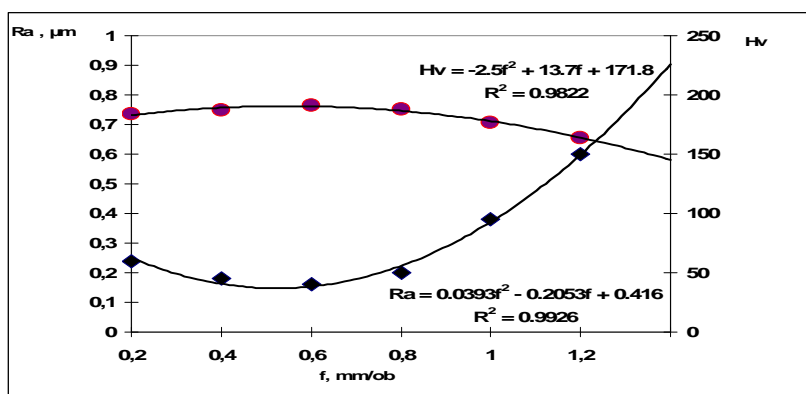


Рис.3. Изменение шероховатости $-Ra$ и поверхностной твердости Hv при увеличении скорости подачи деформирующего инструмента при ППД

3. Зависимость $Ra, Hv = f(n)$. (табл.3 и рис.4)

С увеличением скорости перемещения деформирующего элемента (оборотов развальцовывающего инструмента) степень деформации поверхностного слоя снижается, что ведет к ухудшению развития зависимостей $Ra, Hv = f(n)$.

Таблица 3

Изменение шероховатости $-Ra$ и поверхностной твердости Hv при увеличении оборотов деформирующего инструмента при ППД

$n, \text{ob/min}$	150	300	450	600	750	900
$Ra, \mu\text{m}$	0,14	0,16	0,16	0,19	0,28	0,35
Hv	192	191	188	186	180	175

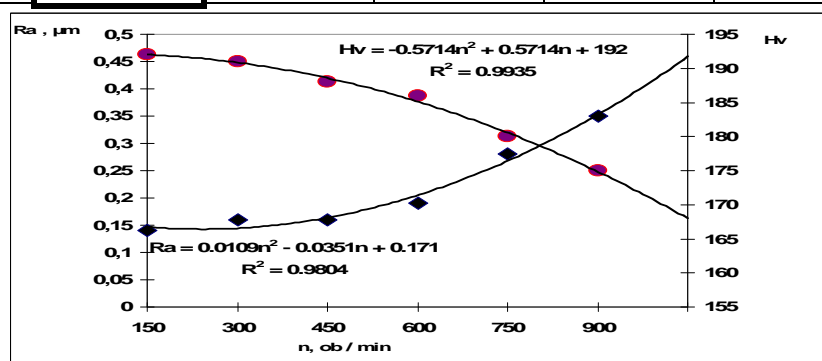


Рис.4. Изменение шероховатости $-Ra$ и поверхностной твердости Hv при увеличении оборотов деформирующего инструмента при ППД

Обобщая результаты первой серии экспериментов, мы утверждаем, что оптимальные параметры обрабатываемой при помощи ППД поверхности получаются при следующих значениях режимных факторов: натяг $i = 600 \mu\text{m}$, подача $f = 0,6 \text{ mm/ob}$ и обороты детали (инструмента) $n = 150 \text{ ob/min}$. При таких режимных факторах мы получаем шероховатость $Ra = 0,14 \mu\text{m}$ и твердость обработанной поверхности $Hv = 192$ единицы.

Для сравнения: поверхность, полученная при обработке с помощью двукратной расточки, имеет такую же шероховатость - $Ra = 0,14 \mu\text{m}$, но ее твердость не меняется после такой обработки и сохраняет свое значение 140 единиц.

Второй этап включает сравнительные исследования точностных характеристик поверхностей втулки, обработанных двумя методами завершающей обработки. Мы

статистически обрабатываем результаты измерений серии из 20 втулок, обработанных с помощью установленных оптимальных режимов завершающей механической обработки через ППД, а точностные распределения полученного номинального размера сравниваем с аналогично подобранными 20 втулками, обработанными двукратной расточкой. Измеряются номинальные размеры втулок и вычисляются статистические оценки распределений плотности вероятности по нормальному закону распределения номинальных размеров (рис. 5.), а также соответствующие распределения отклонений от правильной геометрической формы обработанных двумя сравниваемыми методами поверхностей – овальности (рис. 6) и конусности (рис. 7). Расчет численных значений характеристик распределений и их доверительных интервалов произведен при уровне значимости **0,05**. Проверены гипотезы относительно вида закона распределения - нормального для диаметров отверстий и закона абсолютного значения разницы для ошибки формы [4, 5, 7, 9].

Таблица 4

Статистически обработанные результаты распределений размеров бронзовой втулки, обработанной по двум технологиям, и ее отклонения от правильной геометрической формы – овальность и конусность

Вид обработки	Номинальный размер Граничные отклонения допуск. (толеранс)	\bar{X} Математическое отклонение, м	σ Среднеквадратичное отклонение, м	Поле рассеивания, м	Овальность, математическое отклонение, м	σ ов. среднеквадратичное отклонение, м	Поле рассеивания Овальность, м	Конусность, математическое отклонение, м	σ кон. среднеквадратичное отклонение, м	Поле рассеивания, Конусность, м
Двукратная расточка	$\phi 45,0\text{mm}$. ES=+39μ mEI=0 μm T=39 μm.	45,22	6,41	38,46	10,74	5,76	25,58	14,92	6,32	32,03
ППД с помощью развальцовки	$\phi 45,0\text{mm}$. ES=+39μ mEI=0 μm T=39 μm.	45,19	5,12	35,72	3,34	1,91	9,37	4,95	3,1	14,85

Полученные в результате обработки эмпирических данных аналитические распределения по нормальному закону - для диаметров отверстий, и закону абсолютного значения разницы для ошибок в их форме показаны на рисунках 5, 6 и 7 [4, 5, 7, 9]. Сравнительный анализ данных распределений при сравнении параметров двукратного растачивания и ППД показывает, что оба поля рассеивания меньше допуска. При этом обработка с помощью ППД рассеивает размеры отверстия в поле размером **35,72 μm**, а при двукратной расточке этот размер составляет **38,46 μm**.

Распределения, показанные на рисунки 5, 6, и 7 построены на основе данных, систематизированных в таблице 4.

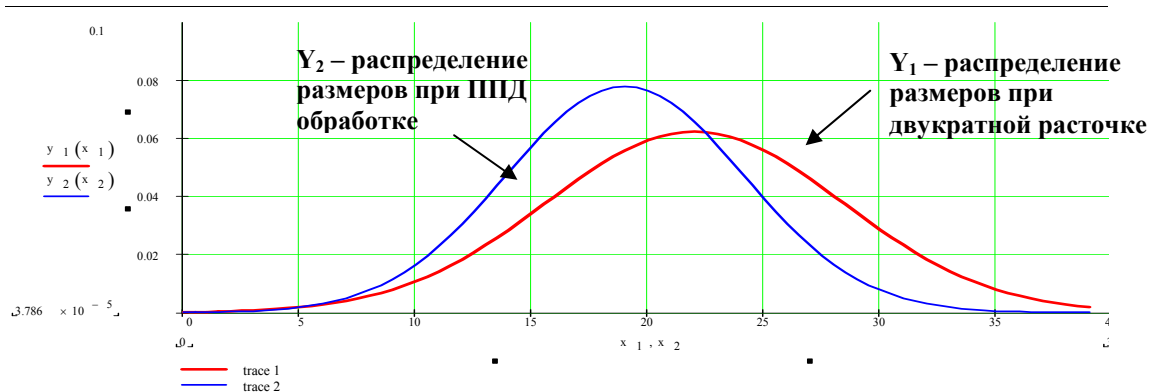


Рис. 5. Распределение плотности вероятностей по нормальному закону размеров отверстия втулки, обработанного с помощью: Y_1 – двукратной расточки, Y_2 – ППД обработки

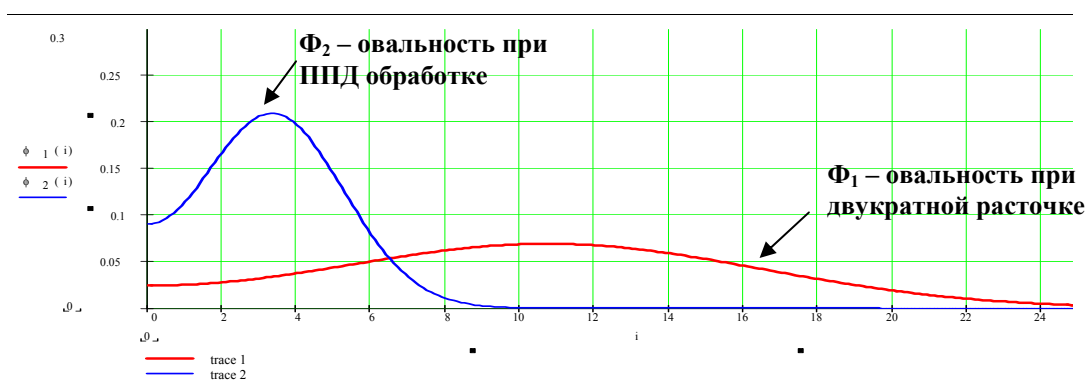


Рис. 6. Распределение плотности вероятностей по закону абсолютного значения разницы для овальности размеров отверстия втулки, обработанного с помощью: Φ_1 – двукратной расточки, Φ_2 – ППД обработки

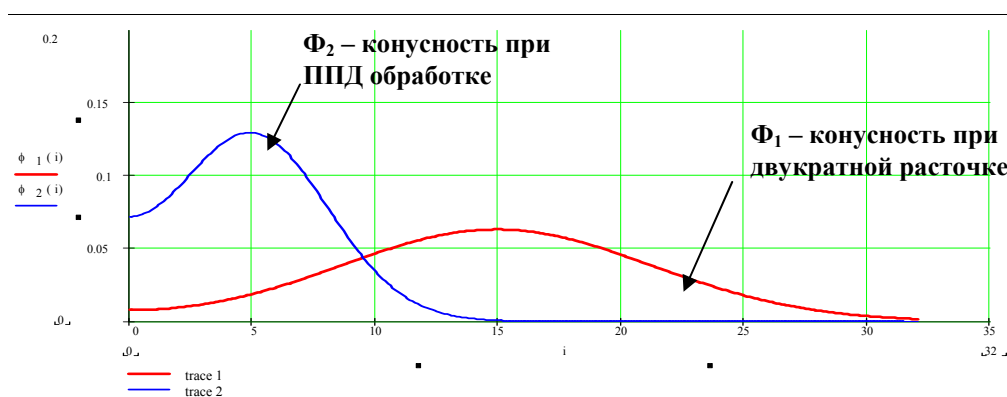


Рис. 7. Распределение плотности вероятностей по закону абсолютного значения разницы для конусности размеров отверстия втулки, обработанного при помощи: Φ_1 – двукратной расточки, Φ_2 – ППД обработки

Сравнение значений отклонений от правильной геометрической формы показывает, что обработка при помощи ППД **снижает** математическое ожидание значений овальности и конусности **примерно в 3 раза** по отношению к отверстиям, обработанным при помощи двукратной расточки (**10,74 μm . на 3,34 μm для овальности и 14,92 μm на 4,95 μm для конусности**). Приблизительно того же порядка и уменьшение полей рассеивания этих отклонений от правильной геометрической формы.

Это обеспечивает лучшие точностные параметры сборки с движением поршневого штока к бронзовой втулке, что ведет к оптимизации трибологического контакта, значительно повышая эксплуатационную надежность соединения.

Обобщая полученные результаты, мы можем сделать следующие выводы:

1. Замена двукратной расточки ППД обработкой значительно улучшает параметры качества обработанной поверхности.

1.1. Твердость обработанной поверхности увеличивается от 140 до 192.

1.2. Шероховатость, полученная в результате сравнения двух видов обработки, приблизительно одинакова - 0,14 μm , но форма неровностей при ППД обработке гарантирует лучший трибологический контакт [1, 2, 3, 6, 8].

1.3. Выполнение ППД обработки дает улучшенные **в три раза** характеристики отклонений от правильной геометрической формы (ошибки формы), что вместе с уменьшенным полем допуска получаемого размера обеспечивает лучшие точностные характеристики сборки вала и бронзовой втулки.

2. Обобщая выводы с 1.1. по 1.3., можно сделать заключение о том, что ППД обработка предлагает лучшие параметры качества контактной поверхности бронзовой втулки, что со своей стороны гарантирует также и лучшие эксплуатационные, а отсюда и лучшие экономические характеристики соединения.

3. Полученные выводы и обобщения, а также и доказанное улучшение параметров качества обработанных с помощью ППД поверхностей бронзовых подшипниковых втулок, служат основанием для рекомендаций к использованию данной обработки при их окончательной обработке.

Список литературы

1. Przybylski W. Technologia obróbki nagięciem. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1987. 560 стр.
2. Витлиев, Вл. Довършващо обработване чрез ротационно деформиране. "Техника" София, 1971. 273 стр.
3. Витлиев Вл., Теория и проектиране на инструменти за обработване чрез повърхностно ротационно обработване; дисерт. за придобиване на науч. ст. д-р на техн. науки. Русе 1987. 380 стр.
4. Дунин-Барковский Игор В.; Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Учебник для студ-тов машиностр. спец.; 2-е перераб. и доп. издание; М. "Машиностроение" 1975., 352 стр.
5. Даскалов В.Б.; Проектиране и контрол на технологическите процеси; "Техника" София, 1994; 440 стр.
6. Каледин Б.А., Чепа П.А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием. Минск, 1974. 250 стр.
7. Колкер Я.Д.; Математический анализ точности механической обработки деталей; "Техніка" Киев 1976.; 200 стр.
8. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием; Справочник, Москва, "Машиностроение" 1987. 328 стр.
9. Солонин И.С.; Математическая статистика в технологии машиностроения; М. "Машиностроение" 1972. 215 стр.