

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ СИСТЕМИ ВЕРСТАТ-ІНСТРУМЕНТ-ДЕТАЛЬ ПРИ РЕМОНТІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Зубсхіна-Хайят О. В., Марченко Д. Д.

Миколаївський національний аграрний університет

З допомогою теоретичних і експериментальних досліджень показано, що з урахуванням жорсткості системи верстат-інструмент-деталь вдалося досягти оптимізації режимів обкатування і за рахунок цього розширити номенклатуру обкатування і розкатування деталей. Поверхнева пластична деформація за допомогою обкатування деталей роликками і кульками після обточування їх різцем або шліфування виконується для зниження шорсткості поверхні і зміцнення поверхневого шару. Зниження шорсткості, а також збільшення радіусів заокруглення вершин шорсткості, збільшення опорної поверхні призводять до підвищення зносостійкості деталей або поліпшення їхнього товарного вигляду. При зміцнюючому обкатуванні підвищується твердість поверхневого шару, в ньому крім того з'являються стискаючі напруження. Все це призводить до підвищення втомної міцності деталей. Основні режими обкатування – зусилля обкатування і подача ролика на кожен оборот деталі. Зусилля обкатування вибирається залежно від діаметра деталі, діаметра і профільного радіусу ролика і твердості обкатуємо матеріалу. Реалізація оптимального основного режиму обкатування (робочого зусилля) пов'язана з жорсткістю технологічної системи верстат-інструмент-деталь. У сенсі збереження оптимального режиму обкатування представляє небезпеку не стільки зниження жорсткості, скільки її мінливість. Тонкостінні втулки можна розкатувати голчастими роликками. При цьому пластична деформація локалізується в тонкому поверхневому шарі і роздача втулки мінімальна. Пристрої з голчастими роликками знайшли застосування при розкатуванні нежорстких втулок, коли довжина голчастих роликів перевищує ширину віддають перевагу катанню втулки. Тоді розкатування виконується без поздовжньої подачі пристрої. При виконанні поздовжньої подачі пристрою з голчастими роликками на обкатуванні поверхні виникає хвилястість з кроком подачі.

**Ключові слова:** жорсткість, надійність, поверхнєве пластичне деформування, роликки, розкатування отворів, ремонт машин, голчасті роликки, втулка, шорсткість.

### Вступ.

Підвищення якості та надійності машин і їх елементів є однією з важливих і першочергових завдань сучасного етапу розвитку вітчизняного машинобудування. Ця проблема може вирішуватися за допомогою розробки

і освоєння ефективних методів зміцнення деталей машин і підвищення працездатності. Пропонується метод поверхневого пластичного деформування для розкатування отворів деталей роликками як вид ремонту машин.

Зміна жорсткості і пластична текучість матеріалу втулок поблизу торців призводять до спотворення їх форми. Розглядаючи шорсткість поверхні як відхилення від номінальної форми деталі, можна говорити про розкатування роликками як про ефективний спосіб уточнення мікропрофілю деталей машин. У значно меншій мірі це відноситься до хвилястості, можливість зменшити яку залежить від співвідношення кроку хвилі і розмірів зони деформації. Хвиля з малим кроком усувається досить ефективно. Співвідношенням зони деформації з габаритними розмірами оброблюваної деталі визначається можливість уточнення її розмірів і форми в макрооб'ємі. Для деталей малих розмірів процес розкатування є процесом холодного формоутворення. Поверхнева пластична деформація за допомогою обкатування деталей роликками і кульками після обточування їх різцем або шліфування виконується для зниження шорсткості поверхні і зміцнення поверхневого шару.

### **Постановка проблеми**

В процесі експлуатації деталей (втулок) їхні робочі поверхні зношуються через процеси тертя та силові навантаження, втрачаються якісні показники та їх надійність, тому обладнання виходить з ладу. Поверхня втулок зношується, проте не відновлюється. Способи зміцнення деталей досить дорогі та складні, тому пропонується ефективний, в той же час економічно вигідний метод зміцнення втулок розкатуванням їх голчастими роликками, що буде сприяти підвищенню зносостійкості пар тертя, контактної і втомної міцності деталей. Метою статті є дослідження жорсткості системи «верстат-інструмент-деталь» процесу обкатування поверхонь та розкатування отворів голчастими роликками з метою розширення номенклатури деталей, які можуть обкатуватися циліндричними роликками та підвищити їх зносостійкість, надійність, продовжити строк служби деталей.

### **Результати досліджень**

Підвищення якості та надійності машин, їх елементів – одна із важливих і першочергових завдань сучасної стадії розвитку вітчизняного машинобудування. Ця проблема може бути вирішена за допомогою розробки ефективних методів ущільнення деталей машин і підвищення їх довговічності.

З метою підвищення зносостійкості пар тертя, контактної та втомної міцності деталей широко застосовується поверхнєве пластичне деформування обкатуванням їх роликками. Реалізація оптимального основного режиму обкатування (робочої сили) пов'язана із жорсткістю технологічної

системи верстат-інструмент-деталь. З ціллю збереження оптимального режиму обкатування представляє небезпеку не стільки зниження жорсткості, скільки її непостійність.

Постійність необхідного зусилля безпосередньо пов'язане із жорсткістю технологічної системи верстат - інструмент - деталь. Жорсткість системи, що складається з декількох складових, визначається по А.П. Соколовському:

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_1} + \frac{1}{j_2} + \frac{1}{j_3} + \dots \quad (1)$$

Одна з основних складових жорсткості системи - жорсткість верстата. На жорсткість металорізальних верстатів дуже впливає співвідношення складових зусилля різання. Співвідношення  $P_z : P_y : P_x$ , на яку розраховані універсальні металорізальні верстати, відрізняється найбільшим значенням  $P_z$ . При досить широких коливаннях зазначене співвідношення, в середньому характерне для процесу різання, становить 1: 0,4: 0,25.

На відміну від цього процес обкатування характеризується переважачим значенням  $P_y$  при незначній величині інших складових. У більшості конструкцій верстатів максимальна жорсткість досягається при відношенні  $P_y : P_z = 0.4$  і різко падає при його збільшенні [1].

У процесі обкатування ексцентричне закріплення деталі, радіальне биття роликів і інші похибки призводять до того, що система працює в коливальному режимі розвантаження - навантаження поблизу максимуму прикладеного навантаження. Завдання стабілізації зусилля обкатування в межах допустимих відхилень вирішується введенням в конструкцію обкатних пристроїв пружних елементів зниженої жорсткості.

Об'єднуючи у виразі (1) жорсткість верстата, деталі, кріпильних пристосувань загальним символом  $j_c$  і виділивши жорсткість інструменту для обкатування  $j_u$ , знайдемо жорсткість системи [2]:

$$j = \frac{j_c j_u}{j_c + j_u} \quad (2)$$

Розглянемо жорсткість системи інструмент - деталь на прикладі розкатування втулок. Уявімо втулку в процесі розкатування у вигляді тонкої циліндричної оболонки, шарнірно опертої на кінцях і навантаженої в середньому перетині радіальними складовими зусилля, рівномірно рознесеними по колу і доданими в точках контакту роликів. Такий випадок розглянутий у роботі П.П. Бейларда [3].

Диференціальні рівняння оболонки вирішуються методом розкладання переміщень і навантажень в подвійні ряди Фур'є. В результаті отримано вираз для радіального переміщення  $\omega$ , придатне для числових розрахунків (3):

$$\omega = \frac{12kl^3(1-\mu^2)P}{\pi h^3 E \rho} \left[ \sum_n (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{\sin \frac{n\pi}{l} x}{n^4 \pi^4 + 12(1+\mu^2)\alpha^4 \gamma^2} + \sum_m \sum_n (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{2(m^2 \alpha^2 + n^2 \pi^2)^2}{T} \cos(km)\varphi \sin \frac{n\pi}{l} x \right], \quad (3)$$

де  $P$  - радіальне зусилля на кожному ролику;  $k$  - кількість зусиль (роликів);  $E, \mu$  - модуль пружності і коефіцієнт Пуасона матеріалу розкатуваної втулки;  $\rho = |D|/2$ ,  $l, h$  - радіус, довжина і товщина стінки втулки;  $\alpha = 2l/|D|$ ;  $\gamma = |D|/2h$ ;  $x, \varphi$  - циліндричні координати;

$$T = (m^2 \alpha^2 + n^2 \pi^2)^4 + 12(1-\mu^2)n^4 \pi^4 \alpha^4 \gamma^2 - m^2 \alpha^4 \times \\ \times [2m^4 \alpha^4 + (6 + \mu - \mu^2)n^4 \pi^4 + (7 + \mu)m^2 \alpha^2 n^2 \pi^2].$$

Розрахунки виконані на ПК для циліндрів діаметром  $|D|=300$  мм з різними відношеннями радіуса до товщини стінки  $\gamma = |D|/2h$  і довжини до радіусу  $\alpha = 2l/|D|$ .

В результаті отримано вираз для радіального переміщення  $\omega$ , придатне для чисельних розрахунків [4].

Жорсткість металорізальних верстатів досліджувалася в лабораторії і на підприємстві за допомогою динамометрів і індикаторів. Жорсткість інструментів розраховувалася по залежностям теорії пружності, розрахунки перевірялися експериментально за допомогою динамометрів і індикаторів.

Прийняте при розрахунку шарнірне закріплення кінців оболонки з нескінченної жорсткістю в радіальному напрямку не може служити моделлю реального кріплення втулок при розкатуванні поблизу торців. З результатів розрахунку практичне значення мають прогини на достатньому віддаленні від кінців оболонки при великих значеннях.

Вважаючи, що при  $\gamma = 6,6$  вплив способу закріплення кінців на прогин в середині несуттєвий при будь-якій кількості сил, розраховуємо прогини і побудуємо графіки залежності відносної жорсткості від різної кількості радіальних зусиль в перетинах, віддалених від торців. Під жорсткістю при цьому розуміється зусилля, віднесене до радіального прогину оболонки в точці прикладання зусиль. Отримані графіки (рис. 1) показують, як жорсткість зростає при збільшенні товщини стінки і кількості докладених зусиль (кількості роликів розкатної пристрою).

Графіки 1-7, наведені на рис. 1, дозволяють визначити жорсткість втулок з найбільш поширеними діаметральними розмірами в перетинах, віддалених від торців. Поблизу торців жорсткість істотно знижується.

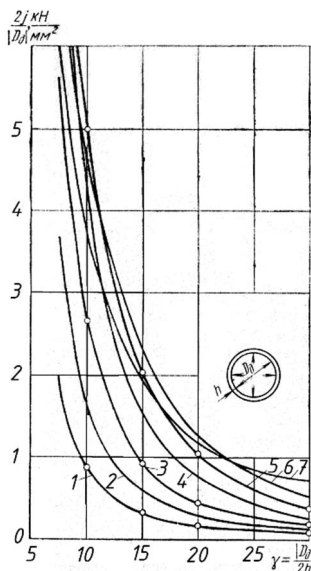


Рис. 1. Жорсткість втулок в перетинах, віддалених від торців при двох (1), трьох (2), чотирьох (3), шести (4), восьми (5), дванадцяти (6) і шістнадцяти (7) радіальних зусиллях.

По деформаціям і докладним зусиллям розраховувалася жорсткість втулок. Графіки зміни жорсткості по довжині втулок з різною товщиною стінки наведені на рис. 2. Графіки показують, що жорсткість поблизу торця при двухроlikовій схемі розкатування приблизно в 4 рази нижче жорсткості на глибині, що дорівнює діаметру, причому на всій цій довжині жорсткість підвищується в міру віддалення від торця. Збільшення кількості точок навантаження до 4 і тим більше до 8 скорочує перепад жорсткості до триразового і суттєво наближає до торця, в якому жорсткість стабілізується. Цікавим є повний збіг досліджуваних значень жорсткості, отриманих на глибині, що дорівнює діаметру втулки, з розрахунковими значеннями, для відповідних  $\gamma$  і кількості зусиль.

Необхідне для стабілізації робочого зусилля обкатування зниження жорсткості технологічної системи досягається застосуванням інструментів з пружними елементами [4].

Прогин від зусилля, що припадає на одиницю ширини пружної частини корпусу, визначається його відносними розмірами.

Висока радіальна жорсткість системи інструмент – деталь і, як наслідок цього, безпосередня залежність якості поверхні від невеликих змін натягу – серйозний недолік планетарних багатороликкових пристроїв. Створення практичної конструкції головок зниженою радіальною жорсткості з роликками прямолінійного профілю залишається актуальною проблемою, від вирішення якої залежить розширення номенклатури розкатуваних деталей.

Питання про підвищення точності, тобто про звуження поля допуску в результаті розкатування, пов'язане з можливістю регулювати робоче зусилля. Очевидно, що при малій жорсткості системи інструмент - деталь, необхідної для розкатування деталей роликками кругового профілю, коли для успішного проведення операції необхідно збереження зусилля в межах, обмежених допустимим кутом вдавлювання, можна говорити лише про збереження точності, отриманої на попередніх операціях. Щоб в результаті розкатування отримати уточнення розмірів деталей, необхідно використовувати схеми високої жорсткості, в яких зміна натягу за рахунок коливання розмірів заготовки викликало б помітну зміну зусилля і відповідне збільшення діаметра отвору. При цьому зазначена зміна зусилля не повинна призводити до зниження якості розкатуваної поверхні. Цій вимозі в найбільшій мірі задовольняє процес розкатування з каплевидною формою контакту роликів прямолінійного профілю. Постійний кут вдавнення таких роликів оберігає розкатувану поверхню від хвилястості і дозволяє отримувати необхідну якість поверхні в деякому діапазоні зусиль.

Пристроєм зниженою жорсткості для розкатування роликками отворів [1] неможливо отримати уточнення розміру отвору через малу жорсткість пружини. Пристрій для жорсткого розкатування отворів з допомогою конічних роликів, встановлених в сепараторі на конусній жорсткій оправці, не застосовується для розкатування тонкостінних деталей із-за їх надмірно великої роздачі [5, 6].

Для локалізації пластичної деформації в тонкому поверхневому шарі при розкатуванні втулок застосовуються пристрої для імпульсної ротаційної обробки роликками [7, 8]. На опорному конусі інструменту виконано непарна кількість плоских лисок. Конічні ролики, встановлені в сепараторі, в процесі обробки обертаються між поверхнею деталі і поверхнею кулачковою облямовування. Внаслідок виникнення сил тертя в місцях контакту ролики отримують переносний (планетарний) рух. Причому, обкатувавши виступи і западини кулачковою облямовування, вони роблять швидкі радіальні переміщення, удари, інтенсифікують процес пластичної деформації тонкого поверхневого шару матеріалу виробу. Удар ролика відбувається в момент його заклинювання між виступом облямовування і оброблюваною поверхнею. При знаходженні ролика на лисці натяг між інструментом і заготовкою мінімальний, в деяких конструкціях він дорівнює

нулю. Швидка зміна натягу в процесі обробки, що відбувається протягом приблизно  $10^{-3} - 10^{-4}$  сек, визначає пульсуюча зміна деформуючих зусиль.

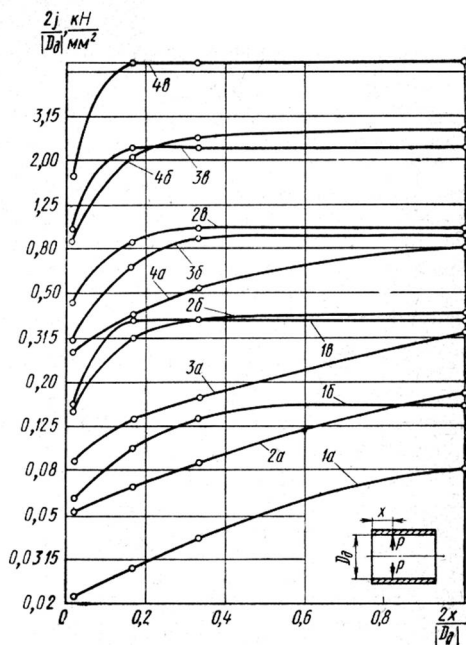


Рис. 2. Жорсткість втулок поблизу торців, навантажених двома (а), чотирма (б) і вісьмома зусиллями при (1), 20 (2), 15 (3), 10 (4)

Тонкостінні втулки можна розкатувати голчастими роликми [11]. При цьому пластична деформація також локалізується в тонкому поверхневому шарі і роздача втулки мінімальна. Пристрої з голчастими роликми знайшли застосування при розкатуванні нежорстких втулок, коли довжина голчастих роликів перевершує ширину розкатуваної втулки. Тоді розкатування здійснюється без поздовжньої подачі пристроєм. При здійсненні поздовжньої подачі пристроєм з голчастими роликми на обкатуваній поверхні з'являється хвилястість з кроком подачі. Закруглення передніх торців покупних голчастих роликів малого діаметра для виключення хвилястості на обкатаній поверхні - трудомістка операція, не вдається це закруглення виконати на всіх роликках однаково.

Нами запропоновано та розроблено ударний пристрій з гнучкими роликми для розкатування нежорстких втулок. Пристрій показано на рис. 3. Облямовування 1 має радіальні виступи, між якими розташовані голчасті

ролики 2, які утримуються з торців розпірними втулками 3 і 4, які підтискаються гайкою 5. Ролики між собою утримуються сепаратором 6. Новизна розробленого пристрою для чистової обробки нежорстких втулок полягає в тому, що на циліндричній поверхні облямовування виконано  $N$  радіальних виступів радіусом  $r = (20-55)d_{pe}$  в поздовжньому перетині облямовування, з кроком  $S = \frac{\pi \cdot d_{onp}}{N}$ , де  $d_{onp}$  - діаметр облямовування.

При підведенні пристрою до оброблюваної деталі 7 облямовування 1 підтискає ролики до оброблюваної деталі 7. При обертанні деталі зі швидкістю обкатування  $V_0$  за рахунок сили тертя деформуючі ролики разом із сепаратором 6 отримують переносний рух щодо кулачкового облямовування, при цьому ролики 2 отримують швидкий зворотньо-поступальний рух в радіальному напрямку і вдаряють об поверхню деталі, викликаючи пластичну деформацію, локалізуючи її в тонкому поверхневому шарі. Внаслідок цього не виникає об'ємна деформація деталі, що є великою перевагою при обробці отворів (рис. 2). Коли ролики потрапляють на радіальні виступи, виконані в поздовжньому перетині облямовування опуклим радіусом  $r = (20-55)d_{pe}$ , вони згинаються і на деталі виникає еліптичний відбиток. Краї роликів в роботі не беруть участь і на обкатаній поверхні хвилястість відсутня. Подача розкатування досягає до 1 мм на оборот деталі. Пристрій призначений для розкатування отворів під палець в поршнях двигуна ДЗ7-М.

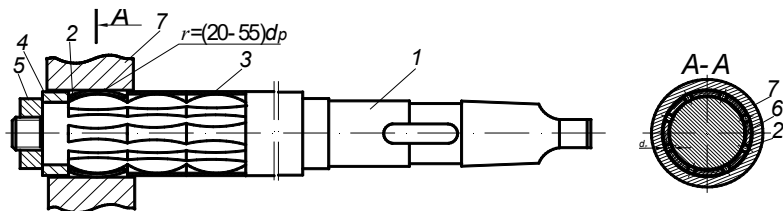


Рис. 3. Пристрій для розкатування нежорстких втулок гнучкими роликами

Розроблені технологія та пристрої для обкатування валів і розкатування отворів впроваджені у виробництво на ВАТ «Миколаївський глиноземний завод» [9-10].

### Висновки

За допомогою теоретичних і експериментальних досліджень показано, що за рахунок стабілізації зусилля обкатування, локалізації пластичної деформації в тонкому поверхневому шарі з урахуванням жорсткості системи верстат-інструмент-деталь вдалося досягти оптимальних режимів



обробки, що дозволяє розширити номенклатуру обкатуваних і розкатуваних деталей.

Тонкостінні втулки можна розкатувати голчастими роликами. При цьому пластична деформація локалізується в тонкому поверхневому шарі і роздача втулки мінімальна. Пристрої з голчастими роликами знайшли застосування при розкатуванні нежорстких втулок, коли довжина голчастих роликів перевищує ширину розкатуваної втулки. Тоді розкатування виконується без поздовжньої подачі пристрою. При виконанні поздовжньої подачі пристрою з голчастими роликами на обкатуваній поверхні виникає хвилястість з кроком подачі.

Нами запропоновано для розкатування нежорстких втулок ударний пристрій з гнучкими роликами. При використанні пристрою не виникає об'ємна деформація деталі, що є великою перевагою при обробці отворів.

Зміна жорсткості і пластична текучість матеріалу втулок поблизу торців призводять до спотворення їх форми. Спотворення форми осевого перерізу втулок спостерігається у всіх розкатаних зразків, причому у товстостінних втулок тим більше, чим товще стінка. Зовнішня поверхня деформувалася більше у втулок зі стінкою товщиною 10 мм. Спотворення форми тонкостінних деталей на краях запобігають зниженням зусиль (натягів), за рахунок зменшення діаметра роликів і деякого збільшення заднього кута вдавнення, що дозволяє локалізувати деформацію в більш тонкому поверхневому шарі. Збереженню форми втулок сприяє також збільшення кількості роликів розкатних голівок, що підвищує жорсткість системи.

### Список використаних джерел

1. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов. / Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев. – Киев: Наук. думка, 1995. – 256 с.
2. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин. / Э. В. Рыжов – М.: Машиностроение, 1968. –180 с.
3. Бейлард П. П. Напряжения от локальных нагрузок в цилиндрических сосудах давления. / П.П. Бейлард // Сб. Вопросы прочности цилиндрических оболочек. – М., Оборонгиз, 1960. – С. 43 – 65.
4. Бутаков Б.И Жесткость системы станок – инструмент - деталь при обкатывании деталей роликами. / Б.И. Бутаков, А.В. Зубехина. // Вісник аграрної науки Причорномор'я (випуск 4(47)).– Миколаїв: МДАУ, 2008. – С.193 – 205.
5. Шнейдер Ю.Г. Инструмент для чистовой обработки металлов давлением / Ю.Г. Шнейдер. – Л: Машиностроение, 1971. – 248 с

6. Азаревич Г.М. Размерно-чистовая обработка деталей машин пластическим деформированием взамен обработки резанием / Г.М. Азаревич, Г.Ш. Берштейн. – НииМаш. Технология обработки давлением. – 1965. – С. 134 – 159.
7. Коновалов Е.Г. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко. – Минск: Вышэйша школа, 1968. – 364 с.
8. Пшибыльский В.П. Технология поверхностной пластической обработки / В.П. Пшибыльский – М.: Металлургия, 1991. – 479 с.
9. Патент на корисну модель № 54685 Україна, МПК<sup>6</sup> В24В 39/00. Пристрій для ударного чистового розкатування отворів. / Бутаков Б.І., Артюх В.О., Зубехіна О.В.; заявник і патентовласник Бутаков Б.І. – № u 201003962; заявл. 06.04.2010; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.
10. Патент 101718 Україна МПК V24V 39/04 (2006.01), В21Н 3/00. Пристрій для обкатування крупних різьб і архімедових черв'яків роликми / Б.І. Бутаков, А.В. Зубехіна, заявник і патентовласник Б.І. Бутаков.; заявл. 18.07.2011, номер заявки: a201108944; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8, 2013.
11. Попов А. Аналіз характеристик контакту поверхонь з початковим лінійним і точечним дотиком / А. Попов // Motrol, Motoryzacja I energetykarolnictwa. – Lublin. 2015, VOL 17, No.2. – С. 9 –16.

## Abstract

### STUDYING THE STRENGTH OF THE SYSTEM MACHINE- A TOOL-DETAIL FOR REPLACEMENT OF DETAILS BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION METHOD

**Zubiekhina-Khaiiat A.V., Marchenko D.D.**

*With the help of theoretical and experimental studies it has been shown that, taking into account the rigidity of the machine-tool-part system, it was possible to achieve optimization of routing modes and, due to this, to expand the range of rolling and rolled parts. Surface plastic deformation by rolling parts by rollers and balls after cutting them with a cutter or grinding is performed to reduce the roughness of the surface and strengthen the surface layer. Reducing roughness, as well as increasing the radii of rounding the roots, increasing the support surface, leads to increased wear resistance of parts or improvement of their appearance. With hardening, the hardness of the surface layer rises, in addition there are compressive stresses. All this leads to an increase in the fatigue strength of the parts. The main robotic regimes are the roping and roller feed on every turn of the part. The roping effort is chosen depending on the*

*diameter of the part, the diameter and profile of the roller radius and the hardness of the material. Implementation of the optimal basic mode of rotation (labor force) is associated with the rigidity of the technological system of the machine-tool-detail. In the sense of preserving the optimal mode of rotation represents a danger not so much the reduction of stiffness, as its variability. Thin sleeves can be rolled up with needle rollers. In this case, the plastic deformation is localized in a thin surface layer and the distribution of the sleeve is minimal. Devices with needle rollers have been used for rolling non-rigid sleeves, when the length of the needle rollers exceeds the width, preferring to roll the bush. Then the roughing is performed without the longitudinal feed of the device. In the case of the longitudinal supply of the device with needle rollers on the rolled surface there is wavelength in the feed step. The change in stiffness and plastic flow of the material of the bushings near the ends lead to a distortion of their shape. Distortion of the shape of the axial section of the bushings is observed in all rolled specimens, the thicker the bushings the thicker the wall. The outer surface was more distorted by the bushings with a 10 mm thick wall. Distortions in the form of thin-walled parts at the edges are prevented by reducing the forces (interference), by reducing the diameter of the rollers and some increase in the rear angle of indentation, which allows localizing the deformation in a thinner surface layer. The preservation of the shape of the bushings is also facilitated by an increase in the number of rollers of the rolling heads, which increases the rigidity of the system.*

**Key words:** rigidity, reliability, surface plastic deformation, rollers, rolled openings, repair of machines, needle rollers, sleeve, roughness.