

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ВАЛОВ

*Кюрчев Сергей<sup>1</sup>, Пенев Олег<sup>1</sup>, Мирненко Юрий<sup>1</sup>, Станислав Сосновский<sup>2</sup>  
Таврический государственный агротехнологический университет  
Пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, Украина. E-mail: dec.tgatu@mail.ru*

*Sergii Kyurchev<sup>1</sup>, Oleh Penov<sup>1</sup>, Yurii Mirnenko<sup>1</sup>, Stanislaw Sosnowski<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Tavria State Agrotechnological University  
B. Khmelnytsky Avenue, 18, Melitopol, Ukraine. E-mail: dec.tgatu@mail.ru  
<sup>2</sup>Zheshov University  
St. Cviklinskiej, 2, Zheshov, Poland*

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы изменения качества поверхностного слоя валов при пластическом деформировании, которое происходит за счет обкатки валов с упрочнением поверхностного слоя вала. При обкатке в поверхностном слое происходит изменение физико-механических свойств металла. Поэтому изучалось влияние технологических режимов обработки на степень и глубину упрочнения, а также характер зоны распространения деформации. Обкатки следует проводить так, чтобы заданные результаты достигались за один проход. Не следует использовать обратный ход как рабочий ход, так как повторные проходы в противоположных направлениях могут привести к излишнему деформированию поверхностного слоя. Кроме того, рабочий профиль роликов обычно предназначен для работы только в одну сторону. Рекомендуемые режимы упрочняющей обработки предполагают возможную последующую механическую обработку деталей для получения заданной точности и шероховатости поверхности. Эффект обработки при снятии малых припусков снижается незначительно. Микрорельеф приработки поверхностей по сравнению с исходной характеризуется большей однородностью по высоте микронеровностей, повышенной опорной поверхностью, увеличенным числом пятен контакта с совмещенной поверхностью. Основными параметрами, определяющими качество упрочняющего слоя обкатки цилиндрических поверхностей, являются усилия обкатки  $P$ , которое, в свою очередь, зависит от диаметра ролика –  $D_p$ , профильного радиуса ролика –  $R_{пр}$  и величины продольной подачи –  $S$ . Максимальная глубина деформации (наклепанного слоя) до 3 мм наблюдается при минимальной продольной подаче инструмента (0,07 мм/об) и максимальном усилии обкатки (1100 Н). При осевой подаче 0,1 – 0,12 мм/об. диаметр ролика не влияет на глубину деформированного слоя. Проведенные опыты полностью подтвердили предпосылки по упрочнению поверхностного слоя с целью повышения механических свойств и снижения периода приработки сопряжения.

**Ключевые слова:** обработка пластическим деформированием, режимы обработки, инструмент для обкатки поверхностей, глубина деформированного

слоя, тепловой поток, шероховатость поверхности.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Развитие современной техники предъявляет все более высокие требования к качеству деталей машин: точности размеров и формы, физико-механическим свойствам и рельефу поверхности; к их эксплуатационным характеристикам: износостойкости, усталостной прочности, коррозионной стойкости, герметичности и тому подобные.

Надежность машин в значительной степени определяется состоянием и способностью поверхностного слоя их деталей, параметры которых, как правило, формируются на финишных операциях изготовления и определяются технологией производства.

Одним из наиболее перспективных методов повышения качества обработанной поверхности деталей машин при механообработке - есть отделочно-укрепляющая обработка поверхностно - пластической деформацией (ППД). В связи с этим очень актуальными являются исследования обработки пластическим деформированием с установлением оптимальных параметров обработки.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

По данным разных авторов, изнашиванию, в результате схватывания в условиях эксплуатации, поддаются детали подшипников скольжения, гидравлических цилиндров, шарнирных соединений и др. Известно, что в некоторых машинах и механизмах 10...40% изнашивание деталей связано с процессами схватывания. Явление схватывания сопрягаемых деталей машин, особенно в период приработки, поставило необходимость изыскания путей управления процессом схватывания металлов. Этой проблеме посвящены работы Ребиндера П.А. [3], Хворостухина Л. А. [19], Голего Н.Л. [2], Костецкого Б.И., Крагельского И.В. [15], Кузнецова В.Д., Чистосердова П. С. [17], Смелянского В.М. [10], Папшева Д.Д. [11].

Для изучения этого явления использовались разные методы и лабораторные установки.

Так Кузнецов В.Д. и Пащенко В.М. считают,

что при трении металлов, особенно при сухом трении, происходит явление молекулярного взаимодействия или прилипание поверхностей трения. Явление контактного схватывания при трении зависит от шероховатости поверхностей, от скорости взаимного перемещения, от температуры и ряда других условий. Они считают, что при больших скоростях трения схватывание возможно для всех металлов и сплавов.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Установление влияния обработки пластическим деформированием на качество и износостойкость поверхностного слоя детали с установлением оптимальных параметров обработки.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При обкатке в поверхностном слое происходит изменение физико-механических свойств металла. Поэтому изучалось влияние технологических режимов обработки на степень и глубину укрепления, а также характер зоны распространения деформации.

Протекание процесса изнашивания во времени характеризуется тремя основными фазами: приработочным (начальным), нормальным (установившимся), предельным (катастрофическим) износами. Установившийся износ тесно связан с процессом приработки, от условий приработки зависит износ периода эксплуатации.

Приработка определяет: величину общего износа (приработочный износ может составлять большую долю от общего износа), темп и размер нормального износа; образования таких дефектов, как задиры, вырыв с прирабатываемых поверхностей, а также схватывания, заедания в процессе износа; размещения и расход смазочных веществ; температуру в зоне трения. Для увеличения срока службы, как снова изготовленных, так и отремонтированных агрегатов, и машин в целом необходимо сократить величину начального износа сообщений в период приработки к минимуму.

Таким образом, приработка является важнейшим этапом для трущихся поверхностей, определяющих условия, характер работы деталей после приработки и длительность сохранения их рабочих функций. Приработка поверхности - это склонность поверхности к образованию в кратчайшие сроки с минимальным износом, без дефектов и схватывания, оптимального микрорельефа, что обеспечивает максимальную ее износостойкость.

Микрорельеф приработки поверхностей, по сравнению с исходной, характеризуется большей однородностью по высоте микронеровностей, повышенной опорной поверхностью, увеличенным числом пятен контакта с совмещенной поверхностью. Естественно, что одним из основных факторов, определяющих приработку поверхности, является ее микрорельеф и в первую очередь размеры, форма и величина опорной поверхности.

Из всех существующих видов финишной обработки только латунирование дает возможность создать поверхности с микрорельефом, отличающиеся большой опорной поверхностью при достаточной ее

маслоемкости и высокой степени однородности микронеровностей, а также возможность его тонкой регулировки [5].

Продолжительность приработки определялась временем от начала работы трущейся пары до момента перехода граничного трения в жидкостное на пару трения: ролик Окружная сектор (вкладыш). Для этой цели применялось специальное устройство, которое монтируется на токарно-винторезный станок 16К20 и содержит скалку с роликом, нагрузочный узел с кольцевым сектором и электрическую часть.

При работе оборудования ролик и кольцевой сектор, электрически связанные с сигнальным устройством (электролампочкой) и системой управления (электрочасы), испытывают трения в условиях обильной подачи смазочной жидкости в зону контакта испытуемых образцов. В начальный момент контакты исследуемых образцов электрической цепи сигнального и регистрирующего устройства закрыты, загорается электролампочка, и включаются электрочасы. В момент окончания приработки, когда опорные поверхности трущихся образцов настолько вырастут, что выходное давление окажется недостаточным, чтобы прорвать масляную пленку, контакт между ними нарушается, и выключается индикатор с электрочасами.

В качестве материала образцов пары трения во всех испытаниях использовалась конструкционная сталь 18ХГТ по ГОСТ 4543-81.

В качестве смазки применялось масло М-10-Г2 ГОСТ 8581-78.

Нагрузочный и скоростной режим для всех испытаний в соответствии с условиями работы гидроагрегатов.

Партии образцов, изготовленные по единой технологии, с размерами и параметрами шероховатости в пределах, установленных допуском, подвергались контрольному анализу. Определялась их твердость, микротвердость поверхностных слоев на глубину не менее 0,03 мм.

Результаты контрольного анализа заносились в протокол испытаний.

Смазка к месту контакта соединяемых тел подводилась по маслопроводу с активатора. В процессе износа измерялась величина износа с помощью индикаторного приспособления профилографа - профиломера. Профилограмма поверхности вала представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Профилограмма поверхности вала  
**Fig. 1.** The depth of roughness of the shaft surface

По этой профилограмме определялась величина износа вала, по которой рассчитывалась скорость износа поверхностей.

Выявление критических нагрузок схватывания проводилось ступенчатой нагрузкой образцов. Исходная нагрузка во всех случаях была 1,0 МПа. Интервал нагрузки составлял 0,5 МПа. Переход от одной удельной нагрузки к следующей проводился после стабилизации момента трения и температуры в зоне трения.

Обкатку следует проводить так, чтобы заданные результаты достигались за один проход. Не следует использовать обратный ход как рабочий ход, так как повторные проходы в противоположных направлениях могут привести к излишнему деформированию поверхностного слоя. Кроме того, рабочий профиль роликов обычно предназначен для работы только в одну сторону.

Скорость не оказывает заметного влияния на результаты обработки и выбирается с учетом требуемой производительности, конструктивных особенностей детали и оборудования. Обычно скорость составляет 30–150 м/мин.

Значение усилия обкатки выбирают в зависимости от цели обработки. Оптимальное усилие  $P_e$  (Н), соответствующее максимальному пределу выносливости, определяют по формуле:

$$P_e = 10(50 + D_o)^{2/6}, \quad (1)$$

где:  $D_o$  – диаметр укрепляющей поверхности детали.

При упрочняющей обработке необходимо повысить поверхностную твердость детали на 25 - 40%. Глубина  $h_n$  наклепанного слоя для крупных деталей должна находиться в пределах:

$$0,02R_o \leq h_n \leq 0,10R_o, \quad (2)$$

где:  $R_o$  – радиус укрепляющей поверхности детали.

Диапазон глубины возможного деформированного слоя в зависимости от диаметра обкатываемой поверхности представлен на рис. 2.

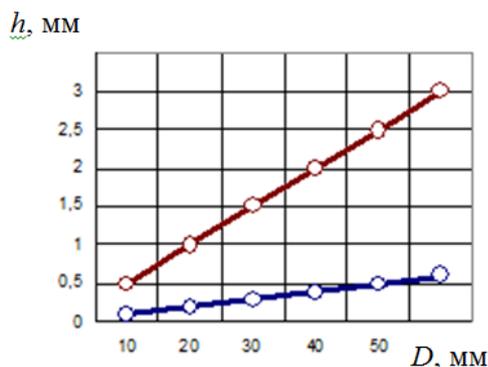


Рис. 2. Диапазон глубины возможного деформированного слоя в зависимости от диаметра обкатываемой поверхности

Fig. 2. The depth range of possible deformed layer, depending on the diameter and the driven around surface

Усилие  $P_n$ , которое обеспечивает получение наклепанного слоя глубиной  $h_n$ , определяют по формуле:

$$P_n = 2h_n^2 \sigma_m m^2, \quad (3)$$

где:  $\sigma_m$  – предел текучести материала детали;  $m$  – поправочный коэффициент, учитывающий кривизну контактирующих поверхностей:

$$m = 1 + 0,07 \left( \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{2}{D_p} + \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R}} \right), \quad (4)$$

где:  $R_n$  – профильный радиус ролика;  $D_p$  – диаметр ролика;  $R$  – радиус профиля детали в осевом сечении; для цилиндрической поверхности  $R = \infty$ .

Профильный радиус ролика принимают минимальным. При этом не должно происходить шелушения обрабатываемой поверхности детали.

Рабочее усилие обкатки обычно принимают:

$$l, 5P_{0,05} \leq P \leq 3,0P_{0,05}, \quad (5)$$

где:  $P_{0,05}$  – усилие, которое обеспечивает получение наклепанного слоя глубиной  $h_n = 0,05R_o$ .

Подачу при обкатке назначают не более 0,2–0,6 мм/об. При укреплении переходных поверхностей тяжелых валов используют ролики с профильным радиусом на 0,5–2,0 мм меньше радиуса  $R$  переходной поверхности; усилие обкатки  $P_e \approx (1000R \pm 1000)$  Н.

Рекомендуемые режимы упрочняющей обработки предполагают возможную последующую механическую обработку деталей для получения заданной точности и шероховатости поверхности. Эффект обработки при снятии малых припусков снижается незначительно.

При высоких требованиях к качеству поверхности и нецелесообразности снижения эффекта упрочнения поверхностного слоя, в результате снятия части упрочненного слоя, обработку поверхности ведут двумя роликами – упрочняющим и сглаживающим или применяют один или несколько одинаковых роликов с большим профильным радиусом.

Режимы обработки роликом с профильным радиусом определяют по номограмме. При известных  $D_p$ ,  $D_o$  и  $R_{np}$  находят по номограмме значение усилия, которое следует умножить на коэффициент, зависящий от твердости материала:

$$K_p = 0,01HB - 0,4, \quad (6)$$

где:  $HB$  – число твердости по Бринеллю;  $120 \leq HB \leq 340$ .

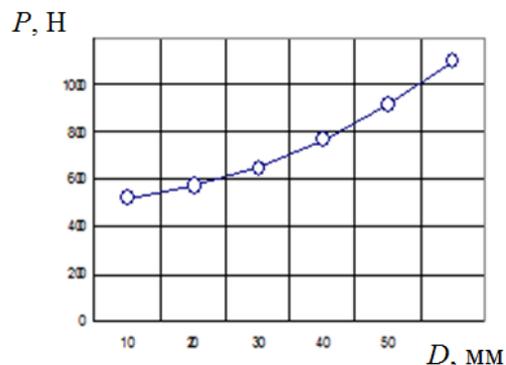
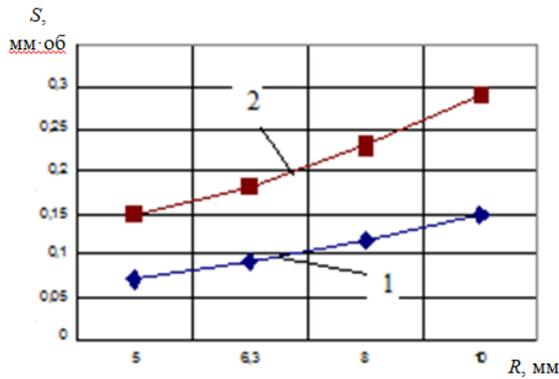


Рис. 3. Зависимость усилия обкатки  $P$  от диаметра обкатываемой поверхности  $D$

Fig. 3. The dependence of the running efforts  $R$  on the rolling surface diameter  $D$



**Рис. 4.** Зависимость продольной подачи ролика  $S$  от профильного радиуса ролика  $R$  при шероховатости поверхности после обкатки 1 –  $R_a = 0,2$ ; 2 –  $R_a = 0,8$

**Fig. 4.** Longitudinal feed roller  $S$  dependence on the core radius of the roller  $R$  as the roughness after running-in 1 –  $R_a = 0,2$ ; 2 –  $R_a = 0,8$

Для многоэлементных инструментов принимают подачу  $S = 0,1 \div 3,0$  мм/об. Оптимальная подача  $S_0$  на один оборот ролика не должна превышать 0,1–0,5 мм / об, на один оборот шарика – 0,01 – 0,05 мм / об. Подачу на один оборот детали (или инструмента) определяют по формуле:

$$S = kS_0 \quad (7)$$

При работе роликом с цилиндрическим пояском шириной  $b$  принимают подачу  $S_f = 0,3b$  мм/об для шероховатости с параметром  $R_a = 0,8$  мкм.

Найденное значение подачи корректируют с учетом поправочных коэффициентов.

С учетом требований шероховатости поверхности и профильного радиуса ролика находят величину подачи:

$$S = K_1 K_2 K_3 S_f \quad (8)$$

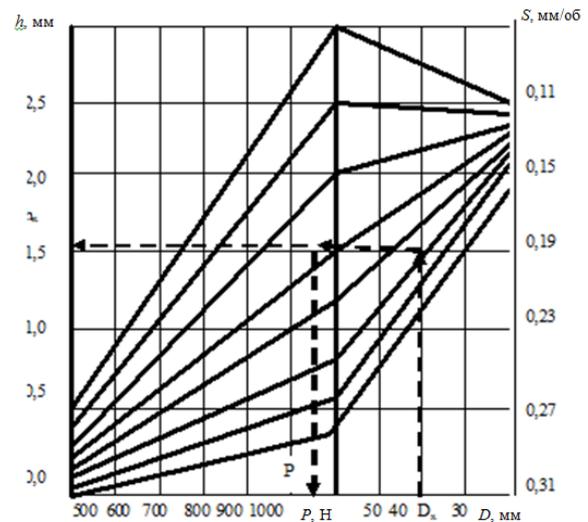
где:  $k$  – число деформирующих элементов;  $S_0$  – подача на один деформирующий элемент.

Обычно при раскатке и обкатке натяжение  $i \leq 0,03 \div 0,30$  мм с учетом исходной и требуемой шероховатости, точности и диаметра обрабатываемой поверхности, а также твердости инструмента.

Таким образом, основным параметром, определяющим качество укрепляющего слоя обкатки цилиндрических поверхностей, являются усилия обкатки  $P$ , которые, в свою очередь, зависят от диаметра ролика –  $D_p$ , профильного радиуса ролика –  $R_{np}$ , величины продольной подачи –  $S$ , глубины упрочненного слоя вала  $h$ , от усилия обкатки  $P$  и величины подачи  $S$  при диаметре ролика  $D = 60$  мм.

Проведя активный эксперимент по указанным параметрам и проверив на достоверность эксперимента, было получено уравнение регрессии, которое позволило построить номограмму влияния

Для практического применения полученных данных по оптимизации параметров обкатки вала с целью получения максимально укрепленного слоя, представлена номограмма рис. 5.



**Рис. 5.** Номограмма оптимизации параметров обкатывания вала с целью получения максимально упрочненного слоя поверхности вала:

Ключ –  $D_x \rightarrow S_x \rightarrow P_x \rightarrow h_x$

**Fig. 5.** Nomogram for optimization of shaft running-in parameters for the purpose to obtain the maximum hardened layer surface of the shaft:

Key –  $D_x \rightarrow S_x \rightarrow P_x \rightarrow h_x$

Полученная номограмма позволяет устанавливать требуемую глубину деформированного слоя, соответствующую технологическим требованиям конкретной поверхности детали, варьируя параметрами осевой подачи, усилием обкатки и диаметром ролика.

## ВЫВОДЫ

1. Основными параметрами, характеризующими процесс обкатки цилиндрических поверхностей являются: диаметр ролика –  $D_p$ , усилия обкатки –  $P$  и величина продольной подачи  $S$ .

2. Максимальная глубина деформации (наклепанного слоя) до 3 мм наблюдается при минимальной продольной подаче инструмента (0,07 мм/об) и максимальном усилии обкатки (1100 Н).

3. При осевой подаче 0,1–0,12 мм/об диаметр ролика не влияет на глубину деформированного слоя.

4. Проведенные эксперименты по оптимизации параметров процесса обкатки полностью подтвердили предпосылки по укреплению поверхностного слоя с целью повышения механических свойств и снижения периода приработки сопряжения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петруха П.Г. 1991.** Технология обработки конструкционных материалов. / Под ред. П.Г. Петрухи. – М.: Высш. Школа, 512.
2. **Голего Н.Л. 1970.** Повышение износостойкости и срока службы машин. / Н.Л. Голего, Б.П. Шелест. Вып.1. Киев, 51.
3. **Ребиндер П.А. 1972.** Поверхностные явления в твердых телах в процессе их деформации и разрушения. / П.А. Ребиндер, Е.Д. Щукин // Успехи физических наук, т. 108. В.1. 3–42.

4. Дроздов Ю.Н. 1975. К разработке методики расчета на изнашивание и моделирование трения // Износостойкость. – М.: Наука. 120-135.
5. Юдовинский В.Б. 2004. Сокращение периода приработки деталей сопряжений / В.Б. Юдовинский, В.В. Черкун // Труды ТДАТА. Выпуск 26. Мелитополь. 25-27. (Украина).
6. Анурьев В.И. 1979. Справочник конструктора машиностроителя / В.И. Анурьев – М.: Машиностроение, 559.
7. Гжиров Р.И. 1983. Краткий справочник конструктора / Р.И. Гжиров. – Л.: Машиностроение, 464.
8. Самохвалов В.К. 1985. Справочник технолога-конструктора / В.К. Самохвалов, С.Н. Левицкий – М.: Машиностроение, 592.
9. Абрамов В.П. 1983. Справочник по обработке металлов резанием. / В.П. Абрамов, К.В. Коваленко – Киев. «Техника», 239.
10. Самохвалов Я.А., 1978. Справочник техника-конструктора./ Я.А. Самохвалов, М.Я. Левицкий, В.Д. Григора – Киев: „Техника”, 592.
11. Смелянский В.М. 2002. Механика упрочнения деталей пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 300.
12. Папшев Д.Д. 1978. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 152.
13. Суслов А.Г. 1995. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 320.
14. Суслов Э.Д., Браун Н.А. Виткевич А.Г. 1995. Качество машин. Справочник в 2-х т. Т.1. М.: Машиностроение, 256.
15. Дальский А.И., Сусллова А.Г., Косилова Р.К. 2001. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.2. М.: Машиностроение, 944.
16. Крагельский И.В. 1968. Трение и износ. М.: Машиностроение, 480.
17. Михин Н.М. 1977. Внешнее трение твердых тел. М.: Машиностроение, 220.
18. Чистосердов П.С. 1975. Комбинированные инструменты для совмещения процессов резания и поверхностно-пластического деформирования. М.: НИИМаш., 45.
19. Чистосердов П.С., Жуковец Г.С. 1976. Комбинированные инструменты для обработки поверхностно-пластическим деформированием. М.: НИИФОРМ-ТЯЖМАШ, 59.
20. Хворостухин Л.А., Шишкин С.В., Ковалев И.П., Ишмаков Р.А. 1988. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М.: Машиностроение, 144.
21. Клещев Г., Коломиец Л. 2012. Продление «жизненного цикла» штампового инструмента – основной критерий интегрированной сквозной системы автоматизации проектирования штампов / Г. Клещев, Л. Коломиец // Сборник Международных научно-технических трудов MOTROL 2012. Том 14. No1. LUBLIN, Польша. 167-172.
22. Кольвашенко А., Купа Н., Морозов А. 2009. Исследование износа деталей шнеконапорного механизма пневмотранспор-тирующих машин / А. Кольвашенко, Н. Купа, А. Морозов // Сборник Международных научно-технических трудов. MOTROL 2009. Том 11В. LUBLIN. Польша. 98-103.

#### PARAMETERS OPTIMIZATION OF THE FINISHING WITH PLASTIC DEFORMATION OF THE SHAFTS

**Summary.** The article considers the issues affecting the quality of surface layer of shafts during plastic deformation, which occurs due to the running-in of shafts with hardened the surface layer of the shaft. During the running-in the surface layer there is a change in physic-mechanical properties of the metal. Therefore, we studied the impact of technological processing conditions on the extent and depth of strengthening, and the nature of the distribution zone of deformation. Running-in should be done so that the specified outcomes are achieved in a single pass. Do not use the return stroke as the stroke, since the repeated passages in opposite directions may lead to excessive deformation of the surface layer. In addition, a working profile of the roller is usually designed to work only in one direction. Recommended hardening treatment suggests a possible subsequent machining of parts to obtain specified accuracy and surface roughness. The effect of treatment when removing small allowances is slightly reduced. The micro relief of surface burnishing compared to the original is characterized by greater uniformity in the height of micro roughness, increased footprint, increased number of contact spots with a combined surface. The major parameters determining the quality firming the running-in cylindrical surfaces, are the efforts of the running –  $R$ , which depends on the roller diameter –  $DP$ , profile roller radius is  $R_{NP}$  and the value of the longitudinal feed –  $S$ . The maximum depth of deformation (work-hardened layer) up to 3 mm is observed at the minimum of the longitudinal feed of the tool (0,07 mm / Rev) and maximum running force (1100 N). When axial feed is 0,1 – 0,12 mm/rev the diameter of the roller does not affect the depth of the deformed layer. The experiments have fully confirmed the preconditions for strengthening the surface layer with the purpose of improving mechanical properties and reducing the initial break-in mate period.

**Key words:** plastic deformation processing, modes of processing, the tool for running surfaces, the depth of the deformed layer, heat flux, surface roughness.