

МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ ТА ПРОДОВОЛЬСТВА
УКРАЇНИ

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра транспортних технологій і технічного сервісу

РЕМОНТ МАШИН

Методичні рекомендації для самостійного вивчення розділу
«Способи та технології поверхневого зміцнення деталей»
для студентів денної форми навчання спеціальностей 7.10010203,
8.10010203 «Процеси, машини та обладнання агропромислового
виробництва», 7.010104, 8.01010401 «Професійна освіта»

МИКОЛАЇВ

2012 р

УДК 621.787.4

Методичні рекомендації підготували:

Бутаков Б.І. професор

Зубехіна О.В. асистент

Марченко Д.Д. асистент

Відповідальний за випуск: завідувач кафедри ТТ і ТС д.т.н., професор Бутаков Б.І.

Рецензенти:

Тимошевський Б.Г. – д.т.н., професор, зав. кафедри «Двигуни внутрішнього згорання» НУК ім. адмірала Макарова.

Селезньов Ю.В. – д.т.н., професор кафедри «Трактори та сільськогосподарські машини» Миколаївського національного аграрного університету.

Ремонт машин: Методичні рекомендації для самостійного вивчення розділу «Способи та технології поверхневого зміцнення деталей» для студентів денної форми навчання спеціальностей 7.10010203, 8.10010203 «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва», 7.010104, 8.01010401 «Професійна освіта» / Уклад.: [Б.І. Бутаков, О.В. Зубехіна, Д.Д. Марченко] – Миколаїв: МНАУ, 2012

Друкується за рішенням методичної комісії факультету механізації с.г. МНАУ від «25» жовтня 2012 р., протокол № 2.

Надруковано в кількості 40 примірників

©Миколаївський державний аграрний університет

Зміст

	стор.
Вступ.....	4
Лекція 1. Стабілізація зусилля обкатування.....	5
Лекція 2. Обкатування роликами малого діаметра.....	14
Лекція 3. Обкатування огинанням роликами.....	22
Лекція 4. Глибина пластичної деформації.....	30
Лекція 5. Експериментальні методи визначення глибини пластичної деформації.....	44
Лекція 6. Мікроструктура зміцненого шару.....	58
Лекція 7. Підвищення зносостійкості пар тертя обкатуванням деталей роликами.....	65
Лекція 8. Жорсткість технологічної системи при обкатуванні роликами і точність обкатаних деталей.....	75
Лекція 9. Підвищення контактної міцності сталевих деталей обкатуванням роликами.....	90
Література.....	114

Вступ

В більшості випадків експлуатації руйнування деталей машин, устаткування, апаратів і елементів конструкцій починається з поверхні (зношування, утомленість, контактна взаємодія, дія середовищ та ін.). Тому у багатьох випадках надійність і довговічність виробів залежить від якості, міцності і структурно-напруженого стану металу поверхневих шарів деталей. При виготовленні і експлуатації деталей машин на їх поверхнях утворюються нерівності і мікронерівності, а шар металу, безпосередньо прилеглої до поверхні, має нерідко іншу структуру, фазовий і хімічний склад в порівнянні з серцевиною, в ньому, крім того, виникають залишкові напруги.

При відновленні металевих деталей сільськогосподарських машин відповідального призначення їх довговічність можна підвищити за допомогою поверхневої пластичної деформації (ППД) обкатуванням роликками. Для поліпшення зовнішнього товарного вигляду і підвищення зносостійкості поверхневого шару застосовується чистове ППД, а з метою підвищення втомної, контактної міцності деталей – зміцнююча обробка.

Поєднання чистового і зміцнюючого ППД значно підвищує ефективність зміцнення, оскільки одночасно забезпечується з одного боку отримання інтенсивного поверхневого наклепу із створенням на великій глибині залишкових стискуючих напруг, з другого боку досягнення низкою шорсткості поверхні. Поєднання чистового і зміцнюючого обкатування роликками створюється трьома способами:

- а) усуненням хвилястості поверхні при зміцнюючому обкатуванні стабілізацією зусилля на деформуючому ролику [1, 2];
- б) підвищенням ступеня пластичної деформації за рахунок застосування роликів малого діаметра [3];
- в) підвищенням ефективності деформації за допомогою способу обгинання роликками [3, 4].

Лекція 1. Стабілізація зусилля обкатування

1. Причина появи хвилястості при обкатуванні
2. Оригінальний метод усунення хвилястості установкою роликів на опорах кочення
3. Методика визначення оптимального зусилля обкатування
4. Пристрої для обкатування і розкочування деталей роликами із стабілізацією робочого зусилля

Для зміцнюючого обкатування металевих виробів крупних машин, коли при високому ступені пластичної деформації необхідна і істотна глибина її проникнення, найбільш широко застосовуються сферичні або тороподібні ролики і при великих кутах вдавлювання ролика у напрямі його подачі на обкатаній поверхні деталі з'являється хвилястість з кроком, відмінним від величини подачі.

Основною причиною появи хвилястості багато дослідників рахують наявність торцевого биття ролика, що приводить до змінної подачі обкатування. Для запобігання появи хвилястості при чистовому обкатуванні рекомендують приймати кут вдавлювання, значенням 2 - 30 (що, проте, обмежує шорсткість обкатаної поверхні величиною $40 < R_z < 160$ мкм), а для зменшення хвилястості – використовувати ролики з точним робочим профілем і частіше їх перешліфовувати. При зміцнюючому обкатуванні тонкий поверхневий шар для виключення хвилястості поверхні зшліфовують або сточують, це істотно зменшує ефективність зміцнення [5].

За допомогою універсального динамометра УДМ конструкції ВНІІ були зміряні складові зусилля P обкатування тороподібним роликом валів діаметром 100-200 мм з сталі 40 (200 HB) на токарному верстаті за допомогою пристрою, показаного на рис. 1. Ролик 1 встановлений через підшипники 8 на осі 9.

Зусилля пружини 3 через тягу 4, вісь 7 і важіль 2 передається на ролик 1 і прикладається до деталі. Важіль 2, встановлений на осі 11 за допомогою голчатого 6 і упірних 5 підшипників і легко обертається відносно корпусу 10. В пристрої замість підшипників кочення 5 і 6 можуть бути встановлені підшипники ковзання.

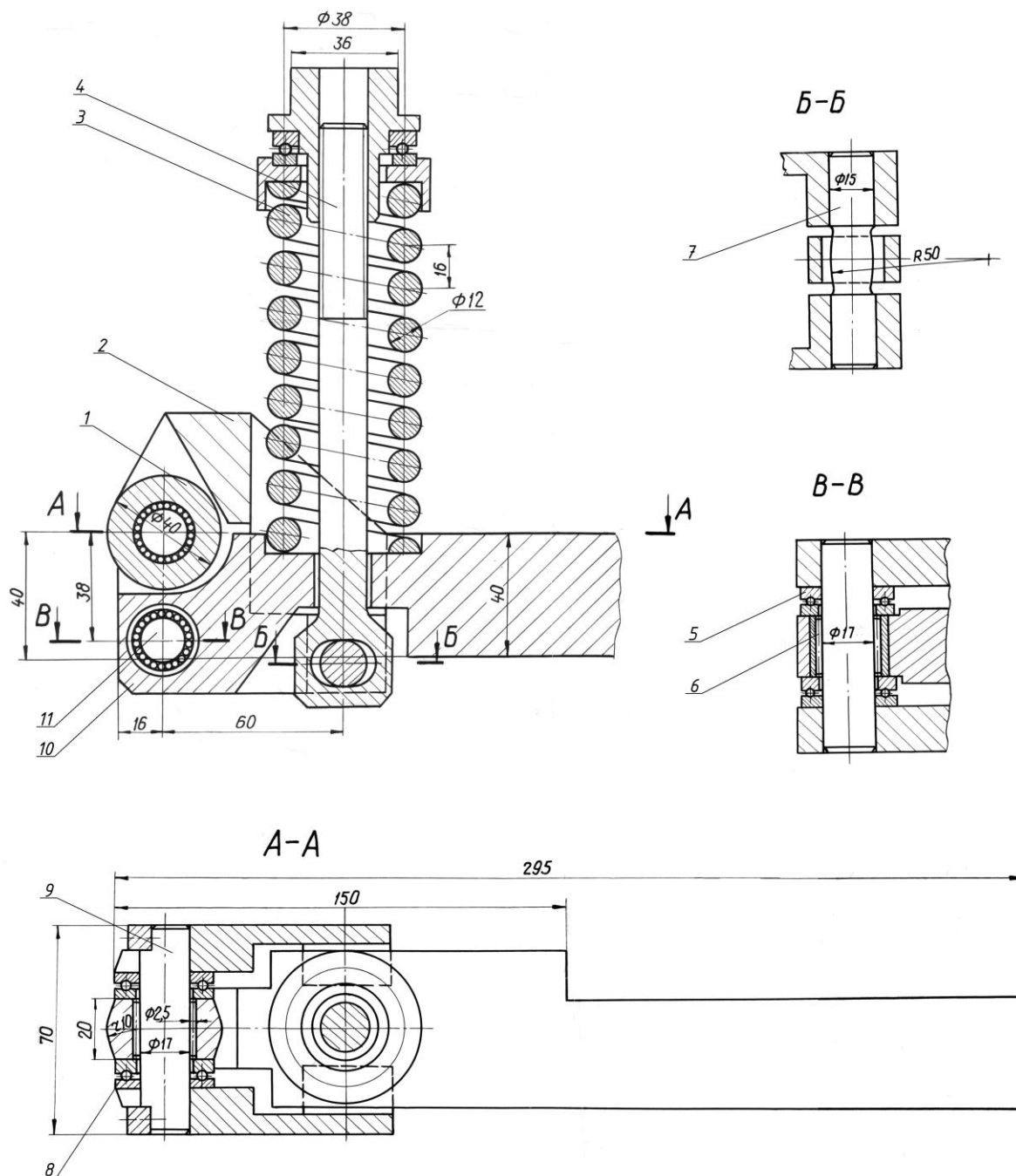


Рис. 1. Пристрій для обкатування деталей тороподібним роликом з стабілізацією зусилля обкатування

На рис. 2 показана осцилограма складових зусилля P , отримана при установці роликового вузла на опорах ковзання, тобто стосовно конструкції пристроїв, що використовуються на заводах для зміцнюючого або чистового обкатування сталевих деталей.

Номінальне значення зусилля підтиску ролика до деталі, $P_{yH} = 5$ кН, а співвідношення: $P_{xH} : P_{yH} : P_{zH} = 0,15 : 5 : 1,5$. Сила P_x в процесі обкатування залишається практично постійною, а сили P_y і P_z з кожним обертом ролика періодично змінюються; амплітуда коливання сили P_y складає $\Delta P_y = 0,45 P_{yH}$, а сила P_z (у напрямі подачі) змінюється менш помітно.

При установці роликового вузла на підшипниках кочення, як показали вимірювання, $\Delta P_y \leq 0,03 P_{yH}$, а коливання сил P_x і P_y практично не знайдені. Коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання складає $f_c = 0,05 \dots 0,1$, а в підшипниках кочення $f_k = 0,003 \dots 0,008$, тому стабілізація

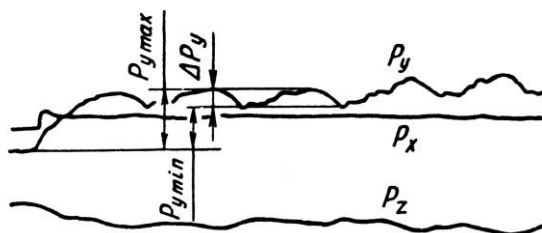


Рис.2. Осцилограма складових зусилля P обкатування: P_x – дотичне зусилля кочення ролика; P_y – нормальне зусилля підтиску ролика до деталі; P_z – зусилля подачі

сили P при установці роликового вузла на підшипниках кочення досягається істотним зменшенням сил тертя в опорах. Сили тертя в опорах, складаючись з робочим зусиллям пружного елемента пристрою обкату, впливають на величину зусилля P обкатування; за наявності ж радіального биття ролика сили тертя в процесі обкатування стають змінними по величині і напрямку. Це дозволило припустити, що основною причиною появи хвилястості є наявність коливання зусилля P

обкатування при кожному оберті ролика в результаті його радіального биття [2]. Розрахуємо крок хвилі S_w при некратних відносинах D_∂/D_p , де D_∂ , D_p відповідно діаметри деталі і ролика. Крапками на розгортці сліду ролика при коченні його по деталі відзначені місця максимального значення зусилля P (Рис.3).

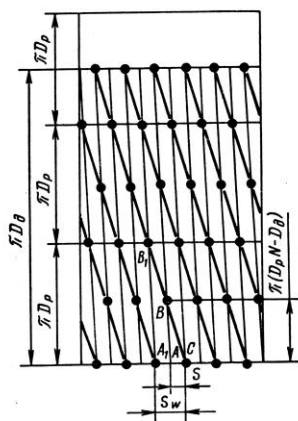


Рис. 3. Схема розрахунку кроку S_w хвилі при обкатуванні роликами

поверхневого шару деталі виходить більший, ніж в проміжках між ними, ніж і визначається поява хвилястості.

З подібності трикутників ABC і $A_1 B_1 C$ отримаємо

$$S_w = D_p S / (D_p N - D_\partial), \quad (1)$$

де: $N = D_\partial/D_p + 1$ (тут D_∂/D_p - ціла частина відношення).

Даний вираз справедливо для випадку, що виключає прослизання ролика по деталі при їх взаємному обертанні, за наявності ковзання фактичний крок хвилі може значно відрізнятися від розрахункового. Розворотом осі ролика навкруги перпендикуляра до поверхні контакту в ту або іншу сторону можна змінити ступінь прослизання ролика і тим самим вплинути на величину S_w .

Стабілізуючи за допомогою установки роликового вузла на підшипниках кочення зусилля P , можна виключити появу хвилястості при великих кутах вдавлювання, які властиві навіть зміцнюючому обкатуванню. При цьому вдається отримати шорсткість поверхні $R_a = 0,08 - 0,32$ мкм при початковій $R_z = 80 - 160$ мкм, і крім того, сумістити

чистове і зміцнююче обкатування. Представлені на рис. 4 профілограми поверхні валу із сталі 20, *HB140*, до обкатування і після обкатування при $P_{yn} = 5$ кН, $S = 0,2$ мм/об деталі, $D_p = 60$ мм, свідчать про ефективність установки роликового вузла на підшипниках кочення. На кривій 3 спостерігається хвилястість на обкатаній поверхні з кроком $S_w = 3,9$ мм, що відповідає значенню S_w . Для розрахунку основного режиму обкатування – зусилля в контактi ролика з деталлю з урахуванням рівняння Мейера, що зв'язує при вимірюванні твердості силу вдавлювання кульки з діаметром відбитка, застосуємо залежність:

$$P = 4 m D_{ш}^{n-2} \sin^{n-2} \varphi a b, \quad (2)$$

де: m і n - константи Мейера, відповідно залежні від діаметра кульки $D_{ш}$, властивостей оброблюваного матеріалу і від здібності матеріалу до наклепу; a і b – напівосі еліпса контакту ролика з деталлю уздовж осі ролика у напрямі нього кочення; φ - середній кут вдавлювання ролика в деталь.

$$\varphi = (\varphi_a + \varphi_b) / 2. \quad (3)$$

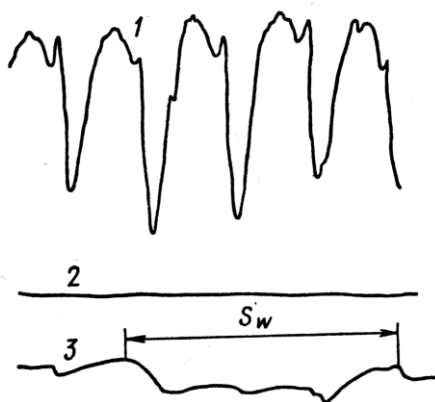


Рис. 4. Профілограми поверхні валу:

1 – до обкатування ($R_z = 100$ мкм); 2 – після обкатування при установці роликового вузла на підшипниках кочення ($R_a = 0,08 \div 0,16$ мкм); 3 – після обкатування при установці роликового вузла на підшипниках ковзання ($R_z = 16$ мкм)

З метою перевірки можливості застосування залежності (3) як умова подібності при розрахунку середнього тиску в значно витягнутих відбитках, тобто коли $a \gg b$, на пресі Брінеля з різними зусиллями в

сталеві зразки вдавлювали кульки, а також бочкоподібні, тороподібні і циліндрові ролики; за розмірами їх відбитків, зміряних на інструментальному мікроскопі з точністю 5 мкм, розраховували середній тиск P в МПа. Це значення, помножене для кругових відбитків на 10^3 є твердістю $НМ$. Залежність $НМ$ від кута φ (в інтервалі від 2 до 25 градусів) для сталей різної твердості апроксимували залежністю $НМ = \gamma e^{\beta_1 \varphi} \varphi^{\beta_2}$, де e – підстава натуральних логарифмів; значення γ, β_1, β_2 приведені нижче:

$НВ \dots$	128	176	202	341
$\gamma, НМ/град.$	33,4	56,7	86,7	190,2
$\beta_1, 1/град.$	-0,0137	-0,0137	-0,017	- 0,019
β_2	0,53	0,49	0,42	0,21.

Значення P в МПа, помножене на 10^3 для бочкоподібних і циліндрових роликів, обчислене при різних кутах, відхиляється від числа $НМ$ не більш, ніж на 7%. Це дозволило при розрахунку зусилля P по залежності (2) для випадку обкатування бочкоподібними, тороподібним і циліндричними роликами як умова подібності прийняти постійність кута φ . При обкатуванні деталей бочкоподібними роликами малого діаметра, що дають витягнуті відбитки і малі кути φ_a , а також тороподібними роликами, з установкою роликових вузлів на підшипниках кочення, зусилля P , щоб уникнути лущення обкатаної поверхні в результаті перенаклепу, повинне бути обмежено кутом $\varphi = 5^\circ$. При цьому у міру витягання відбитків кут вдавлювання у напрямі кочення ролика прагне $\varphi_b = 10^\circ$.

На рис. 5 приведена номограма, побудована по залежності (2), для визначення зусилля обкатування деталей із сталі 20 (P_{20}) по заданих профільному радіусу ролика r_p , його діаметру D_p і діаметру деталі D_d . В лівій частині номограми побудовано сімейство кривих, що є залежністю подвоєного приведенного радіусу кривизни ($2R_{np}$) в площині кочення ролика від діаметра ролика і деталі (D_p і D_d),

роликів малого діаметра) хвилястість на обкатаній поверхні не з'являється при $\varphi = 5^0$ і при роботі пристроями з установкою роликів вузлів на опорах ковзання, оскільки переважно деформація поверхневого шару виявляється в площині кочення ролика; в цьому випадку зусилля обкатування слід вибирати по кривих $P_{20}(5)$. При $b/a > 1$ (застосування тороподібних роликів) є небезпека виникнення хвилястості обкатаної поверхні при зміцнюючому обкатуванні із застосуванням великих кутів вдавлювання роликів. В цьому випадку необхідно встановлювати роликові вузли на опори кочення, а при чистовому обкатуванні – обмежувати зусилля P_{20} кутом $\varphi_a = 2,5^0$

На рис. 5 показаний приклад вибору зусилля P_{20} для розкочування в сталевій деталі отвору діаметром $D_o = 100$ мм роликом діаметром $D_p = 40$ мм, роликом з профільним радіусом $r_p = 8$ мм. Отримане побудовою рішення (крапка А) означає, що у разі застосування пристрою з роликовим вузлом на опорах ковзання при обмеженні ефекту зміцнення через небезпеку появи хвилястості на обкатаній поверхні зусилля $P_{20}(2,5) = 0,5$ кН обмежено кутом $\varphi_a = 2,5^0$; у випадку ж застосування пристрою з роликовим вузлом на підшипниках кочення з метою поєднання чистового і зміцнюючого обкатування $P_{20}(5) = 5$ кН, середній кут вдавлювання ролика $\varphi = 5^0$. При обкатуванні деталей підвищеної твердості зусилля P_{20} необхідно помножити на коефіцієнт твердості K_P , введений В.М. Браславским [5], залежно від твердості НВ.

НВ 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340 360 380 400

КР 0,8 1 1,25 1,5 1,7 1,95 2,2 2,45 2,7 3 3,3 3,6 4,0 4,4 4,5.

Пристрій для розкочування отворів діаметром 115 – 125 мм, в якому роликові вузли встановлені на опори кочення, показано на мал. 6 [6].

Воно складається з корпусу 1, в пазу якого на осях 2 і опорах кочення 3, 4 встановлені важелі 5, на їх циліндрових цапфах встановлені ролики 6, що обкатують. На кінцях важелів 5 закріплені клинові повзуни 7, з пазами пружнього кільця 8. В різьбове розточування корпусу 1

укрутують стакан 9 і закріплений гайкою 10. В стакан 9 вставлена пружина 11, інший кінець якої встановлений на виточці втулки 12,

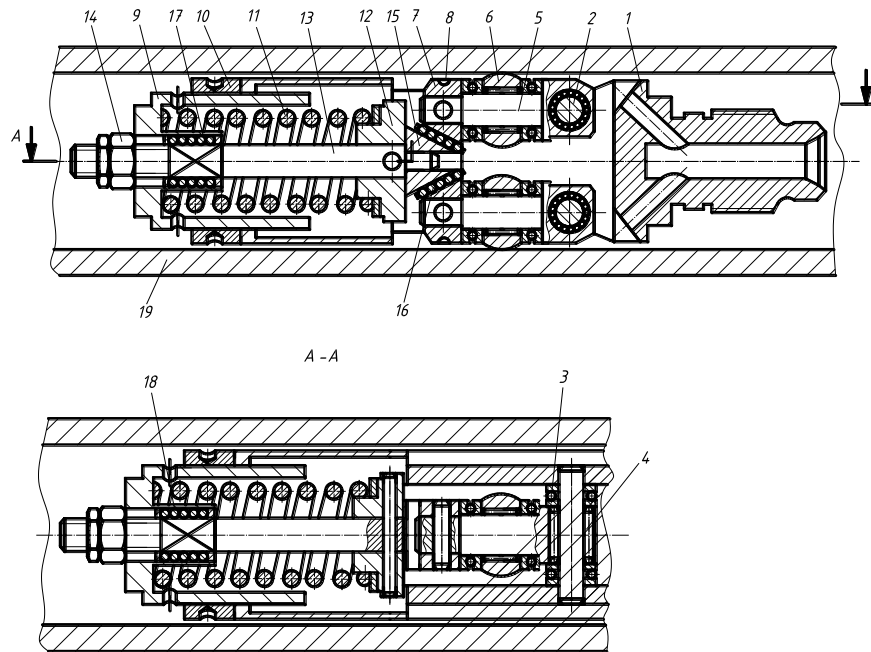


Рис. 6. Пристрій для чистового і зміцнюючого розкочування роликами глибоких отворів діаметром 115-125 мм

закріпленої на осі 13. На різьбовій ділянці осі 13 навернена гайка 14, а поряд з втулкою 12 напресований клин 15. Між клином 15 і клиновими повзунами 7 встановлені касети 16 з циліндровими роликами, а між стаканами 9 і віссю 13 – касети 17 і 18. Ролики 6 підібгані до розкочуваної деталі 19. Спеціальним різьбленням на корпусі 1 пристрій укручується в борштангу верстата глибокого свердлення. Обертанням стакана 9 встановлюється висота пружини 11, яка визначається робочим зусиллям на роликах якими обкатують 6, яке у свою чергу знаходиться по номограмі (див. рис.5). Діаметр по роликах 6, прийнятий на 2 мм більшим діаметра отвору розкочуваної деталі 19, встановлюється обертанням гайки 14. У момент торкання роликів 6, розкочуваної деталі 19, ролики віджимаються від деталі на величину натягу, що забезпечує їх навантаження в процесі радіального биття профілю роликів, таким чином компенсується биття деталі і зміни діаметра її отвору в межах

поля допуску по довжині деталі. При цьому за рахунок повороту важелів 5 на опорах кочення 3 і 4 в напрямі від деталі клин 15 разом з втулкою 12 і віссю 13 зсовуються вліво і між торцями втулки 9 і гайки 14 утворюється зазор, що забезпечує передачу зусилля пружини 11 на ролики 6. Після цього включається подача борштанги верстата на кожний оборот деталі і здійснюється процес розкочування отвору.

За рахунок малих сил тертя в опорах кочення 3, 4, 16, 17, 18 коливання зусилля обкатування більш ніж на порядок менше, ніж в опорах ковзання, що дозволяє уникнути появи хвилястості на розкочуваній поверхні при великих кутах вдавлювання роликів ($\varphi = 5^0$). При цьому досягається параметр шорсткості поверхні $0,08 < R_a < 0,32$ мкм при початковій $R_z = 10-20$ мкм і здійснюється суміщене чистове і зміцнююче розкочування. Крім того, розкочування довгих тонкостінних труб за допомогою цього пристрою за рахунок стабілізації зусилля розкочування не приводить до викривлення осі отвору.

Контрольні питання:

1. Яке співвідношення складових зусилля обкатування?
2. Яка причина появи хвилястості на обкатаній поверхні?
3. За рахунок чого досягається стабілізація зусилля обкатування при кожному оберті ролика?
4. Від яких параметрів пристрою і обкатуємої деталі залежить зусилля обкатування?
5. Як працює пристрій для розкатування отворів тороподібними роликами?

Лекція 2. Обкатування роликами малого діаметра

1. Інтенсифікація пластичної деформації за рахунок зменшення діаметра ролика

2. Пристрій для обкатування наплавлених поверхонь бочкоподібним роликом
3. Пристрій для отримання регулярного мікрорельєфу обкатуванням голчатими роликами
4. Пристрій для обкатування бічних поверхонь канавок голчатими роликами

Збільшення профільного радіусу ролика – один з шляхів підвищення продуктивності обкатування. Проте збільшення радіусу спричиняє за собою зростання робочого зусилля (див. рис. 5). Величина зусилля, що допускається, як правило, обмежується жорсткістю металоріжучих верстатів і оброблюваних деталей. Крім того, реалізація великих робочих зусиль вимагає застосування складних і важких пристроїв обкату. Все це призводить до того, що збільшення P при збереженні решти параметрів процесу обкатування дозволяє підвищувати продуктивність лише в дуже вузьких межах. Додаткові можливості збільшення ступеня пластичної деформації при малих φ_a , що запобігає появі хвилястості і з опорами ковзання, відкриває зменшення діаметра ролика. Діаметр ролика не визначає безпосередньо величину подовжньої подачі при обкатуванні, проте від діаметра залежить робоче зусилля. При зменшенні діаметра ролика зменшується розмір відбитка, інакше кажучи, при даному зусиллі обкатування, що допускається, із зменшенням діаметра ролика може бути збільшений його профільний радіус, а, отже, збільшена подача, і, тим самим, підвищена продуктивність. Звичайно вживані для чистового обкатування ролики кругового профілю мають відношення радіусів кривизни осьового і поперечного перетинів в діапазоні 2 - 0,5. Відбитки цих роликів на циліндрових деталях мають форму еліпсів із співвідношенням осей від 0,45 до 2,5. Ролики малого діаметра мають відношення радіусів кривизни іншого порядку. Для ролика діаметром 12,5 мм з профільним радіусом 600 мм це відношення складає осей 0,25 – 0,05. Умови деформації поверхневого шару деталі під такими

роликами значно відрізняються від умов звичайного обкатування. У міру збільшення профільного радіусу і зменшення діаметра ролика точковий початковий контакт з деталлю все більш наближається до лінійного. Тому природним розвитком форми таких роликів є циліндрові ролики малого діаметра з прямолінійною створюючою. Перевагою роликів з циліндровою робочою ділянкою є незалежність довжини їх контакту з деталлю і кута вдавлювання від профільного радіусу. За рахунок збільшеної кривизни ролика в площині його кочення вдається отримати за відсутності хвилястості на обкатаній поверхні інтенсивну деформацію обкатуваної поверхні. Після обкатування валу із сталі 40 п'ятиміліметровим голчатим роликом завдовжки 25 мм феритні і перлитові зерна значно витягнуті у напрямі кочення ролика. Ролики малого діаметра з прямолінійним профілем, що округляє у торців радіусом 30-50 мм, дозволяють застосовувати збільшені подовжні подачі, досягаючи 6-16 мм на оборот деталі. Хвилястість на обкатаній поверхні відсутня. Для випадків обробки деталей циліндровим роликом щодо малого діаметра ($D_p \ll D_d$) середній кут вдавлювання можна виразити в радіанах, використовуючи відношення

$$\varphi = \varphi_b/2 = b/D_p. \quad (4)$$

Навантаження на одиницю довжини контакту ролика з оброблюваною поверхнею $q = 0,01 \text{ НМ}$, де: 0,01 – коефіцієнт відповідності розмірностей q і НМ .

Тоді враховуючи (4) маємо:

$$q = 0,02 \text{ НМ } 2b, \quad (5)$$

де q в кН/мм ; НМ в одиницях твердості по Мейеру; D_p в мм; φ в рад (щоб уникнути лушення від перенаклепу необхідно приймати $\varphi < 5^\circ$).

Погонне зусилля обкатування q , розраховане по залежності (5), з урахуванням коефіцієнта твердості, задовільно співпадає із зусиллям, визначеним при експериментальному обкатуванні циліндровими роликами сталевих деталей з різною початковою шорсткістю [1].

У зв'язку із широким застосуванням деталей, наплавлених сталями марок 06X19H9T, 3X13, 20X10Г1ОТ і т.п. (головним чином у важких гідравлічних пресах), виникла необхідність в чистовій обробці поверхневою пластичною деформацією наплавлених поверхонь. Обкатування таких поверхонь звичайними тороподібними роликами супроводиться утворенням хвилястості через періодичну (по кроку наплавлення) змінну твердість наплавленого металу (при кроці наплавлення 16 мм коливання твердості від 170 до 225 *HV10*). Тому для обкатування подібних деталей як деформуючий елемент був застосований бочкоподібний ролик діаметром 12,5 мм з радіусом робочого профілю 600 мм [1]. При такому радіусі контакт ролика з оброблюваною поверхнею перевищує крок наплавлення, а малий діаметр ролика забезпечує інтенсивну деформацію металу, незважаючи на зменшення кривизни ролика в його осьовому перетині.

Пристрій для обкатування крупних валів бочкоподібним роликом показаний на рис. 7.

Кількість опорних роликів вибирається залежно від необхідного зусилля обкатування і діаметра робочого ролика. Для робочого ролика діаметром 12,5 мм при зусиллях обкатування до 60 кН прийнята шестироликова схема. Робочий ролик 1 спирається на два проміжні ролики 2, які, у свою чергу, лежать на трьох опорних роликах 3, встановлених на осях 4 в поворотній головці 5. В осьовому напрямі положення робочого ролика фіксується упором, виготовленим із сталі ХВГ і загартованим до твердості 60-62 *HRC*. Проміжні і опорні ролики торцями спираються в упірні кулькові підшипники. Головка кріпиться до штока 6 за допомогою гвинтів, які дозволяють вивіряти її кутове положення для зменшення осьової складової зусилля обкатування на робочому ролику. Зусилля обкатування створюється гідроциліндром 8 і визначається по манометру. Воно передається на ролик через пакет тарільчатих пружин 7, знижуючих жорсткість системи. За допомогою

описаного пристрою обкатують, наприклад, робочі поверхні плунжера (діаметром 1340 x 3250 і 650 x 3020 мм), наплавлені сталлю 06X19H9T. Під обкатування плунжер обточується широким різцем з подачею 4 мм/об. Вісь робочого ролика встановлюється горизонтально, для чого роликівка головка пристрою вивіряється маятниковим кутоміром. При зусиллі обкатування 42,5 кН, подовжній подачі 3 мм/об і швидкості обкатування 35 м/хв отримана шорсткість поверхні, відповідна параметру $R_a = 0,63$ мкм при початковій, $R_z = 20$ мкм.

Після обкатування твердість поверхневого шару підвищується на 10% в порівнянні з початковою, і що особливо істотно, вирівнюється; її коливання в межах одного кроку наплавлення, досягаючи 27%, знижуються до 10%. Більше збільшення твердості (на 50-55%) досягається при обкатуванні плунжерів, наплавлених сталлю 20X10Г10Т. В результаті обкатування гідроабразивний знос наплавлених плунжерів зменшується на 15-18% і помітно підвищується їх кавітаційна стійкість.

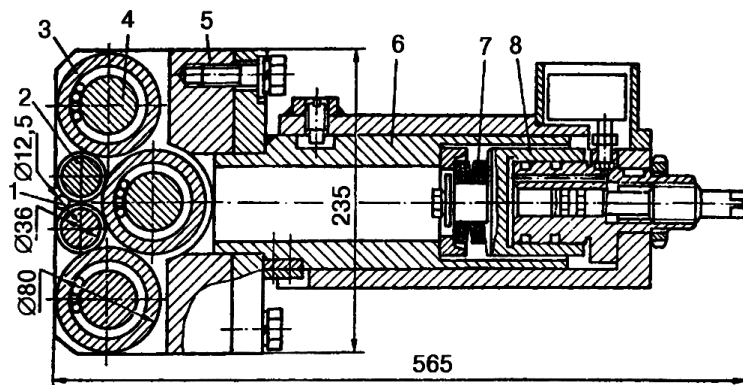


Рис. 7. Пристрій для обкатування крупних валів бочкоподібним роликом

Для ефективного обкатування деталей типу валів після термообробки до твердості 600 HB знаходить застосування пристрій з гнучкими голчатими роликами [7]. Пристрій показаний на рис. 8. Опукло-увігнута лиска на циліндровій поверхні облямовування 2 виконана увігнутою в площині обкатування з радіусом кривизни, рівним $(D/2 + D_p)$, шириною $2D_p$ і опуклої в площині подачі, з радіусом

кривизни, рівним (16-40) D_p . При стисненні пружин 6 за допомогою супорта металоріжучого верстата, на якому закріплюється пристрій корпусом 5, з обіймою 3 і облямовуванням 2, підтискають ролики 1 до

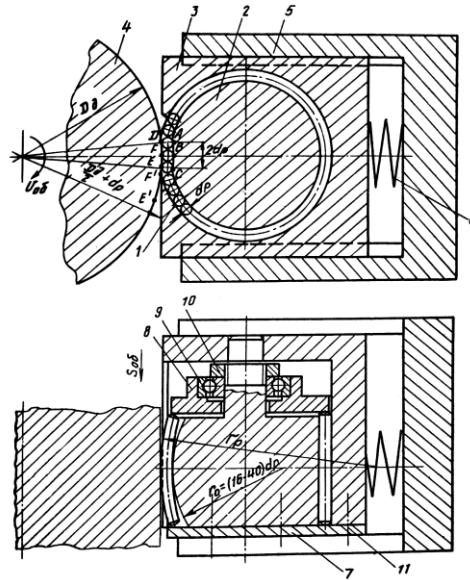


Рис. 8. Пристрій для чистової обробки поверхонь тіл обертання оброблюваної деталі. При обертанні деталі із швидкістю $V_{об}$ ролики 1 прокочуються між поверхнями деталі і опукло-увігнутої лиски і деформують поверхневий шар деталі. При цьому ролик, що знаходиться у контакті з облямовуванням і з деталлю відповідно в крапках C і E , деформує поверхню деталі по дузі $E^1E = 2D_p$, а ролик, що знаходиться у контакті з облямовуванням і деталлю в крапках B і E , деформує деталь по дузі $FF^1 = D_p$, довжина дуги: $FE = D_p (D_\partial - D_p) / D_\partial$.

Таким чином, поверхні, що деформуються двома сусідніми роликами, перекриваються на величину $EF^1 = FF^1 - F^1E = D_p^2 / D_\partial$.

Таке перекриття забезпечує безперервність пластичної деформації поверхні деталі довколишніми роликами. При цьому в роботі беруть участь практично два ролики, оскільки при виході з контакту нижнього ролика (крапки E , C) в цей же час вступає в роботу верхній ролик (крапки D , A).

При діаметрі роликів, $D_p = 5$ мм, профільний радіус ролика, $r_p = 500$ мм. При обкатуванні валу діаметром 200 мм із сталі марки 34ХН1М,

твердістю 400 *HB* ($K_P = 4,5$), зусилля обкатування, вибране по номограмі (рис. 5), рівно $P = 6,3 \times 4,5 = 28,4$ кН. Оскільки в роботі беруть участь 2 ролики, те зусилля пружини $P_{np} = 2P = 57$ кН, подача рівна 4 мм/об. Швидкість обкатування була прийнята рівній 100 м/хв. В результаті обробки отримана шорсткість з $R_a = 0,16$ мкм, при початковій, $R_z = 20-30$ мкм.

Голчатими самовстановлюючимися роликами успішно обкатуються гвинтові поверхні архимедових і глобоїдальний черв'яків з модулями $m = 8-30$ мм, кутами підйому лінії витка $\gamma < 10^\circ$ і упірні різьби з кроком 24-64 мм [1,3]. Наприклад, гвинт електрогармати з кроком різьби 40 мм, виготовлений із сталі 40, піддавався термообробці до твердості 217-255 *HB*. Нажимні гвинти з кроками 24 і 32 мм виготовлялися з поліпшеної сталі 34ХН1М твердістю 286-321 *HB*. Різьба перед обкатуванням нарізалася твердосплавними різцями. Шорсткість поверхні різблення перед обкатуванням відповідала $R_z = 20...40$ мкм. Обкатування, замість полірування шкурами протягом 6 годин, проводилося з погонним зусиллям на голчатому ролику 1,40; 1,68; 1,59 кН/мм відповідно для різьб з кроками 24, 32, 40 мм при швидкості 3 м/хв за три проходи. В результаті обкатування отримана інтенсивна деформація поверхні упірної сторони витка по всій глибині профілю різблення. Шорсткість обкатаної поверхні – $R_a = 0,32$ мкм. Твердість металу в поверхневому шарі різьби, має структуру сорбіту, підвищилася на 18-20 %. Це дозволило зняти гарт з різбової ділянки гвинтів струмами високої частоти, в результаті якої гвинти згинало, що додатково усилювало знос гайок під час експлуатації [8]. Піддавалися обкатуванню самовстановлюючимися голчатими роликами у всій глибині профілю різьби нажимні гвинти прокатних станів з кроком нарізки 48 і 64 мм, з розширеною западиною різьби [1].

На рис. 9 показаний пристрій для обкатування бічних поверхонь канавок для торцевих ущільнень конічними роликами малого діаметра

[9]. Пристрій складається з корпусу 1, в розточування якого запресована вісь 2. На осі встановлені на окремих голчатих підшипниках 3, дві шайби 4 і 5. В торійдальні канавки шайб поміщені кульки 6. До корпусу гвинтами закріплені сепаратори 7 і 8, в пазах яких встановлені деформуючі ролики 9 і 10 малого діаметра.

Разом з супортом верстата, на якому пристрій закріплений корпусом 1, пристрій вводиться роликами 9 і 10 в канавку і підтискається із зусиллям P . При обертанні деталі з кутовою швидкістю ω окружні швидкості бічних поверхонь канавки рівні відповідно ω_{R_1} і ω_{R_2} тому ролики 9 і 10 обертаються з різними окружними швидкостями. Шайби 5 і 4, обертаючись з різними швидкостями, прокочуються один щодо одного за рахунок вільного прокатування кульок між ними. Рівномірність за рахунок розвороту шайб 4 і 5 щодо кульок 6.

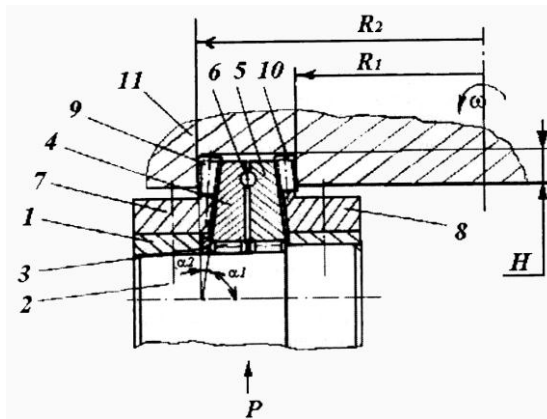


Рис. 9. Пристрій для обкатування бічних поверхонь канавок

У разі обкатування канавки з кутом профілю $\alpha_k = 0$, як показано на рис. 9, ролики 9 і 10 виконані з невеликою конусністю (кут конуса при вершині ролика α_2). Це забезпечує за умови $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_k = 90^\circ$, де: α_1 – кут при вершині конуса шайби, можливість навантаження роликів 9 і 10 за рахунок підтискання пристрою до деталі з погонним навантаженням

$$q = P/2H \cos \alpha_1,$$

де H – глибина канавки. Якщо кут профілю канавки $\alpha_k = 0$, то можна застосувати голчаті (циліндрові) ролики, тоді $\alpha_2 = 0$, $\alpha_1 = 90^\circ - \alpha_k$. При цьому погонне навантаження на роликах:

$$q = P/2H \operatorname{tg} \alpha_k.$$

Після здійснення трьох-чотирьох оборотів деталі бічні стінки канавки будуть продеформовані по всій глибині профілю.

Контрольні питання:

1. Чому підсилюється пластична деформація поверхневого шару деталі зі зменшенням діаметру ролика?
2. Чому утворюється хвилястість наплавленої поверхні при обкатуванні її тороподібним роликом?
3. Як працює пристрій з бочкоподібним роликом?
4. Як працює пристрій для вібродинамічного обкатування валів?
5. Принцип обкатування роликами малого діаметру торцевих ущільнюючих канавок?

Лекція 3. Обкатування обгинанням роликами

1. Кінематика і переваги способу обкатування обгинанням роликами
2. Пристрій для обкатування роликами шківів клиноременних передач
3. Пристрій для обкатування гвинтових поверхонь
4. Пристрій для обкатування кульками зубчатих коліс, гвинтів, рейок

Кінематика відомого способу обкатування деталі складного профілю роликом полягає в обертанні ролика навкруги своєї осі і в поступальній подачі його уздовж профілю обкатуваної поверхні. При змінній кривизні профілю деталі у міру подачі ролика міняється приведена кривизна в точці контакту, а це призводить до зниження якості обкатуваної поверхні, оскільки порушується умова оптимізації зусилля обкатування. Радіус кривизни ролика r_p при відомому способі

обкатування повинен бути явно менше якнайменшого радіусу кривизни увігнутої ділянки профілю деталі, що обмежує допустиму величину подачі і знижує тим самим продуктивність процесу.

Спосіб обкатування обгинанням полягає в тому, що точка контакту ролика з деталлю у міру його переходу в нове положення переміщається по деталі в процесі взаємного обгинання їх профілів. Обкатування, таким чином, відбувається як в площині кочення – поперечного перетину ролика, так і в площині подачі – його осьового перетину. Профіль ролика при обкатуванні обгинанням може мати в загальному випадку змінну кривизну, злагоджену з кривизною деталі таким чином, що в кожній крапці забезпечуються оптимальні умови їх контакту. Зокрема, при цьому способі може бути забезпечена однакова приведена кривизна контакту ролика з деталлю, що дозволяє використовувати постійне робоче зусилля, достатньо великі подачі обкатування і гарантує при цьому якість поверхні і високу продуктивність процесу. Крім того, обкатування обгинанням дозволяє більш рівномірно завантажити робочу поверхню роликів за рахунок поступового зсуву точки їх контакту з деталлю уздовж профілю осьового перетину. При чому, цей зсув забезпечується і при обкатуванні деталей з прямолінійною створюючою, наприклад, гвинтових поверхонь. Значення цього факту особливо велике для збільшення стійкості роликів малого діаметра.

Залежно від форми обкатуваного профілю з метою оптимізації режиму обкатування застосовуються або ролики змінного профілю або конструктивні схеми, що забезпечують необхідне змінне зусилля за профілем залежно від приведеної кривизни ролика і деталі в точці їх контакту. Обкатування за способом обгинання консольним роликом застосовується при чистовій обробці бічних стінок струмків шківів клиноремennих передач. Аналіз експлуатації клиноремennих передач в період прироблення поверхні бічних стінок струмків шківів при початковій шорсткості їх поверхні, відповідної параметру $R_z = 20 - 40$

мкм, показує, що в цей час має місце інтенсивний знос поверхні ременів і робочої поверхні шківів. При закінченні стадії прироблення шорсткість поверхні струмків відповідає параметру $R_a = 0,16 - 0,32$ мкм. Таку шорсткість поверхні на бічних стінках струмків не вдається отримати при обробці полірувальними різцями на токарних і карусельних верстатах через низьку вібростійку систему верстат-інструмент-деталь.

З метою зменшення зносу ременів і поверхні струмків шківів при експлуатації за рахунок зниження шорсткості і створення наклепу робочого поверхневого шару при чистовій обробці бічних стінок струмків на шківях конусних дробарок застосований процес обкатування обгинанням роликів. Струмки з кроком 28,6 мм і глибиною 25,4 мм обкатувалися консольним роликом за способом обгинання за допомогою пристрою, показаного на рис. 10. Консольний ролик 1 встановлений в підшипники важеля 2, що повертається на осі 4 щодо корпусу 3. Нижній кінець важеля за допомогою зубчатого зчеплення сполучений з сектором 12, крайні положення якого визначаються упірними гвинтами 11. З одним з кінців сектора 12 шарнірно зв'язаний поршень 9, вставлений в розточування циліндра 8. Зусилля на поршні 9 створюване пружиною, регулюється гайкою 10. В тілі поршня 9 є клапан 6 і калібрований отвір 7, площа перетину якого регулюється замочним штоком 5. Ролик 1 підводиться до обкатуваної поверхні деталі і підтискається до неї під дією пружини через поршень 9, сектор 12 і важіль 2. При обертанні оброблюваної деталі корпусу 3 пристрої і супорту верстата задається рух подачі уздовж осі деталі справа наліво при обкатуванні правої сторони струмка, і зліва направо – при обкатуванні лівої сторони. За рахунок повороту важеля 2 створююча ролика 1 огинає профіль обкатуваної деталі, здійснюється подача обкатування.

При повороті важеля 2, сектор 12, що знаходиться в тому, що зачіпляє з важелем 2, повертається і поступово стискаючи пружину, переміщає поршень 9 щодо циліндра 8. Рідина, залита в циліндр 8,

переливається через клапан 6 справа наліво і дозволяє важелю вільно відхилятися в процесі обкатування, а при відведенні ролика від деталі перешкоджає швидкому поверненню важеля 2 в початкове положення. Важіль 2 поволі повертається у міру перетікання рідини з лівої порожнини в праву через калібрувальний отвір 7. Для обкатування лівої сторони профілю струмка поршень 9 перекидається в нижню виїмку сектора 12.

Подача супорта верстата S_c (рис. 10) для забезпечення необхідної подачі обкатування уздовж створюючої струмка S , вибраної залежно від профільного радіусу ролика R , розраховується для довільного положення ролика щодо профілю струмка по формулі:

$$S_c = S \sin(\Psi + \alpha - \gamma) / \cos(\Psi - \gamma),$$

де Ψ - кут, що визначає положення осі ролика щодо напрямку подачі супорта; α - кут профілю струмка; γ - кут, визначаючий положення центру кривизни осьового перетину ролика щодо його осі.

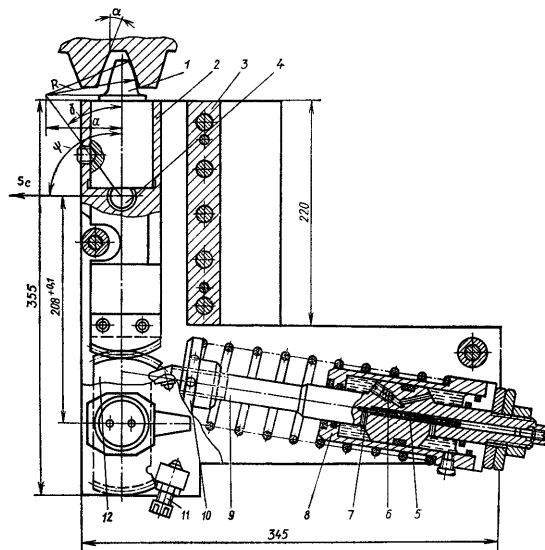


Рис.10. Пристрій для обкатування роликами шківів клиноременних передач

Значення оптимального зусилля обкатування вибирається залежно від профільного радіусу ролика R (r_p), його поточного діаметра D_p (кривизною деталі нехтуємо зважаючи на її малість) і твердості обкатуваної деталі по номограмі, див. рис. 5.

Поточний діаметр ролика D_p розраховується по залежності

$$D_p = [2 R - a/\sin (\Psi - \gamma)],$$

де a – відстань від центру кривизни ролика до його осі.

Подача S_c супорта верстата при обкатуванні шківів конусних дробарок складає 1 мм/об.деталі, що відповідає при профільному радіусі ролика $R = 160$ мм подачі S ролика по створюючій струмка 2,1 мм/об. Швидкість обкатування складає 50 м/хв. Оптимальне зусилля на ролику, вибираюче у зв'язку із змінним діаметром ролика при твердості матеріалу деталі 140 *HV* відповідно до рис. 5, змінюється в процесі обгинання профілю струмка від 3 до 7 кН. Шорсткість поверхні перед обкатуванням відповідає параметру $R_z = 20$ мкм, після обкатування – параметру $R_a = 0,16 - 0,32$ мкм. Трапецеїдальні різьби з кроком 10-20 мм в дрібносерійному виробництві доцільно обкатувати пальцевим роликом з прямолінійним профілем методом обгинання за 4-5 проходів [3,11]. В цілях підвищення продуктивності обробки для різьб з симетричним профілем і архимедових черв'яків з модулем $m = 6 - 30$ мм застосовують багатороликовий пристрій [3,12], в якому деформуючий елемент-інструмент виконаний у вигляді двох зубчатих дисків, зуби яких є пальцевими роликами, що вільно обертаються. Обкатування здійснюється за один прохід. Трапецеїдальні різьби з кроком 10-20 мм і діаметром до 300 мм у крупносерійному виробництві за один прохід можна обкатувати за допомогою пристрою, показаного на рис.11 [13].

Консольні ролики 1 встановлені симетрично на підшипниках в ексцентричних отворах втулок 2 з ексцентриситетом e і зміщені щодо один одного. Втулки 2 змонтовані на підшипниках 5 і 6 у важелях 7 і 15 роз'ємної обойми 8. Важелі 7 і 15 зафіксовані на осях 22 кулачком 16 через штоки 12, гвинти 10 і стягнуті між собою пружиною 13 через шпильку 14, повзун 9 і штифт 11. До втулок 2 для створення необхідного зусилля на роликах закріплені важелі 3, сполучені через штифти 4 і 17 з силовим механізмом, що включає тягу 18 і пружини 19, встановлені в стакан 20 і що упираються в гайки 21. При цьому кожні два ролики,

розташовані в одному перетині підібгані до різних сторін профілю різьблення для урівноваження зусилля пружини у важелях 7 і 15.

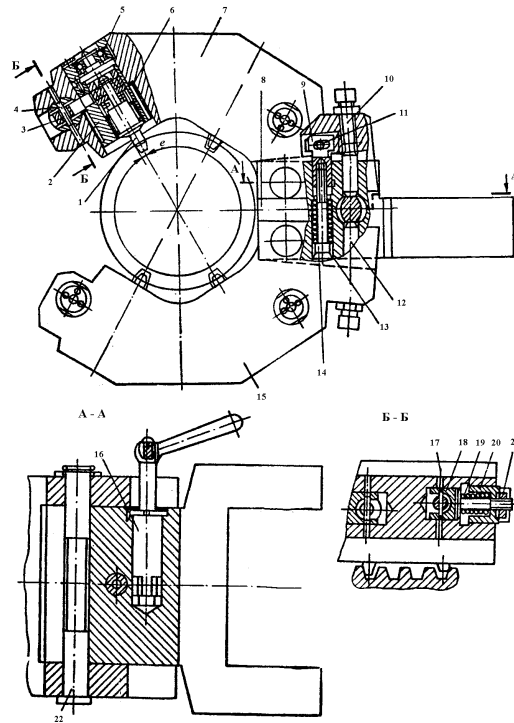


Рис. 11. Пристрій для обкатування гвинтових поверхонь

Величина зсуву роликів 1 по глибині оброблюваного профілю рівна $\Delta h = h_p / S \cos \alpha$, де: S – подача обкатування.

Пристрій встановлюється в супорті токарного верстата і працює таким чином. Поворотом кулачка 16 на 90° мала вісь його поперечного перетину поєднується з віссю штоків 12. При цьому важіль 15 за рахунок власної ваги, а важіль 7 за рахунок зусилля пружини 13 розводяться на кут, достатній для того, щоб відстань між торцями передніх роликів перевищила зовнішній діаметр обкатуваної поверхні. Переміщенням супорта верстата пристрій встановлюється в робоче положення відносно оброблюваної деталі. При установці кулачка 16 в положення, як показано в перетинах А-А і Б-Б, здійснюється торкання з гвинтовою поверхнею роликів 1, заздалегідь виставлених відносно обкатуваного профілю з деяким натягом. Втулки 2 повертаються зусиллям контакту ролика з деталлю. При цьому важелі 3, повертаючись разом з втулками 2

через штифти 17 і тяга 18, стискають пружини 19 і утворюють зазори між стаканами 20 і гайками 21. Зусилля пружин прикладаються до роликів. При обертанні обкатуваної деталі пристрій переміщається разом з супортом верстата на величину кроку гвинтової поверхні за кожний оберт деталі. Всі ролики одночасно обкатуються по гвинтовій поверхні, деформуючи її по всій глибині профілю. Оптимальне зусилля обкатування на кожному ролику забезпечується регулюванням пружин 19 з урахуванням кривизни ролика і гвинтової поверхні в точці їх контакту. Для чистової обробки євольвентної поверхні зубів крупномодульних шестерень модулем 12 мм з числом зубів $Z = 26$ створено пристрій, що дозволяє обкатувати зуби роликами на зубодовбальних верстатах [1]. Два конічні ролики малого діаметра утворюють собою западину зубодовбальної рейки і підтискаються до оброблюваного колеса пакетом тарільчатих пружин. Обкатування кожного зуба завершується (як і чистове нарізування) за 50 дв. ходів повзуна. Обкатані зуби мали шорсткість $R_a = 0,16 \dots 0,32$ мкм за наявності окремих рисок глибиною до 0,015 мм в місцях особливо грубих складок. Для зубчатих коліс модулем більше 12 мм створення пристрою подібного типу спрощується, що обумовлене збільшенням розмірів западини між зубами.

Для отримання регулярного мікрорельєфу на робочих поверхнях зубчатих коліс, рейок, гвинтів розроблено пристрій для обкатування кульками [14], показане на рис. 12. Деформуючий інструмент 1 виконаний у вигляді пальцевої фрези з робочою ділянкою, на зовнішній поверхні якої створені гвинтові канавки 2 напівкруглі профілі. В канавці 2 встановлені щільно один до одного кульки 3 одного діаметра (d_{ul}) і утримуються в канавці за допомогою сепаратора 4, закріпленого до корпусу. Гвинтова канавка 2 замикається каналом 5, в якому також щільно один до одного встановлені кульки 3. Деформуючий інструмент 1 встановлюється хвостовиком 6 в шпіндель металообробного верстата.

Гвинтова канавка 2 утворена з кроком $P = (1,3 - 1,5) d_{ин}$. Пристрій підтискається до оброблюваної деталі 7. При обертанні шпінделя металообробного верстата деформуючий інструмент обертається із швидкістю $V_{об}$. При цьому кульки 3, частина яких у будь-який момент підібгана до оброблюваної поверхні деталі 7, прокочуються між поверхнями деталі 7 і канавки 2 і утворюють на обкатуваній поверхні регулярний мікрорельєф. Відпрацьовані кульки повертаються в початковий виток канавки через канал 5. Регулювання параметрів мікрорельєфу на обкатаній поверхні здійснюється варіюванням подачі і кроку гвинтової канавки. обкатування на кожний оборот інструменту, підбором діаметра кульок

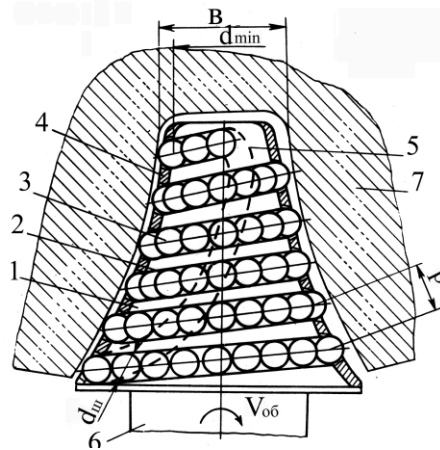


Рис.12. Пристрій для обкатування кульками зубчатих коліс, гвинтів, рейок

Для обкатування повного профілю струмка канатного блоку судоперенавантажувача застосований клиновий ролик із змінним радіусом кривизни в площині подачі. Проте підвищення твердості поверхневого шару на профілі струмка, отриманого за допомогою наклепу, не призвело до зменшення зносу поверхні. Аналіз процесу зносу робочої поверхні блоку показав, що окрім стирання і зминання поверхні має місце зрізання поверхневого шару окремою розжареною тяганиною каната. З теорії різання металів відомо, що для різання наклепаного металу витрачається менша робота, ніж при різанні ненаклепаного металу. Для підвищення довговічності блоків був

замінений метал блоку: сталь 35Л – на сталь 45Л і введений гарт блоку в масло. Твердість поверхневого шару профілю струмка після гарту і обкатування роликом склала приблизно 400 *HV*.

Після упровадження такої комбінованої технології довговічність блоків і працюючих з ними канатів підвищилася у декілька разів.

Поєднання чистового і зміцнюючого обкатування дозволяє істотно підвищити надійність устаткування і приносить значний економічний ефект [1,15].

Контрольні питання:

1. У чому полягає спосіб обкатування роликом огинанням?
2. Перевага способу обкатування огинанням в порівнянні зі звичайним способом обкатування?
3. Як працює пристрій для обкатування шківів клиноременних передач?
4. Як працює пристрій для обкатування гвинтових поверхонь?
5. Як працює пристрій для обкатування кульками зубчастих коліс, гвинтів, рейок?

Лекція 4. Глибина пластичної деформації

1. Уявлення про глибину наклепаного шару
2. Розрахунок глибини наклепаного шару по результатам вимірювання твердості
3. Експериментальне визначення розподілу тиску по поверхні пластичного відбитка методом фотопружності
4. Теоретичний розрахунок глибини наклепу по формулах Герца

Однієї з найважливіших характеристик пластично деформованого поверхневого шару, залежної від режиму обкатування, є його глибина. Експериментально глибину зміцнення визначають звичайно вимірами

твердості по Віккерсу або мікротвердості на перпендикулярних до поверхні або косих шліфах [16]. Аналітична залежність між глибиною зміцненого шару, зусиллям обкатування і геометричними розмірами ролика і деталі встановлена в [17]. Вона заснована на використуванні досліджень, проведених Н. М. Беляевым [18] для визначення контактних напруг. При контактній передачі навантаження P роликом діаметром D_p , профільним радіусом r_p , діаметром D_o в припущенні пружних деформацій, найбільша дотична напруга уздовж нормалі до поверхні змінюватиметься по кривій, показаній на рис. 13. Якщо провести пряму на відстані τ_s межі текучості при зсуві від осі z , то ця пряма перетне криву в крапці A . Зона, розташована вище за створюючу циліндра, проведеної через крапку A , розглядається як зона пластичних деформацій; зона, розташована ближче до осі валу, як зона пружних деформацій. При цьому передбачається, що в зоні пружних деформацій розподіл напруг буде таке ж як і при чисто пружному деформованому стані, тобто відповідне рішення контактної задачі теорії пружності. Фактично, при виникненні пластичних деформацій в безпосередньому сусідстві з межею, що відділяє зону пластичної деформації від зони пружних деформацій, відбудеться перерозподіл останніх і лише на деякій відстані нижче за цю межу пружний напружений стан збереже свій характер. Вважають, що ця відстань мала і такий прийом достатньо точний для практичного визначення глибини наклепаного шару t .

Ролик і деталь стикаються частіше всього по площі, що має контур еліпса. Проте для спрощення задачі в припущенні, що звичайно різниця між напівосями еліпса торкання невелика, еліпс замінюють рівновеликим за площею кругом, радіус якого

$$a = \sqrt{a_y v_y}, \quad (6)$$

де a_y , v_y розраховуються по (22).

Цей радіус можна визначати по наближеній формулі

$$a = 0,051 \sqrt[3]{PR}, \quad (7)$$

де R - радіус приведеної кривизни в контактi, $1/R = 2/D_o + 2/D_p + 1/r_p$.

Використовуючи формули Н. М. Беляєва для визначення компонентів тензора напруг із спрощеннями, про які мовилося вище, з урахуванням умови пластичності по максимальних дотичних напругах одержуємо

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \leq \tau_s = \frac{\sigma_T}{2}.$$

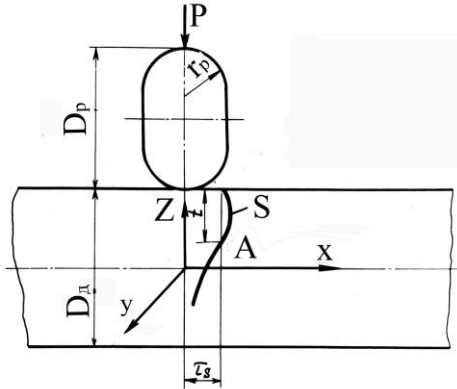


Рис. 13. Схема розрахунку глибини пластичної деформації

В роботі [17] встановлена залежність між безрозмірними величинами $P/a^2\sigma_T$ і t/a у вигляді

$$\frac{P}{a^2\sigma_T} = \frac{4\pi}{3} \left[\frac{3}{1 + (t/a)^2} + 2(1+\nu) \left(\frac{t}{a} \operatorname{arccctg} \frac{t}{a} \right) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Розрахувавши по формулі (6) або приблизно по (7) значення a при відомих P і σ_T з виразу (8), знайдемо глибину наклепу t .

Більш проста, але менш точна оцінка, запропонована в роботі [17] витікає з рішення пружної контактної задачі Буссинєска для зосередженої сили:

$$t = \sqrt{P/2\sigma_T}. \quad (9)$$

Тут не враховуються приведена кривизна ролика і деталі в точці контакту і його форма. Проте вид відбитка не враховується і рівнянням (8), оскільки при його висновку еліпс замінюється рівновеликим за площею кругом. Крім того, як показують розрахунки, виконані по

формулах (6) і (7), із збільшенням напівосі еліпса торкання a_y , у міру зростання радіусу приведеної кривизни, відношення t/a_y зменшується настільки, що глибина наклепу практично залишається незмінною. Формула (9) знайшла широке застосування в практиці. Вона дає достатню точність в тих випадках, коли відбитки мають форму близьку до круга.

І. В. Кудрявцев і Р. Е. Петушков експериментально визначили поправку до (9), приведену кривизну, що враховує, в контактні ролика з деталлю [19]:

$$t = \frac{1}{m} \sqrt{P/2\sigma_T}, \quad m = 1 + 0,07R. \quad (10)$$

М. С. Дрозд із співробітниками експериментально встановив однозначність залежності між відношеннями t/h і d/D [20], де h , d - глибина і діаметр відбитка; D - діаметр пуансона. Відповідно до цього він запропонував глибину наклепу для сферичного пуансона визначати по формул $t = 5,5hD/d$, а для пуансона довільної форми –

$$t = 5,5h D_{np}/d_{np}, \quad (11)$$

$$h = P/\pi D_{np} H, \quad D_{np} = 1/A \sqrt{(0,338/\alpha)^3}, \quad (12)$$

$$d_{np} = \sqrt{a_v}, \quad (13)$$

де $\alpha = \alpha(A/B)$ (A , B - коефіцієнти, які залежать від головних кривизн контактуючих тіл і визначаються по формулах контактної теорії пружності [21]); H - пластична твердість.

Відповідно до висновків роботи [22] при розрахунку глибини наклепу по (11) необхідні досить складні розрахунки для визначення D_{np} . Від них можна позбутися, якщо підставити в (11) значення h , визначуване по (12). Після підстановки маємо

$$t = 5,5P/\pi H d_{np}.$$

Прийнявши у відповідності з [23] значення $H = 5\sigma_T$, з обліком (13) отримаємо

$$t = 0,175P/\sigma_T \sqrt{a_v}. \quad (14)$$

По формулі (14) можна розрахувати глибину наклепу, знаючи зусилля навантаження, межа текучості матеріалу і замірявши напівосі пластичного відбитка. Вирази (10) і (11) отримані з аналізу результатів вимірювань твердості наклепаного металу, але вони дають суперечливі результати. Спроба розрахувати глибину наклепу з урахуванням інтенсивності деформації металу під роликом зроблена в [24]. В ній представлені результати розрахунку глибини наклепу для випадків обкатування роликами з різними геометричними розмірами, яка більше, ніж розрахована по (9), в середньому на 13 %. Цей факт пояснюється тим, що нижня межа наклепаного шару, оцінювана за мірою деформації металу, відповідної його межі текучості, знаходиться нижче, ніж межа, визначувана по початку підвищення твердості наклепаного металу. Проте в роботі [17] розрахунок глибини наклепу зроблений не по початку підвищення твердості металу, а по межі, на якій дотична напруга τ_s досягала половини межі текучості, що призводило до виникнення пластичної деформації матеріалу.

Така не велика розбіжність результатів розрахунку є, мабуть, наслідком прийнятих допущень і наближень при рішенні пружньопластичної задачі [24]. Слід помітити, що жодна з перерахованих вище методик визначення глибини наклепу непридатна для випадку обкатування деталей циліндровими роликами, при якому по довжині відбитка має місце розподілене навантаження. Глибина пластичної деформації поверхневого шару при обкатуванні роликами різної форми залежить від закону розподілу тиску по поверхні контакту ролика з деталлю.

Вплив шорсткості оброблюваної поверхні на закон розподілу тиску вивчали багато вчених [25, 26, 27 та ін.]. При малих кутах вдавлювання роликів, властивих чистовому обкатуванню, особливо коли хвилястість на обкатаній поверхні обмежує силу обкатування кутом $\varphi_a < 2,5^\circ$ і початкова шорсткість поверхні частково залишається після обкатування,

вплив шорсткості на закон розподілу тиску істотно. При великих кутах вдавлювання ($\varphi = 5 - 10^\circ$), коли початкова шорсткість поверхні повністю усувається (див. рис. 4, крива 2), закон розподілу тиску по поверхні в завершальній стадії навантаження ролика не залежить від шорсткості.

Вплив не початкової, а нової кривизни ролика і деталі перед вдавлюванням його в останню, отриманої після пластичної деформації поверхні, на закон розподілу тиску вивчалось експериментально в [28]. При цьому використовувався поляризаційно оптичний метод. На підставі закону Герстнера пружну деформацію контакту, зняту після розвантаження, можна відновити при повторному навантаженні тією ж силою. Тому для експериментального дослідження як модель використовувався пружний контакт циліндрового пуансона і плоскої деталі, на якій в результаті пластичної деформації створювалося поглиблення циліндрової форми дещо більшого радіусу, ніж радіус пуансона. Величина і форма поглиблення, визначувана радіусом кривизни відбитка і кутом вдавлювання, могли варіюватися відповідно до конкретних умов силового контакту.

Навантажуючи моделі, виготовлені з чутливого оптичного матеріалу, зростаючим зусиллям можна зафіксувати моменти появи різного ступеня концентрації контактного тиску на краях відбитка. Моделі виготовлялися з пластинки оптично чутливого матеріалу ЕД6-М, завтовшки 6,4 мм Оптична стала матеріалу рівна 1,2 МПа. Поглиблення в моделі виконувалося розточуванням отвору діаметром 60 мм на токарному верстаті і подальшим обпилюванням пластини до заданих розмірів. Моделюючий пуансон-диск виготовляли діаметром 57 мм Таким чином, було виготовлено три моделі з глибиною відбитка 1,81; 0,46 і 0,11 мм, що відповідає кутам вдавлювання 20, 10 і 5°. Дослідження проводилися на поляризаційній установці ППУ-4.

Спостережуваний в навантажених моделях інтерференційний ефект пропорційний максимальним дотичним напруженням τ_{\max} . По картині

смуг можна визначити самі напружені місця в моделі, де пластичний перебіг матеріалу наступає перш за все. На рис. 14 приведена фотографія смуг в моделі з кутом вдавлювання $\alpha_s = 20^\circ$, коли пуансон стикається з гострим краєм відбитка.

Коли зусилля передається на ділянці, рівному заданому відбитку, лінії однакових дотичних напруг τ_{\max} замикаються навкруги зони на осі пластинки, що є джерелом інтерференційних смуг. Крім того, гостра кромка відбитка є другим джерелом інтерференційних смуг, розташованих безпосередньо у поверхні, і при $\alpha_s = 20^\circ$, $P = 1,1 P_0$ (де P_0 - зусилля нормального контакту) максимальні дотичні напруження у кромки складають 0,8 напружень на осі пластинки.

Епюру тиску в контакті диска і пластинки при навантаженні визначали інтегруванням методом кінцевих різниць диференціальних рівнянь рівноваги в прямокутній системі координат [29].

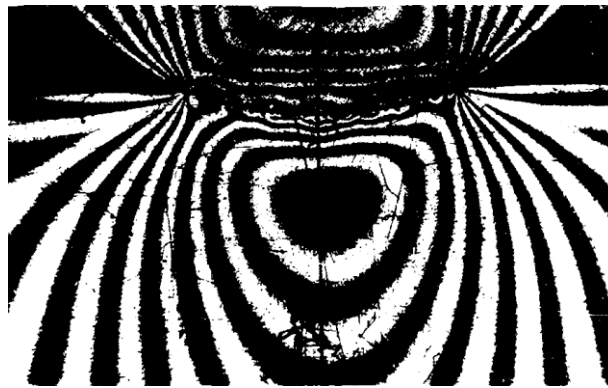


Рис.14. Картина смуг в моделі при контакті по всьому відбитку ($\alpha_s = 20^\circ$)

Нормальні напруги σ_x і σ_y в зоні деформації для i -го вузла розрахункової сітки основного перетину можна виразити наступними формулами:

$$\sigma_{x_i} = \sigma_{x_0} - \sum_{n=1}^i \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x; \quad \sigma_{y_i} = \sigma_{y_0} - \sum_{n=1}^i \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta x} \Delta y,$$

де σ_{x_0} і σ_{y_0} - нормальні напруження на початку шляху інтегрування, величина яких повинна бути відомою; $\Delta \tau_{xy}$ - приріст дотичних напружень

τ_{xy} по осях x і y при інтегруванні відповідно уздовж осей y і x ; Δx , Δy - кроки розрахункової сітки; τ_{xy} - дотичне напруження, визначена з експерименту $\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \times \sin 2\theta$; $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ - максимальне дотичне напруження; i - параметр ізокліни.

На рис. 15, *а*, *б* показані розрахункові перерізи для моделі з кутом вдавлювання $\alpha_s = 20^\circ$. Переріз *В* співпадає з віссю симетрії моделі, перерізу *b*, *c*, *d* - проміжні. Горизонтальний переріз *a* - *a* (на зисунку не показано) починається в ненавантаженій зоні і є додатковим. Розділенням напружень уздовж перетину отримані нормальні напруження, σ_x і σ_y , які потім використовують як початкові в перерізах *В*, *b*, *c*, *d*. Окрім основних, показані допоміжні перерізи і розрахункова сітка. В перерізі *m*, що проходить в області високих градієнтів дотичних напружень, крок сітки по x зменшений удвічі для збільшення точності обчислень. Розрахункова сітка нанесена на картину смуг і ізоклін, отриманих при навантаженні моделі зусиллям P_0 . Всі розрахунки по розділенню головних напруг виконані на ЕОМ. На рис. 15, *в* для значення $\alpha_s = 20^\circ$ показані епюри нормальних напружень σ_y в контакті і в перерізах на різній відстані від поверхні контакту.

Аналогічні епюри напружень отримані для пластинки з α_s , рівним 10 і 5° . Особливістю епюр нормального напруження при повному контакті для всіх досліджених кутів вдавлювання є деякий зсув максимуму від осі пластинки до краю відбитка. Такий характер епюр зберігається в перерізах, розташованих на відстані від поверхні контакту, не перевищуючому $0,3l$, де l довжина лінії контакту. В перерізах, видалених від контура більш ніж на $0,3l$, епюри σ_y мають максимум на осі симетрії відбитка.

Отримані результати показують, що дійсний розподіл тиску в контакті деталі і ролика значно відрізняється від рівномірного, а від еліпсоїдного не більше ніж на 7 %. У момент повного контакту при

зусиллі P_0 еюра має максимум в крапці, зміщеній від осі для різних кутів контакту на $0,2 - 0,4 l$ і поступово зменшується до нуля на краю відбитка. Якщо зусилля, що прикладається до деталі, перевищує P_0 , то у краю відбитка виникає зона концентрації напружень, залежна від зусилля і геометричних параметрів кромки. В частині вільного контура пластини, що примикає до контакту, діють розтягуючі напруження, максимальна величина яких складає близько $0,25$ максимально дотичного напруження.

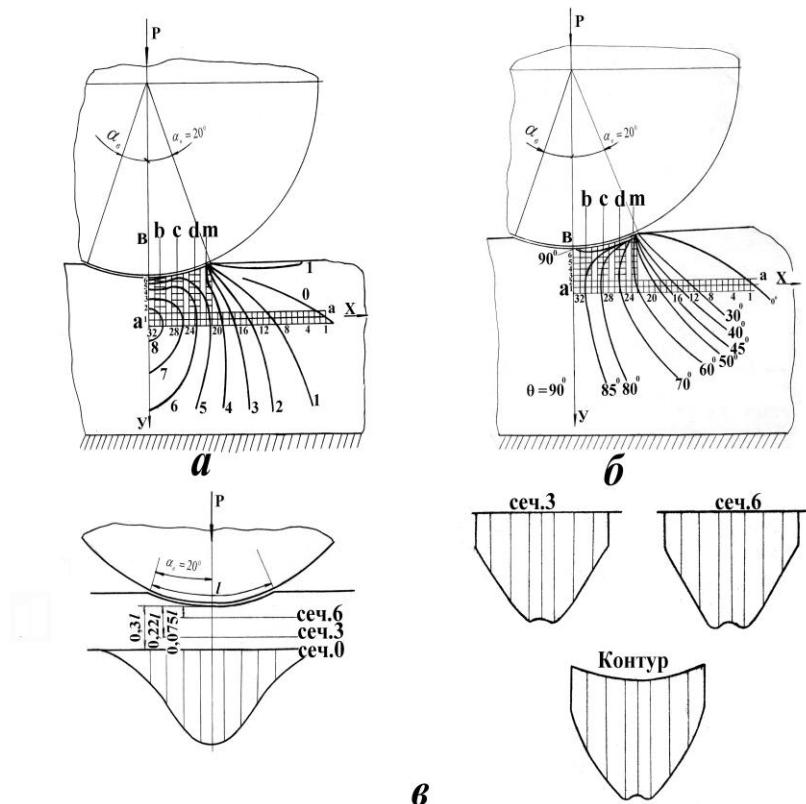


Рис. 15. Розрахункові перерізи нормальних напружень в зоні деформації пластинки для моделі з $\alpha_s = 20^\circ$, суміщених з картинами смуг (а) і ізоклін (б), та епюри нормальних напружень σ_y в пластинці (в)

Слід помітити, що по краях відбитка фактично утворюються не гострі кромки, а округлі вали [30, 31], і концентрація напружень на краю відбитка не матиме вираженого характеру. Крім того, в процесі обкатування одночасно з нормальним навантаженням на деталь діють дотичні складові (див. рис. 2). Дотичні навантаження пересувають

максимум дотичних напружень до поверхні [32, 33]. При цьому істотної зміни величини дотичних напружень на значній глибині від поверхні контакту не відбувається. Наявність дотичних складових зусилля обкатування приводить до підвищення ступені деформації на поверхні, але впливу на глибину наклепу не повинне надавати. Тому в основу розрахунку глибини деформації під прямокутним відбитком приймемо припущення [17], що в зоні пружних деформацій, розташованій під пластично деформованою зоною при обкатуванні роликми, розподіл напруг буде таке ж, як і при чисто пружному деформованому стані, тобто відповідне рішення контактної задачі теорій пружності (див. рис. 13).

Відповідно до теорії Герца, де передбачається еліпсоїдний розподіл тиску в контакті, головні напруги в матеріалі деталі під прямокутним відбитком в ділянках, перпендикулярних координатним осям, виражаються так [21]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= P_0 2\mu \left[1 + \left(\frac{z}{b_y} \right)^2 - \frac{z}{b_y} \right] \\ \sigma_y &= -P_0 \left[\frac{1 + 2 \left(\frac{z}{b_y} \right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b_y} \right)^2}} - 2 \frac{z}{b_y} \right]; \\ \sigma_z &= -P_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b_y} \right)^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де P_0 — найбільший тиск на середній лінії прямокутного відбитка, $P_0 = 2q/pb_y$.

Враховуючи, що $q = P/2a_y$, одержуємо

$$P_0 = P/\pi a_y b_y. \quad (16)$$

Прирівнюючи відповідно до гіпотези Губера - Мизеса [21] середніх дотичних напружень розраховані значення $\sigma_{\text{екв}}$ до межі текучості матеріалу деталі в початковому стані, знаходимо координату $z = t$ межі пластично деформованого шару (рис. 13), де

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]}.$$

З урахуванням (16) маємо:

$$\sigma_T = \frac{P}{\pi a_y b_y} \sqrt{\frac{1}{2 P_o^2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]}.$$

При $\mu = 0,3$ з урахуванням (15) отримаємо

$$P/a_y b_y \sigma_T = \pi/B, \quad (17)$$

де

$$B = \sqrt{\left\{ 0.6 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{t}{b_y}\right)^2} - \frac{t}{b_y} \right] - \frac{1 + 2\left(\frac{t}{b_y}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{t}{b_y}\right)^2}} + 2 \frac{t}{b_y} \right\}^2 + \left\{ \frac{1 + 2\left(\frac{t}{b_y}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{t}{b_y}\right)^2}} - 2 \frac{t}{b_y} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{t}{b_y}\right)^2}} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{t}{b_y}\right)^2}} - 0.6 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{t}{b_y}\right)^2} - \frac{t}{b_y} \right] \right\}^2}.$$

Залежність між величинами $P/a_y b_y \sigma_T$ і t/b_y для прямокутного відбитка приведена на рис. 16. Напівширина пружного відбитка b_y розраховується відповідно до теорії Герца [21]:

$$b_y = 1.522 \sqrt{q \rho_{np} / E_{np}}, \quad (18)$$

де ρ_{np} - приведений радіус кривизни (при $D_p \ll D_d$ $\rho_{np} = D_p/2$);

E_{np} - приведений модуль Юнга при обкатуванні сталі.

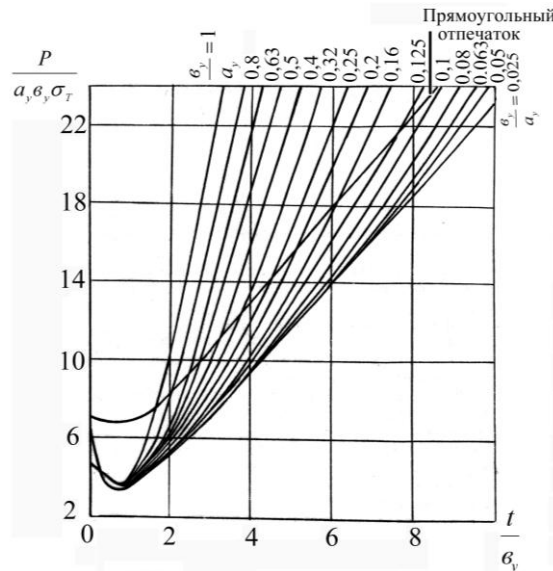


Рис. 16. Залежність $P/a_y b_y \sigma_m$ і t/b_y для різних відношень b_y/a_y

Як приклад розрахуємо глибину наклепу для випадку обкатування валу із сталі 40 ($\sigma_T = 399$ МПа) роликком завдовжки 24 мм і діаметром 5 мм із зусиллям $P = 50 \cdot 10^3$ Н, $a_y = 12,0$ мм, $q = 2,08 \cdot 10^3$ Н/мм.

Розрахована по (18) напівширина відбитка $b_y = 0,245$ мм, відношення $P/a_y b_y \sigma_T = 41,7$. По графіку для прямокутного відбитка (див. рис. 16) знайдемо $t/b_y = 13,1$, звідки глибина наклепу $t = 13,1 \cdot 0,245 = 3,2$ мм.

Результати розрахунку глибини наклепу по теорії середніх дотичних напружень для зразків, обкатаних циліндричними роликами діаметрами 5, 12 і 32 мм, поміщені в табл. 1.

В загальному випадку контакту тіл довільної кривизни головні напруження $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ в ділянках, перпендикулярних координатним осям, з яких z нормальна до поверхні контакту, а x співпадає з більшою віссю еліптичної контактної ділянки, визначаються по формулах:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -P_0 \frac{b_y}{a_y} \left\{ \frac{\frac{b_y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_y^2}}{1 + \frac{z^2}{a_y^2}} + 2 \frac{z}{a_y} (L - K) - 2\mu \left[1 - \frac{b_y^2}{a_y^2} \sqrt{\frac{\frac{b_y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_y^2}}{1 + \frac{z^2}{a_y^2}}} + \frac{z}{a_y} \left(\frac{a_y^2}{b_y^2} L - K \right) \right] \right\}; \\ \sigma_y &= -P_0 \frac{b_y}{a_y} \left\{ \frac{1 + \frac{z^2}{a_y^2} \left(2 \frac{b_y^2}{a_y^2} - 1 \right)}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a_y^2}} \sqrt{\frac{b_y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_y^2}}} - 2 \frac{z}{a_y} \left(\frac{a_y^2}{b_y^2} L - K \right) - 1 + 2\mu \left[1 - \frac{b_y^2}{a_y^2} \sqrt{\frac{\frac{b_y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_y^2}}{1 + \frac{z^2}{a_y^2}}} + \frac{z}{a_y} (L - K) \right] \right\}; \\ \sigma_z &= -P_0 \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{z^2}{a_y^2} \right) \left(1 + \frac{z^2}{b_y^2} \right)}}. \end{aligned} \quad (19)$$

У формулах для σ_x і σ_y фігурують еліптичні інтеграли першого

$$K(e, \theta) = \int_0^\theta \frac{d\theta}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}}$$

і другого роду

$$L(e, \theta) = \int_0^\theta \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

залежні від параметра $\theta = \operatorname{arccctg} z/a_y$ і ексцентриситету еліпса $e = \sqrt{1 - (b_y/a_y)^2}$. Далі з урахуванням [21] з (19) отримаємо

$$\sigma_r = \frac{2}{3} \frac{P}{\pi a_y b_y} \sqrt{\frac{1}{2 P_o^2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]}. \quad (20)$$

Таблиця 1. Глибина наклепу поверхневого шару валу діаметром 220 мм із сталі 40, обкатаного із зусиллям 50,0 кН

Геометричні розміри ролика, мм	r_p	10	18	100	-	-	-
	D_p	105	105	105	5	12,5	32
Приведена кривизна, мм ⁻¹		0,128	0,083	0,035	0,2	0,16	0,053
Розміри пластичного відбитка, мм	a	4,3	3,8	5,1	12,5	11,5	12
	b	2,15	2,65	2,9	0,6	1	1,65
Ступінь наклепу ¹		$\frac{0,40}{1,05}$	$\frac{0,37}{0,8}$	$\frac{0,21}{0,67}$	$\frac{0,60}{1,3}$	$\frac{0,41}{1,13}$	$\frac{0,32}{0,9}$
Розкид початкових властивостей ² , %		$\frac{0,14}{12,5}$	$\frac{6,2}{14,0}$	$\frac{8,6}{9,5}$	$\frac{12,4}{13,0}$	$\frac{9,2}{13,6}$	$\frac{11,3}{11,0}$
Глибина наклепу X_o , мм	номінальна	$\frac{6,18}{8,01}$	$\frac{6,3}{8,08}$	$\frac{4,93}{7,44}$	$\frac{2,49}{3,12}$	$\frac{3,45}{4,82}$	$\frac{4,41}{6,16}$
	найбільша	$\frac{8,0}{8,67}$	$\frac{8,0}{9,8}$	$\frac{6,6}{8,05}$	$\frac{3,05}{3,62}$	$\frac{4,34}{6,05}$	$\frac{6,75}{7,73}$
	найменша	$\frac{5,0}{7,77}$	$\frac{5,12}{7,4}$	$\frac{3,9}{7,2}$	$\frac{2,22}{2,74}$	$\frac{3,01}{4,26}$	$\frac{3,58}{5,6}$
95%-ий довірчий інтервал, %		$\frac{48}{11,2}$	$\frac{48}{29,7}$	$\frac{58}{11,4}$	$\frac{32}{30}$	$\frac{38}{36}$	$\frac{75}{36}$
$K\sigma_{0,2}$		1,3	1,28	1,5	1,25	1,35	1,40
Теоретична глибина наклепу, мм	по С.Г. Хейфецу [17]	7,9	7,8	8,1	-	-	-
	по И.В. Кудрявцеву і Г.Е. Петушкову [19]	5,1	4,2	2,87	-	-	-
	по М.С. Дрозду [20]	7,15	6,55	5,95	-	-	-
	по М.С. Дрозду [20]	6,75	6,70	6,56	-	-	-
	по А.Г. Черному [24]	8,83	8,83	9,1	-	-	-
	по В.М. Браславському [5]	7,2	7,2	6,88	3,4	3,3	2,1
	по розрахунках авторів	7,8	7,7	7,2	3,2	4,07	3,8

¹ В чисельнику $\Delta HV/HV$, в знаменнику $\Delta \sigma_{0,2}/\sigma_{0,2}$;

² В чисельнику HV , в знаменнику $\sigma_{0,2}$.

Позначивши корінь символом A , остаточно

Отримаємо

$$\frac{P}{a_y b_y \sigma_T} = \frac{2 \pi}{3 A}. \quad (21)$$

На рис. 16 приведена залежність $P/a_y b_y \sigma_T$ і t/b_y для різних відношень b_y/a_y . Розміри напівосей a_y , b_y еліпса контактної ділянки розрахуємо по формулах [21]

$$\left. \begin{aligned} a_y &= n_a \sqrt[3]{\frac{2}{3} \frac{\eta P}{\sum K}}; \\ b_y &= n_b \sqrt[3]{\frac{2}{3} \frac{\eta P}{\sum K}}; \\ \eta &= \frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2}, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

де μ_1 і μ_2 , E_1 і E_2 відповідно коефіцієнти Пуассона і модулі Юнга матеріалу відповідно ролика і деталі.

Чисельні значення коефіцієнтів n_a і n_b залежно від ω для різних геометричних розмірів ролика і деталі приведені в табл. 2 [21].

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів, що входять у вирази для напівосей ділянки контакту

ω	n_a	n_b	ω	n_a	n_b	ω	n_a	n_b
0,01923	1,013	0,9873	0,5560	1,578	0,6876	0,9077	3,199	0,4524
0,03949	1,027	0,9742	0,5702	1,603	0,6801	0,9113	3,253	0,4484
0,06087	1,042	0,9606	0,5848	1,631	0,6723	0,9150	3,311	0,4442
0,0835	1,058	0,9465	0,5999	1,660	0,6642	0,9187	3,373	0,4398
0,1075	1,076	0,9318	0,6155	1,6393	0,6557	0,9225	3,441	0,4352
0,133	1,095	0,9165	0,6317	1,729	0,6468	0,9264	3,514	0,4304
0,1602	1,117	0,9005	0,6486	1,768	0,6374	0,9303	3,594	0,4253
0,1894	1,141	0,8837	0,6662	1,812	0,6276	0,9342	3,683	0,4199
0,2207	1,168	0,8660	0,6845	1,861	0,6171	0,9383	3,781	0,4142
0,2545	1,198	0,8472	0,7037	1,916	0,6059	0,9425	3,890	0,4080
0,2913	1,233	0,8271	0,7238	1,979	0,5938	0,9467	4,014	0,4014
0,3314	1,274	0,8056	0,7449	2,053	0,5808	0,9511	4,156	0,3942
0,3755	1,322	0,7822	0,7673	2,141	0,5665	0,9556	4,320	0,3864
0,4245	1,381	0,7565	0,7911	2,248	0,5505	0,9601	4,515	0,3777
0,4795	1,456	0,7278	0,8166	2,381	0,5325	0,9649	4,750	0,3680
0,4914	1,473	0,7216	0,8300	2,463	0,5224	0,9698	5,046	0,3568
0,5036	1,491	0,7152	0,8441	2,557	0,5114	0,9749	5,432	0,3436
0,5161	1,511	0,7086	0,8587	2,669	0,4993	0,9803	5,976	0,3273
0,5291	1,532	0,7019	0,8741	2,805	0,4858	0,9861	6,837	0,3058
0,5423	1,554	0,6949	0,8904	2,975	0,4704	0,9923	8,609	0,2722

З метою врахування кривизни пластично деформованої поверхні у виразах $P/a_y b_y \sigma_T$ і t/b_y значення a_y , b_y визначені по дійсних розмірам пластичного відбитка [5]. Проте при отриманні вказаних вище виразів не враховані зміни властивостей матеріалу в процесі пластичної деформації, не врахований також вплив залишкових напружень, що виникають в деформованому поверхневому шарі і що складаються з робочими напруженнями при повторному навантаженні. Вказані допущення приводять до занижених результатів глибини наклепу. Результати розрахунку глибини наклепу по рекомендаціях роботи [5] поміщені в табл. 1.

Контрольні питання:

1. Уявлення про глибину наклепаного шару?
2. Як розраховувати глибину наклепу для кругових і близьких до них пластичним відбиткам?
3. Розкажіть про метод дослідження за допомогою фотопружності для дослідження контактних напружень?
4. Як розрахувати глибину наклепу для витягнутих відбитків?

Лекція 5. Експериментальні методи визначення глибини пластичної деформації

1. Випробування мікрорізків, вирізаних з поверхневого шару, на розрив
2. Статистична обробка результатів випробувань мікрорізків на розрив
3. Оцінка глибини наклепаного шару по вимірюванню твердості, умовної межі текучості і межі міцності
4. Порівняльний аналіз точності визначення глибини наклепаного шару різними методами

5. Перевірка точності визначення глибини наклепу втискуванням пунсонов різної кривизни в роз'ємні зразки

Найдоступнішим експериментальним методом дослідження глибини і ступеня наклепу при ППД є вимірювання твердості по Вікерсу в поперечному або похилому перерізах зміцненої деталі. Більш повне уявлення про механічні властивості поверхневого шару можна отримати на основі випробування на розрив зразків, вирізаних з деталі на різній відстані від поверхні. Такі випробування малих плоских зразків товщиною 0,2...0,4 мм були виконані на машині П. Шевенара [34], на якій проводиться оптичний діаграмний запис на фотоплівці залежності деформації зразка від навантаження. Зразки виготовляють за наступною технологією. Обкатаний вал розрізають на циліндрові відрізки відповідно кількості досліджуваних режимів. Кожний такий відрізок, обкатаний з певним режимом, підрізають по торцю в зоні стабільного процесу обкатування і ексцентрично обточують на довжині, відповідній розміру мікрозразків.

Величину ексцентриситету вибирають так, щоб знов утворена поверхня з одного боку залишилася дотичною до обкатаної поверхні, а на іншій стороні диска поглибилася явно нижче деформованого шару. Знов утворена таким чином при обточуванні циліндрова поверхня зберігає обкатану смужку шириною 10 - 12 мм. Потім вал розточують на глибину, рівну довжині обточування, до тих пір, поки не залишиться тонке кільце, з якого і вирізують мікрозразки для механічних випробувань. З кожної обкатаної ділянки вирізують по два кільця - одне шириною 27,5 мм для подовжніх (осьових) і друге шириною 9 мм для поперечних (кругових) зразків. Половина широкого кільця після розмітки і нанесення маркіровки розрізає на 30 темплетів, які потім рівномірно шліфують з двох сторін на плоскошліфувальному верстаті до виведення слідів попереднього обточування.

На вузькому кільці, після розмітки і маркіровки, з використанням ділильної головки шліфують 24 лиски завдовжки 6 - 7 мм. Це забезпечує необхідне прилягання темплетів, вирізаних надалі з кільця, до поверхні магнітної плити при їх подальшому шліфуванні. Потім в спеціальному кондукторі свердлять і розгортають два отвори діаметром 3Н7 для кріплення майбутніх зразків в захватах випробувальної машини. Ці отвори слугують також базою для подальшого шліфування профілю зразків, при якому пакет з декількох зразків закріплюють в другому кондукторі. Після шліфування їх полірують тонкими шкурами зернистістю МЗ до виведення слідів попередньої обробки. Шорсткість шийки зразка повинна бути $R_a = 0,08 \dots 0,16$ мкм, що відповідає вимогам, вказаним в [35].

Ширина і товщина шийки зразків вимірюється мікрометром важеля з ціною ділення шкали 0,002 мм. Відстань осевих перерізів зразків від поверхні визначають кутовим розташуванням зразків щодо центру кільця:

$$h = \frac{D_d}{2} - \sqrt{\frac{D_d^2}{2} - (D_d t' - (t')^2) \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} + b_k - \frac{B}{2} - \Delta},$$

де t' - повна товщина досліджуваного шару; α_0 - координатний кут зразка; b_k - товщина кільця; B - товщина зразка; Δ - припуск на шліфування з внутрішньої сторони кільця.

При розрізанні кільця на n заготовок рівної ширини $\alpha_0 = 2\pi/n(N - 1)$, де N - номер зразка від 1 до n . З урахуванням площі поперечного перерізу зразків і їх умовної межі міцності вибирають шини із зусиллям 0,50 і 1,0 кН. На одній плівці звичайно записують декілька діаграм. Перед кожним записом початок координат діаграми зсовують по горизонталі на декілька міліметрів. Якщо на діаграмах відсутня ділянка текучості, то як характеристика приймають умовну межу текучості $\sigma_{0,2}$. Зміна механічних характеристик σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ і $10/40$ HV по глибині наклепаного шару при різних режимах обкатування показано на рис. 17.

Тут твердість по Вікерсу при навантаженні 0,10 кН, вал із сталі 40, обкатаний із зусиллям 50,0 кН. З графіків видно, що обкатування за звичайною технологією роликами діаметром 105 мм підвищує поверхневу твердість (10/40 HV) від 185 до 230 - 270 (залежно від профільного радіусу), тобто на 23 - 50 %. Чим менше профільний радіус ролика, тим більше поверхнева твердість металу.

Застосування циліндричних роликів малого діаметра збільшує ступінь наклепу за рахунок великої кривизни ролика в поперечному перерізі.

Залежність ступеня наклепу по приросту твердості 10/40 HV від приведеної кривизни ролика і деталі ΣK близька лінійній (див. рис. 18, *a*). Умовна межа текучості і межа міцності поверхневого шару при обкатуванні роликами підвищується, а відносне подовження відповідно знижується. Найбільша зміна зазнає межу текучості, яка зросла на зразку, обкатаному роликом ($r_p = 10$, $D_p = 105$), удвічі (400 - 820 МПа) при відповідному прирості твердості лише на 40 % (185 - 260). Межа міцності збільшилася у меншій мірі, його підвищення приблизно відповідає зростанню твердості. Більшою мірою знижуються пластичні властивості поверхневого шару обкатаних валів. Відносне подовження знизилося в 2 - 3 рази.

Слід підкреслити, що на зразках, обкатаних тороподібними роликами (див. рис. 17, *a - в*), при наближенні до обкатуваної поверхні спостерігається деякий спад $\sigma_{0,2}$, зміряного в осьовому напрямі, що підтверджує точку зору про максимум залишкових напружень в підшаровій області, в зоні „глибинної текучості” [36].

Приведені на рис. 17 результати визначення глибини наклепу по змінах твердості 10/40 HV і умовної межі текучості металу наклепаного шару статистично оброблені по критерію Колмогорова [37] і методом малих вибірок. Вибірки об'ємом 5 - 10 вимірів були узяті з інтервалом 0,5 мм по глибині від поверхні деталі. Однорідність механічних

властивостей по глибині перевірена гіпотезою рівності дисперсій вибірок за допомогою критерію Фишера [38]. Однорідність дисперсій вибірок перевірена за допомогою критерію Бартлета [39]. Гіпотези рівності і однорідності дисперсій вибірок всіх досліджених зразків підтверджені з вірогідністю $P = 0,95$. При визначенні глибини наклепу, оцінюваної по початку зміни $10/40\ HV$ і $\sigma_{0,2}$ деформованого шару, і оцінці точності визначення його глибини застосований нелінійний регресійний аналіз.

Як в якості лінії регресії узяті функції [40]

$y = a_1 + b_1 + b_2 x^m$ і $y = a_1 + b_1 + b_2 \lg x$, де y - твердість або межа текучості; x - відстань точки виміру від поверхні деталі. Коефіцієнти a_1 , b_1 , b_2 ліній регресії оцінювалися відповідно до методу якнайменших квадратів [41].

В якості глибини зміни механічних характеристик прийнята абсциса точки екстремуму лінії регресії (точки сполучення лінії регресії з горизонталлю на рівні початкових механічних властивостей), для якої розраховані довірчі інтервали. Значення абсциси точки екстремуму x_0 для випадку параболічної лінії регресії визначиться з умови

$$\frac{dy}{dx} = b_1 + mb_2 x^{(m-1)} = 0; \quad x = x_0 = \sqrt[m-1]{-\frac{b_1}{mb_2}}. \quad (23)$$

Можна вважати, що $Z = b_1 + mb_2 \xi^{(m-1)}$ розподіляється нормально з середнім значенням $\bar{Z} = 0$ і дисперсією

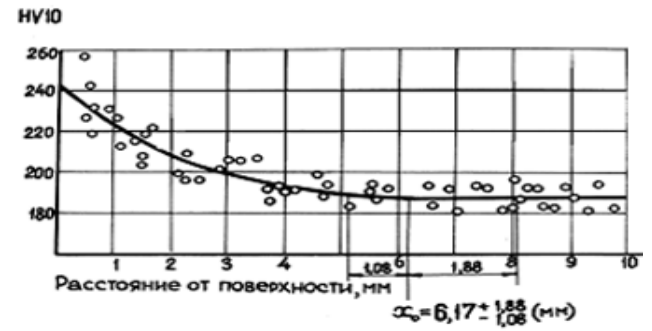
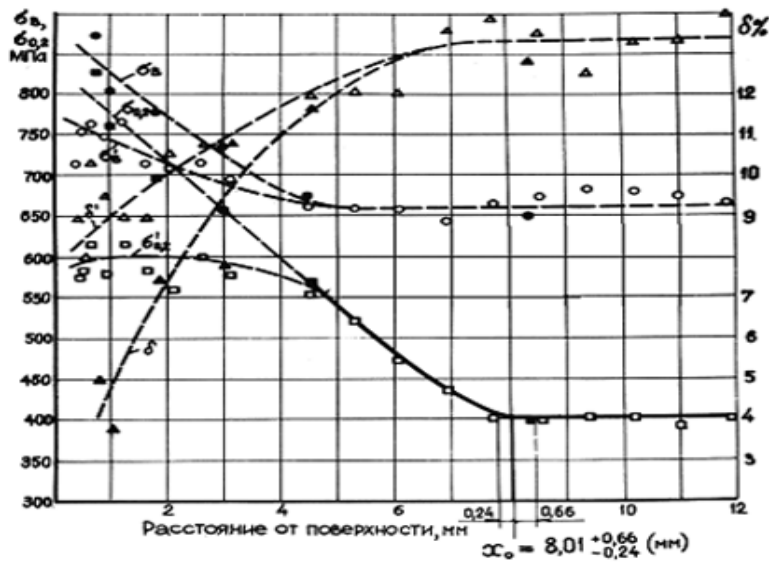
$$s_z^2 = s_{b_1}^2 + s_{b_2}^2 m^2 \xi^{2(m-1)} + 2s_{b_1 b_2} m \xi^{(m-1)}$$

отже відношення Z/s_z має t - розподіл з $k = n - 3$ ступенями свободи [41]. Тут ξ - теоретична абсциса максимуму; n - число пар значень y і x . З урахуванням попереднього запишемо нерівність

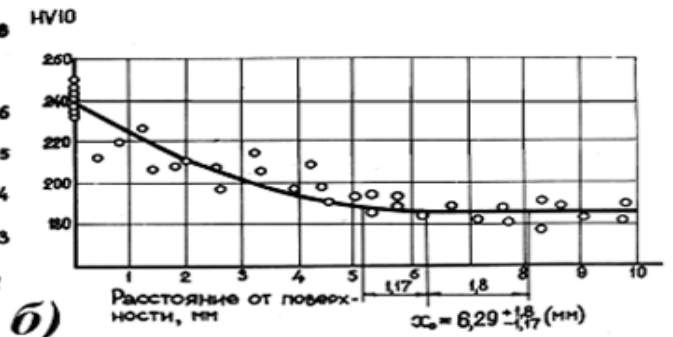
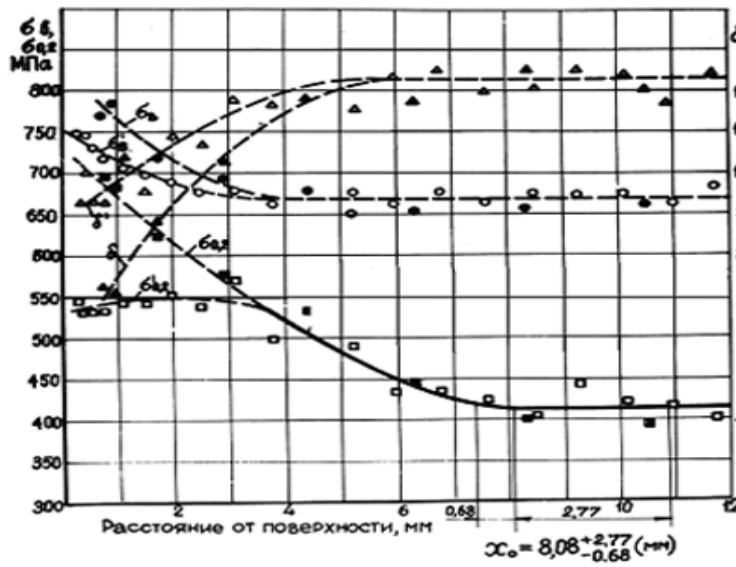
$$|Z|/s_z < A, \quad (24)$$

де число A представляє собою двосторонню 95 % - ву межу для t розподілу Стюдента з k ступенями свободи [38].

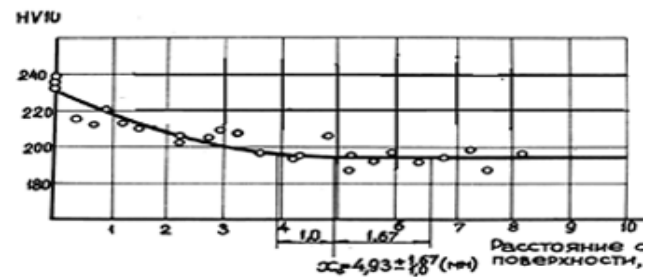
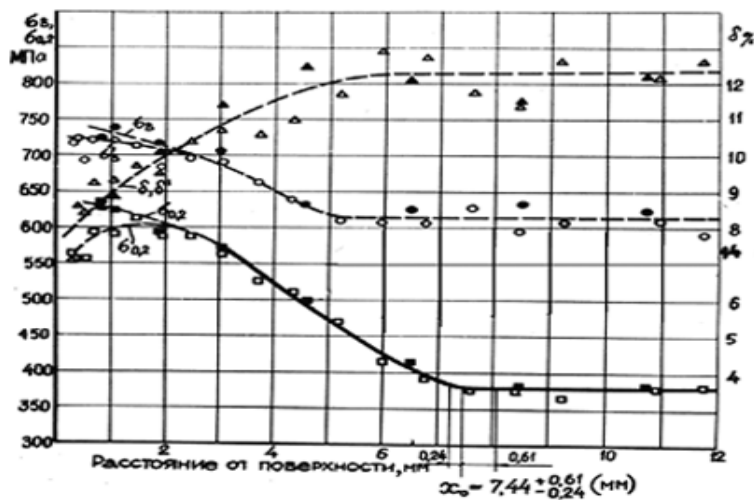
Підставивши значення Z і s_z в нерівність (24), отримаємо



a)



б)



в)

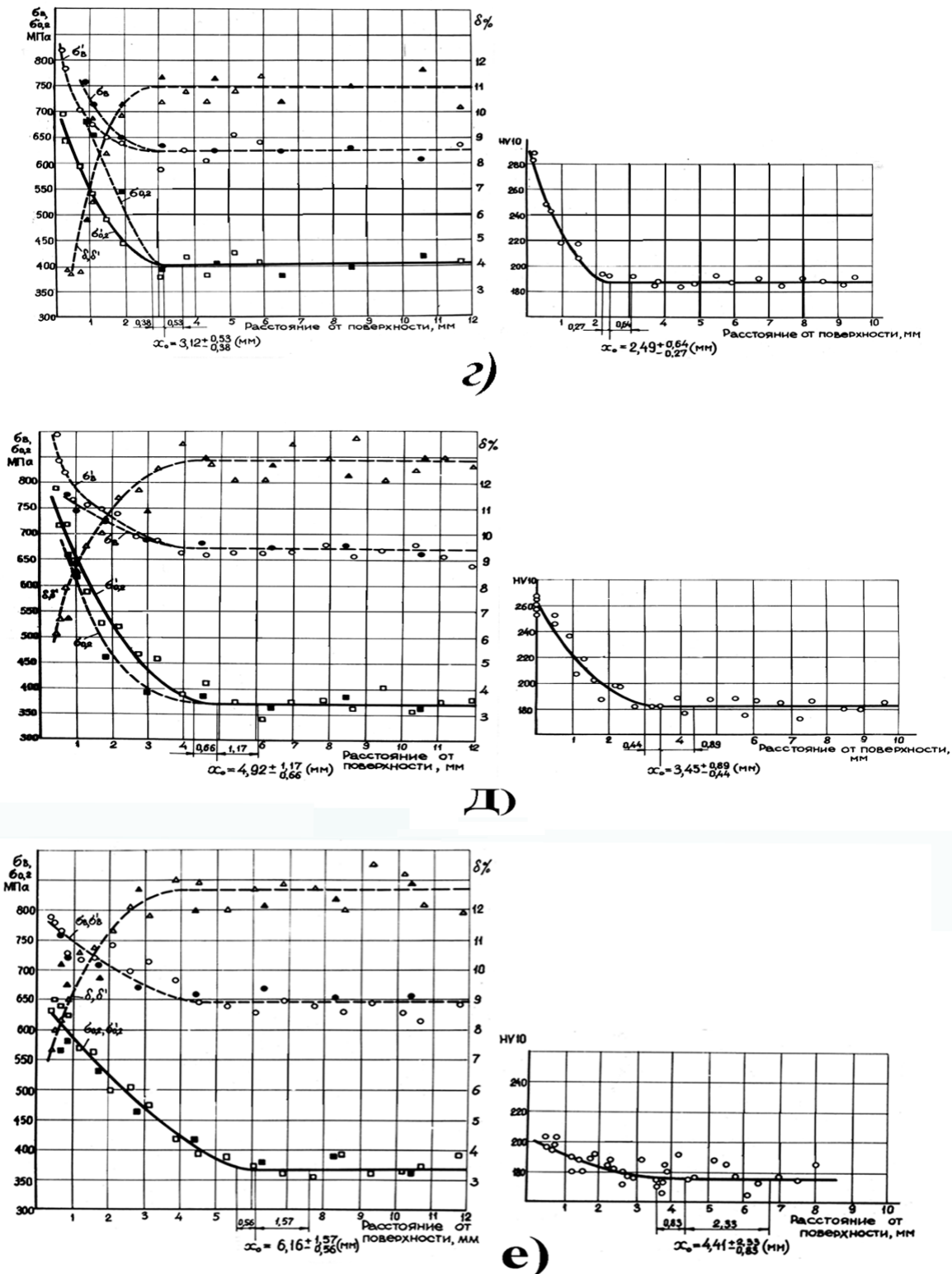


Рис.17. Механічні характеристики поверхневого шару валів, обкатаних тороподібними (а – в) і циліндровими (г – е) роликами: а – $D_p = 105$ мм, $r_p = 10$ мм; б – $D_p = 105$ мм, $r_p = 18$ мм; в – $D_p = 105$ мм, $r_p = 100$ мм; г – $D_p = 5$ мм; д – $D_p = 12$ мм; е – $D_p = 32$ мм; $\sigma_e, \sigma_{0.2}, \delta, \sigma'_e, \sigma'_{0.2}, \delta'$ – характеристики в круговому і осьовому напрямках

$$\frac{|b_1 + mb_2 x^{(m-1)}|}{\sqrt{s_{b_1}^2 + s_{b_2}^2 m^2 \xi^{2(m-1)} + 2s_{b_1 b_2} m \xi^{(m-1)}}}. \quad (25)$$

Рішення нерівності (25), що приводить до рівняння 2 (m - 1) ступені відносно ξ , дає довірчі межі для ξ :

$$(m^2 b_2^2 - A^2 s_{b_2}^2) \xi^{2(m-1)} + (2b_1 b_2 - 2A s_{b_1 b_2} m) \xi^{(m-1)} + b_1^2 - A^2 s_{b_1}^2 = 0$$

звідки маємо

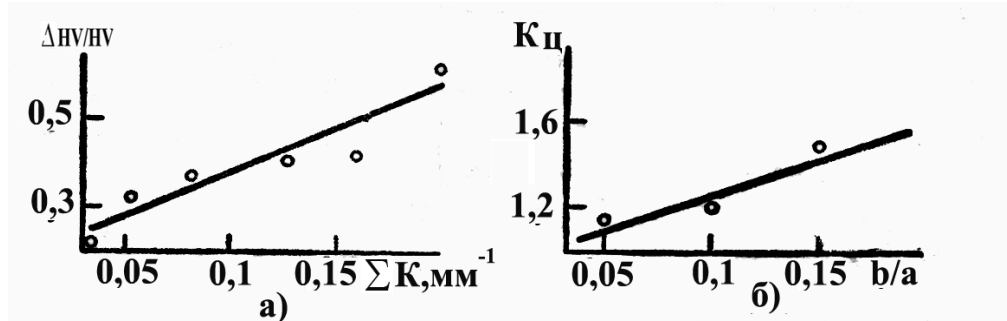


Рис.18. Залежність ступеня наклепу по твердості від приведеної кривизни (а) і відношення експериментальної глибини наклепу до теоретичної від форми прямолінійного відбитка (б)

$$\xi_{1,2} = \sqrt{\frac{A s_{b_1 b_2} - b_1 b_2 \pm \sqrt{(b_1 b_2 - A s_{b_1 b_2} m)^2 - (b_2^2 - A^2 s_{b_2}^2)(b_1^2 - A^2 s_{b_1}^2)}}{m(b_2^2 - A^2 s_{b_2}^2)}}. \quad (26)$$

Приблизно стандартне відхилення глибини зміни механічних властивостей з урахуванням (23) можна розрахувати по формулі [41]

$$\left(\frac{s_{x_0}}{x_0}\right)^2 \approx \left(\frac{s_{b_1}}{b_1}\right)^2 \left(\frac{1}{m-1}\right)^2 + \left(\frac{s_{b_2}}{b_2}\right)^2 \left(\frac{1}{m-1}\right)^2 - 2 \left(\frac{2}{m-1}\right)^2 \frac{s_{b_1 b_2}}{b_1 b_2}$$

або

$$\frac{s_{x_0}}{x_0} \approx \frac{1}{m-1} \sqrt{\left(\frac{s_{b_1}}{b_1}\right)^2 + \left(\frac{s_{b_2}}{b_2}\right)^2 - 2 \left(\frac{s_{b_1 b_2}}{b_1 b_2}\right)}. \quad (27)$$

Глибина зміни механічних характеристик і її довірчі інтервали для випадку логарифмічної лінії регресії визначаються з виразів

$$\frac{dy}{dx} = b_1 + b_2 \frac{0.43429}{x} = 0; \quad x = x_0 = -\frac{b_2}{b_1} 0.43429. \quad (28)$$

Вважаємо, що $Z = b_1 + b_2 \frac{0.43429}{\xi}$ розподіляється нормально з середнім значенням $\bar{Z} = 0$ і дисперсією

$$s_z^2 = s_{b_1}^2 + s_{b_2}^2 \frac{0.43429^2}{\xi^2} + 2s_{b_1 b_2} \frac{0.43429}{\xi}.$$

Рішення нерівності $|Z|/s_z < A$ приводить до рівняння другого ступеня відносно ξ :

$$\frac{0.43429}{\xi} (b_1^2 - A^2 s_{b_1}^2) + \frac{0.43429 \cdot 2}{\xi} (b_1 b_2 - A^2 s_{b_1 b_2}) + (b_2^2 - A^2 s_{b_2}^2) = 0.$$

Звідси слідує

$$\xi_{1,2} = \frac{0.43429 (b_2^2 - A^2 s_{b_2}^2)}{A^2 s_{b_2 b_1} - b_2 b_1 \pm \sqrt{(A^2 s_{b_2 b_1} - b_2 b_1)^2 - (b_1^2 - A^2 s_{b_1}^2)(b_2^2 - A^2 s_{b_2}^2)}}. \quad (29)$$

Стандартне відхилення значення x_0 розраховується з урахуванням [41] по формулі

$$\left(\frac{s_{x_0}}{x_0} \right)^2 \approx \left(\frac{s_{b_1}}{b_1} \right)^2 + \left(\frac{s_{b_2}}{b_2} \right)^2 - 2 \frac{s_{b_1 b_2}}{b_1 b_2}. \quad (30)$$

При регресійному аналізі значення коефіцієнтів рівняння лінії регресії і абсциси точки екстремуму спочатку розраховували по формулах методу якнайменших квадратів, потім по (23) або (28) - з урахуванням механічних характеристик, істотно відмінних від початкових. Після того, як точки виміру початкових характеристик були зсунуті у напрямі осі x до збігу їх абсцис з абсцисою точки екстремуму лінії регресії, рішення проводили знову вже з урахуванням перетворених таким чином вимірів початкових механічних характеристик. Рішення повторювали до тих пір, поки різниця між абсцисами точок екстремуму двох останніх ліній регресії не перевищувала наперед заданого числа, рівні 0,01 мм. Коефіцієнт параболічної лінії регресії приймав значення 2 - 25. Зі всіляких ліній регресії вибирали лінію, що має якнайменшу залишкову дисперсію s^2 . Кращою лінією регресії виявилася параболічна залежність.

Довірчі межі і стандартні відхилення глибини зміни механічних характеристик розраховувалися відповідно по формулах (26), (29) і (27), (30). Результати регресійного аналізу приведені в табл. 1. Як видно, 95 %-ві довірчі інтервали на глибину наклепу, розраховані за наслідками вимірів умовної межі текучості, складають 11 - 36 % глибини наклепу, а за наслідками вимірювань твердості, визначуваної методом Вікерса, - 32 - 75 %. Для всіх випробовуваних зразків гіпотеза рівності середніх значень глибини наклепу, визначених за наслідками вимірів твердості і межі текучості, перевірена по критерію Стюдента, не підтвердилася. Глибина наклепу, визначена по змінах умовної межі текучості, на 25 - 50 % більше глибини, визначеної по змінах твердості. Відмінність зростає із зменшенням приведеної кривизни ролика і деталі. Значення коефіцієнта $k_{\sigma_{02}}$, характеризуючого цю відмінність, приведені в табл. 1.

Відмінність глибини наклепу, визначеної по HV і $\sigma_{0,2}$, обумовлено тим, що при одному і тому ж ступені деформації умовна межа текучості зростає більшою мірою, ніж твердість, тобто межа текучості є більш чутливою механічною характеристикою для визначення глибини пластичної деформації, ніж твердість.

Раніше встановлене відношення товщини шару із стискуєчими залишковими напруженнями до глибини наклепу по твердості знаходиться в межах 1,2 - 1,5 [5], що відповідає значенням коефіцієнта $k_{\sigma_{02}}$. Можна вважати, що глибина залягання стискаючих напружень близька глибині наклепу, визначеній по межі текучості.

При порівнянні результатів розрахунку глибини наклепу по (9), (10), (14), по методиках [5, 24] і по теорії середніх дотичних напружень (див. табл. 1) з результатами експериментальної її перевірки отримані наступні дані. Не знайдено статистичної відмінності по критерію Стюдента між глибиною наклепу, розрахованою по [17], і визначеної експериментально по межі текучості для випадку обкатування валу тороподібними роликами з профільними радіусами 10 і 18 мм, не

дивлячись на те, що для цих випадків приведена кривизна в контактi мала: відповідно 0,128 і 0,835 мм⁻¹. Немає відмінності також між глибиною наклепу по межі текучості і по розрахунку відповідно до теорії середніх дотичних напружень для всіх тороподібних і циліндричних роликів діаметром 5 мм при $b/a < 0,05$. У всій решті випадків суттєва відмінність.

Значна розбіжність результатів розрахунку по теорії середніх дотичних напружень для циліндричних роликів діаметрами 12,5 і 32 мм при $b/a > 0,05$ пояснюється тим, що в теорії пружності при виведені залежності головних напружень під прямокутним відбитком застосований граничний перехід, що припускає, що в зіткненні знаходяться циліндри необмеженої довжини. Ймовірно, що при вдавлюванні короткого циліндрового ролика, для якого $b/a = 1$, глибина пластичної деформації трохи відрізнятиметься від розрахункової по [17] для зосередженої сили.

Відношення глибини наклепу, визначеної експериментально по межі текучості для прямолінійного відбитка, до розрахункової глибини позначимо символом k_y . Залежність k_y від відношення напівосей пластичного відбитка b/a показана на рис. 18, б.

Отже, при обкатуванні циліндричними роликами великої довжини, коли $b/a < 0,05$, глибину наклепу можна розраховувати по формулах теорії пружності для прямокутного відбитка. Із зменшенням довжини прямолінійної створюючої ролика $2a$, коли $b/a > 0,05$, розрахункову глибину наклепа необхідно помножити на k_y . Напівширина пластичного відбитка b визначається експериментально вдавлюванням ролика або розраховується по $b = D_p \varphi$, в якій кут φ залежно від необхідного ефекту обкатування можна прийняти рівним 2,5 або 5°.

Глибину пластичної деформації при вдавлюванні в сталеві деталі пуансонів з різною приведеною кривизною експериментально можна досліджувати за допомогою вимірювання деформації сіток, нанесених в

перетині зразка. Ортогональну сітку, утворену двома сімействами паралельні прямих з базою 1 мм, наносили за допомогою різця на координатному верстаті в осьовому роз'ємі п'яти конічних зразків з діаметром більшої підстави 100 мм (рис. 19). Половинки зразків збирають на штифтах, остаточно обточують і притирають по конічній поверхні товстостінної загартованої обойми. У верхній торець зразків, запресованих в обойму, вдавлюють пуансони різної кривизни, моделюючі ролики різної форми. Ця методика перевірена при випробуванні трьох пуансонів з сферичною робочою поверхнею радіусом 6,25; 25 і 100 мм і пуансоном з тороподібною поверхнею, що має головні радіуси кривизни 6,25 і 100 мм. Параметр ω для тороподібного пуансона, розрахований у відповідності з [5], рівний 0,88235, $b_y/a_y = 0,165$, де b_y і a_y знайдені з (22) з урахуванням даних табл.2. Останнім пуансоном деформували два зразки. На одному з них велика вісь еліпса відбитка розташовувалася по роз'єму, на другому - перпендикулярно йому. Пуансони в зразки вдавлювалися на пресі. На стіл преса встановлювалася обойма з вкладеним в її конічне розточування зразком, половинки якого були зібрані з штифтом. Через мідну прокладку зразок запресовувався в обойму із зусиллям більшим, ніж випробувальне зусилля вдавлювання пуансона. Потім на обойму встановлювалися центруюча втулка і пуансон. Пуансони вдавлювалися із зусиллями 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 63; 125; 250 і 500 кН. Після кожного вдавлювання відбиток вимірювався, потім обойму перевертали і зразок випресовували для фотографування координатної сітки. Для полегшення випресовки конічну поверхню зразків перед установкою в обойму покривали тонким шаром графітизованого мастила.

Зразки фотографувалися камерою з подвійним розтягуванням, що забезпечувало отримання знімків, відтворюючих натурні розміри координатної сітки. Всі знімки були зроблені при одній і тій же настройці камери і при установці зразків в строго однаковій позиції. Для

зменшення усадки фотокопії виконувалися на матовому папері. Не дивлячись на всі вжиті заходи, така методика все ж таки не гарантує деяку відмінність розмірів, одержуваних на знімках.

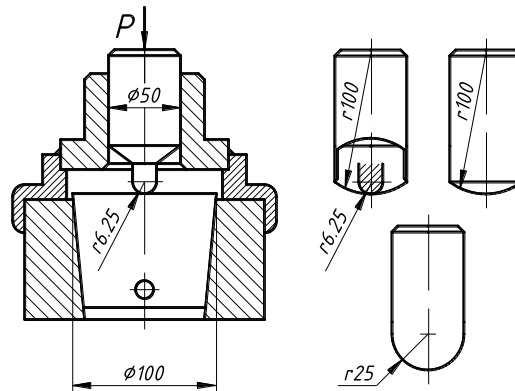


Рис.19. Пристрій для вивчення пластичної деформації по спотворенню сітки при вдавлюванні пуансонів в зразок

Тому одночасно із зразками кожного разу фотографували міліметрову масштабну лінійку, встановлену в площині роз'єму зразка. Перші знімки всіх зразків були зроблені до початку вдавлювання пуансонів. Деформація сітки ставала помітною у зразків, деформованих пуансонами 6,25/6,25; 25/25 і 6,25/100 (радіус 6,25 мм в площині роз'єму) і 100/6,25 (радіус 6,25 мм в площині, перпендикулярній роз'єму) із зусиллям 8 кН і більше, а у зразка з пуансоном 100/100 - після 16 кН.

Пуансон 6,25/6,25 не вдалося втиснути із зусиллям 500 кН внаслідок дуже великого його проникнення в метал. Вдавлювання припинялося при навантаженні 280 кН. При навантаженні 500 кН зразки, окрім місцевої деформації в зоні контакту з пуансоном, отримали помітну залишкову деформацію у всьому об'ємі, що виразилася в зменшенні їх зовнішнього діаметра і викривленні верхнього торця. Глибина розповсюдження і ступінь пластичної деформації зразків визначалися по зміні розмірів сітки. Виміри виконували на інструментальному мікроскопі по відбитках у відображеному світлі з точністю до 0,01 мм. При цьому заздалегідь виміряли сфотографовану

лінійку і визначали поправку, що враховується надалі. Істинну деформацію в двох взаємно перпендикулярних напрямках визначали по формулі
$$\varepsilon = \int_{l_1}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}.$$

По максимальному і мінімальному істинних подовженнях сторін початкових квадратів координатної сітки розраховували максимальний зсув g , який приймали як міру ступеня деформації, $g = e_{max} - e_{min}$. Зміна g по глибині зразків, побудоване для різних зусиль вдавлювання, приведено на рис. 20, *a* - *в*. На рис. 20, *г* видна залежність глибини деформації від зусилля, віднесеного до межі текучості сталі 20, з якої

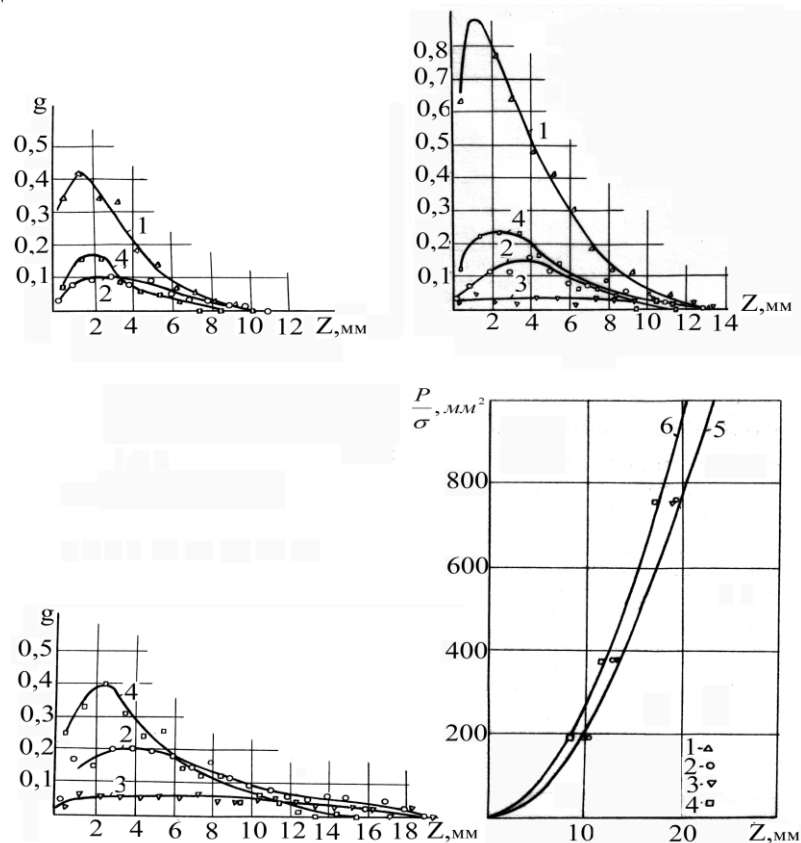


Рис. 20. Залежність ступеня деформації зразків P/σ_T від глибини деформації: 1 - радіуси кривизни пуансона 6,25/6,25; 2 - те ж 25/25; 3 - те ж 100/100; 4 - те ж 6,25/100 мм; 5 - теоретична крива, розрахована по (9) для кругових відбитків; 6 - теоретична крива, розрахована по теорії середніх дотичних напружень для еліптичних відбитків

виготовлені зразки. Крапки 1 - 4 означають експериментальні значення глибини деформації, розраховані за даними рис. 20, a - b . Крива 5 отримана по (9) для кругових відбитків, крива 6 - по теорії середніх дотичних напружень (див. (19) - (22) і табл. 2) для витягнутих відбитків при $b/a = 0,165$. Зміна форми пуансона на тороподібну, даючи відбиток з відношенням осей еліпса 0,165, привело до істотного зменшення глибини деформації, що склало 10 - 12,5 %. Експериментальні значення глибини деформації зменшуються в порівнянні з теоретичними при збільшенні зусилля вдавлювання.

Контрольні питання:

1. Розкажіть о технології вирізки і виготовлення мікрорізків для випробування на розрив?
2. Якими кривими виконувалась апроксимація результатів вимірювання твердості HV і механічних властивостей $\sigma_{0,2}$, σ_B мікрорізків?
3. Як розрахувати довірчий інтервал визначення глибини наклепу по $\sigma_{0,2}$?
4. Розкажіть о порівняльному аналізі точності визначення глибини наклепаного шару?
5. Як проводилась перевірка точності визначення глибини наклепу по $\sigma_{0,2}$?

Лекція 6. Мікроструктура зміцненого шару

1. Аналіз мікротвердості поверхневого шару
2. Мікроструктура поверхневого шару
3. Електронна структура поверхневого шару

Вплив режимів обкатування роликми на зміну мікроструктури оброблюваних металів (валів із сталі 40 після нормалізації, що має перліто-феритну структуру) досліджений при обкатуванні циліндричними роликми малого діаметра і тороподібними роликми. На дев'яти зразках з різним ступенем деформації (табл. 3) вимірювалася мікротвердість структурних складових в поперечному перерізі обкатаного валу [42].

Таблиця 3. Мікротвердість зразків із сталі 40, обкатаних роликми із зусиллям 50 кН

Номер зразка	Відстань середнього перерізу від поверхні валу, мм	Форма ролика	D_p , мм	r_p , мм	$\varphi_{ср}$, град	$5HV\ 10^{-1}$, МПа	$\frac{\Delta 5HV}{5HV}$, %	$H\mu\ 10^{-1}$, МПа	$\frac{\Delta H\mu}{H\mu}$, %
1	0,42	Тор	105	10	13	232	135	150/100	123/100
2	2,59					208	121	90/136	106/100
3	4,49					190	110	85/140	100/100
4	7,72					183	106	85/138	100/100
5	16,42					172	100	85/140	100/100
6	0,36			100	3	216	127	85/140	100/100
7	16,27					170	100	85/136	100/100
8	0,21	Циліндр, $l_p=25$ мм	5		7	278	162	119/180	140/128
9	16,25					170	100	85/136	100/100

Примітка. Перед межею приведені значення для фериту, після межі - для перліту, при навантаженні 0,40 Н.

¹ Остаточне стоншування пластин до товщини, прозорості для електронів, проводили по методиці, описаній в роботі [43].

Зразки 1 - 7 вирізані на різних відстанях від поверхні з валу, обкатаного тороподібними роликми з радіусами профілю 10 і 100 мм, інші - з поверхні валу, обкатаного голчатим роликом. Виміри

мікротвердості показали невеликі зміни твердості фериту і лише у самого деформованого зразка 8 помітно підвищилася твердість перлитових зерен. Додаткові виміри твердості по Вікерсу (при навантаженні 50 Н) на цих зразках підтвердили характер зміни твердості, приведений на рис. 17, з. Досліди показали, що при обкатуванні в першу чергу зміцнюються межі зерен.

Мікроструктура зразків, виготовлених з різних валів, до поверхневого наклепу була однаковою. Вона складалася з перлитових зерен оточених доєвтектоїдним феритом (рис. 21, а). Після обкатування п'ятиміліметровим роликом феритні і перлитові зерна значно витягнуті у напрямі зусилля P_x внаслідок великої кривизни ролика в площині його кочення і наявності великої сили тертя ролика о нерухомий сталевий сепаратор (рис. 21, б).

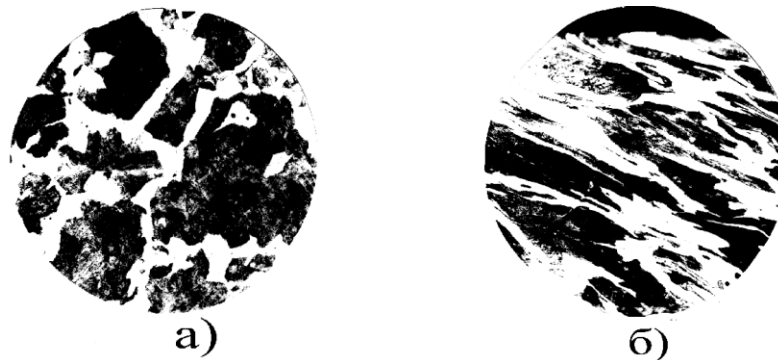


Рис. 21. Мікроструктура зразків, 9 (а) і 8 (б) з нормалізованої сталі 40 (X 300)
(номери зразків в табл. 3)

Електронно-мікроскопічні дослідження, проведені за допомогою мікроскопа УЭМВ-100К на тонких фольгах¹, приготовлених із зразків, вирізаних на різних відстанях від поверхні (див. табл. 3), показали, що перлит має вид чергуючих темних смуг цементита і більш світлого фериту (рис. 22). Пластини цементита в зразках 4 і 5, самих видалених від поверхні, в основному прямі, середня відстань між ними складає 0,30 - 0,35 мкм. Вигин і розрив цементитних пластин відбувається у меж субзерен. Феритні пластини перлиту не містять дислокацій, лише на

окремих ділянках спостерігаються одиничні дислокації на поверхні розділу ферит - цементит. Феритні зерна в цих же зразках обмежені плоскими прямими межами. Усередині зерен присутня тривимірна сітка дислокацій невисокої густини (рис. 22, а). Ця мікроструктура виникла при нормалізації початкового металу, хоча в зразку 4 на глибині 7,7 мм знайдений вже деякий приріст твердості.

При розгляді мікроструктури шарів, розташованих ближче до поверхні, необхідно відзначити зростання густини дислокацій у фериті. В зразку 2 сітка дислокацій розташовується по всьому об'єму феритних прошарків перлиту. Такі ділянки зустрічаються і в зразку 3 (рис. 22, б), хоча в більшості випадків виявляється певний контраст (стрілки). Усередині феритних зерен в зразку 2 починає формуватися комірчаста структура, що складається із стінок з високою густиною дислокацій, що оточують області, порівняно вільні від дислокацій. Густина дефектів в надмірному фериті приблизно на порядок вище, ніж у фериті евтектоїда (перлиту).

Мікроструктура зразка 1, найбільш близько розташованого до поверхні, показана на рис. 22, в, г. Кількість дефектів у фериті зросла, а змін в будові цементитних пластин не виявлено. У феритних пластинках перлиту (рис. 22, г) густина дислокацій як і раніше менше ніж в надлишковому фериті і не спостерігається ознак комірчастої структури. В зернах фериту, (рис. 22, в) сформувалася чітко виражена комірчаста структура із значними разорієнтировками по межах комірок, про що свідчить поява азимутного розмиття рефлексів на електронограмах, отриманих з цих ділянок. Сталь зразка 8, вирізаного з валу, обкатаного голчатим роликом, піддалася найбільшій деформації, про що можна судити за даними твердості, $\sigma_{0,2}$, σ_b подовженності зерен (див. рис. 17, г і 22, б). На електронних мікрофотографіях мікроструктури спостерігається вигин цементитних пластин. Відносно рідко видний їх розрив і утворення витягнутих областей, завдовжки 1,5 мкм, обмежених

зігнутими пластинками і скупченнями дислокацій (рис. 22, *д*). В місцях розриву цементитних пластин спостерігаються скупчення дислокацій. В зернах надлишкового фериту (рис. 22, *е*) видна добре розвинута субструктура, причому середній розмір комірок складає 6,4 мкм порівняно з 0,7 мкм в зразку 1. При цьому межі комірок утворені складнішими і щільними переплетеннями дислокацій, що створюють значні розорієнтировки. На дев'яти зразках з різним ступенем деформації зміряна мікротвердість структурних складових в поперечному перерізі обкатаних валів, приведена в табл. 3.

Дослідження механічних властивостей і мікроструктури зразків, вирізаних з різних по глибині перерізів валу, показало, що обкатування валів із зусиллям 50,0 кН приводить до наклепу поверхневих шарів на глибину порядку 8 мм при тороподібній формі роликів і на глибину 3 - 6 мм при циліндричній формі останніх, що мають лінійний контакт з деталлю.

З двох структурних складових сталі фериту і перлиту першим сприймає пластичну деформацію більш м'який ферит. Це приводить до формування в зернах надлишкового фериту комірчастої структури, в якій густина дислокацій і мікророзорієнтировки по зерну зростають у міру наближення до поверхні валу. У фериті евтектоїда густина дислокацій значно менше ніж в зернах надлишкового фериту, і не виникає комірчастої структури. Це пояснюється утрудненням проходження пластичної деформації у вузьких прошарках фериту, оточених значно більш твердим цементитом. При цьому площини легкого ковзання у фериті знаходяться під великим кутом до пластин цементита, що витікає з орієнтаційного співвідношення цих двох фаз. Виникнення дислокацій у феритних прошарках перлиту відбувається у поверхні розділу ферит - цементит, що узгоджується з висновком про те, що основним джерелом дислокацій є межі [44].

При відносно невеликих деформаціях, які досягалися при обкатуванні поверхні валу роликом тороподібного профілю, не знайдено ознак деформації цементитних пластин, принаймні їх форма не змінюється. Контраст усередині цементитних пластин, знайдений при дослідженні ряду зразків, не вдається однозначно тлумачити як дефекти кристалічної будови, подібні тим, які знайдені іншими дослідниками в екстрагованому цементиті. Такий контраст в двофазній фользі може бути пов'язаний з проекцією накладаючихся ґраток цементита і фериту. При обкатуванні валу голчатим роликом досягається більший поверхневий наклеп, ніж при обкатуванні тороподібним роликом. Така деформація приводить до витягання перлитових зерен, особливо тих, у яких пластини розташовані під невеликим кутом до напрямку деформації. Вигин, а іноді і дроблення цементита, очевидно, відбувається на ділянках, в яких смуги ковзання фериту розташовуються уперек цементитних пластин. Аналогічна структура властива перлиту після великих ступенів деформації, наприклад, при волочінні дроту. Навіть при найінтенсивнішому поверхневому наклепі, після обкатування голчатим роликом, знайдено порівняно небагато областей, де відбувалося руйнування цементитних пластин. Як показали електронно-графічні дослідження, зміцнення поверхневих шарів при обкатуванні валів роликом в основному пов'язано з виникненням осередків дислокацій в структурі зерен надлишкового фериту. Меншу деформацію випробовують феритні пластини перлиту. Деформації цементитних пластин при обкатуванні тороподібними роликами не виявлено. Збільшення ступеня наклепу при обкатуванні голчатим роликом виявляється в більшій густині дислокацій і зменшенні розміру комірок в субструктурі феритних зерен, а також в більш густій сітці дислокацій у феритних пластинах перлиту. В окремих районах відбувається вигин і розлом цементитних пластин, що свідчить про граничний ступінь

пластичної деформації поверхневого шару. Це підтверджується початком лущення поверхні, обкатаної п'ятиміліметровим роликом.

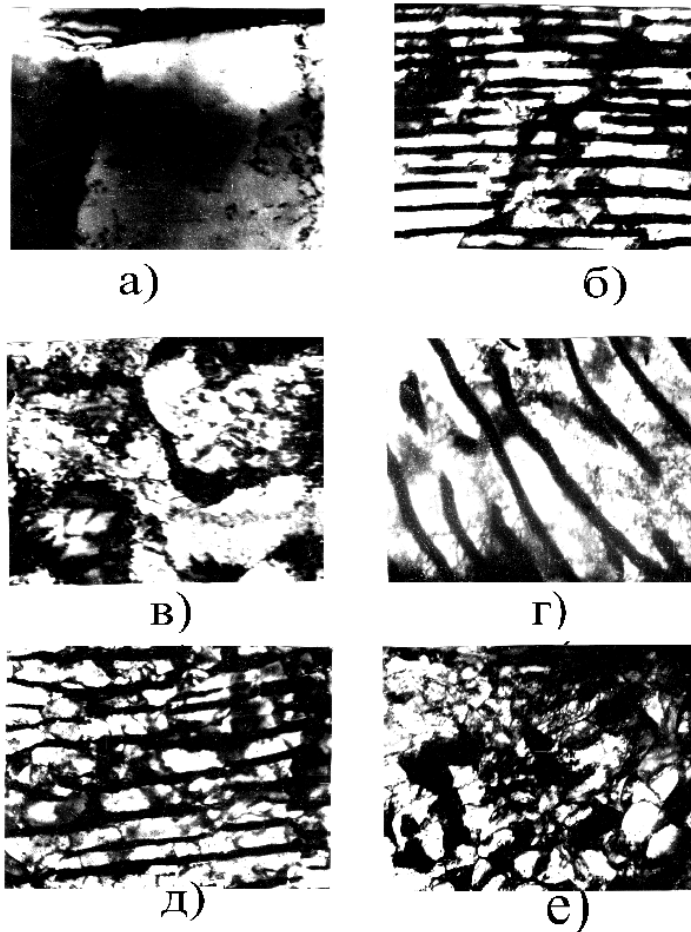


Рис. 22. Мікроелектронографічна структура зразків, вирізаних з поверхневого шару обкатаного роликми валу (нормалізована сталь 40): *а* - надлишковий ферит, X 35000 (зразок 4); *б* - перлит, X 25000; *в* - надлишковий ферит, X 35000 (зразок 1); *г* - перлит, X 35000; *д* - перлит, X 15000 (зразок 8); *е* - надмірний ферит, X 20000 (номери зразків в табл. 3)

Контрольні питання:

1. В чому заключається механізм наклепу поверхневого шару?
2. Як змінюється мікроструктура металу поверхневого шару?
3. Як підготовлювались зразки для дослідження електронної структури?

4. В чому заключається механізм перенаклепу металу поверхневого шару?

Лекція 7. Підвищення зносостійкості пар тертя обкатуванням деталей роликами

1. Пара тертя - сталевий вал - бронзовий вкладиш
2. Пара тертя - поршень з гумовими ущільненнями - сталева гільза
3. Пара тертя - гвинтова пара, сталевий гвинт - бронзова або чавунна гайка
4. Пара тертя - канатний блок - розжарений сталевий канат

Довговічність вузлів, що містять рухомий силовий контакт, може бути збільшений як підвищенням зносостійкості матеріалу деталей, так і оптимізацією рельєфу контактуючих поверхонь [45,46]. Технологічні методи обробки мають обмежені можливості впливу на параметри, що визначають зносостійкість матеріалу деталей, але можуть бути використані для отримання сприятливого відносно опірності зношуванню рельєфу поверхні деталей. Застосовуючи різні способи обробки, можна одержувати поверхні, що розрізняються не тільки висотою, але і формою нерівностей [47].

Розглянемо результати дослідження впливу деяких методів обробки на зносостійкість деталей в широко вживаних вузлах: 1) сталевий вал - бронзові вкладиші; 2) поршень з гумовими ущільненнями - сталева гільза; 3) гвинтова пара, сталевий гвинт - бронзова або чавунна гайка; 4) канатний блок - розжарений сталевий канат.

Дослідження пари тертя вал - вкладиш було проведене на зразках: вал із сталі 40 діаметром 40 мм, вкладиші - з олов'янистої бронзи Бр. ОЦС 8-21.

Сталеві зразки були оброблені по трьох варіантах: шліфовані (шорсткість поверхні $R_a = 2,5$ мкм); обкатані роликом з чистовим

режимом при зусиллі $P = 1,25$ кН, вибраному по методиці [1, 2] (шорсткість поверхні $R_a = 0,63$ мкм); обкатані роликками із зміцнюючим режимом при $P = 10$ кН (шорсткість поверхні $R_a = 2,5$ мкм). Поверхня вкладашів (втулок) після розточування мала шорсткість $R_a = 2,5$ мкм.

Випробування пари тертя виконувалися на машині тертя МИ в режимі, наближеному до режиму роботи валу з втулкою і корпусу конуса, що дробить, з підп'ятником в дробарках середнього і дрібного дроблення (окружна швидкість 25 м/хв, номінальне питоме навантаження 5 МПа); зразки рясно змазали машинним маслом. Вимірювання шорсткості і зняття профілограмм поверхні проводилося на профілографі - профілометрі заводу «Калібр». Методика проведення досліджень і технологія виготовлення зразків викладена в [48, 49].

На рис. 23 приведені графіки залежності зносу зразків від шляху тертя, побудовані для шляху тертя до $L = 9000$ м на підставі випробувань 10 пар зразків, а надалі - двох пар зразків для кожного варіанту обробки. Протягом перших двох годин випробувань ($L = 3000$ м) на робочих поверхнях сталевих шліфованих зразків і зразків, обкатаних роликком при $P = 10$ кН, спостерігалось намазування бронзи, що привело на початку зношування до малого вагового зносу шліфованих зразків і навіть до збільшення ваги зразків, обкатаних при $P = 10$ кН; на зразках, обкатаних роликком з $P = 1,25$ кН, намазування бронзи не помічено.

Коефіцієнт тертя f на початку випробувань складав для шліфованих зразків 0,127, а для зразків, обкатаних при $P = 1,25$ кН і $P = 10$ кН, відповідно 0,047 і 0,12. Надалі коефіцієнт тертя досяг мінімуму ($f = 0,016$) для зразків, обкатаних при $P = 1,25$ кН, - через 2 години ($L = 3000$ м), а при $P = 10$ кН - через 6 - 7 годин ($L = 10000$ м), для шліфованих же зразків навіть через 42 години ($L = 58000$ м) ($f = 0,027$), тобто за час випробувань цієї пари тертя період прироблення ще не закінчився. Як видно, прироблення сталевих обкатаних зразків відбувається у декілька разів швидше, ніж шліфованих; при цьому знос шліфованих зразків за

значний період роботи в 3 - 3,5 рази більше, ніж обкатаних. Оскільки параметри шорсткості R_a шліфованих і обкатаних при $P = 10$ кН зразків однакові, то менший знос останніх можна пояснити підвищеною твердістю і більшою опорною площею їх поверхні в результаті обкатування роликом. Мінімальний знос мали зразки, обкатані роликом при $P = 1,25$ кН; це обумовлено не тільки зміцнюючим ефектом, але і забезпеченням оптимальної шорсткості при даному методі обробки. Опорна площа поверхні обкатаних зразків у верхніх шарах в 1,5 - 2, а в нижніх шарах - в 1,1 - 1,2 рази більше, ніж шліфованих при відповідному збільшенні радіусів r закруглює вершин виступів і зменшенні кутів β^0 профілю у обкатаних поверхонь (див. табл. 4.).

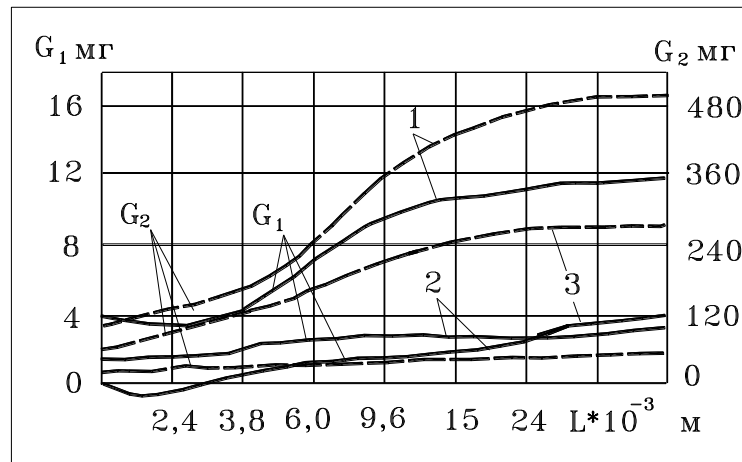


Рис. 23. Знос (втрата ваги) сталевих валів G_1 і працюючих з ними в парі бронзових вкладишів G_2 залежно від шляху тертя L : 1 - вал шліфований; 2 - вал, обкатаний роликом при $P = 1,25$ кН; 3 - те ж, але при $P = 10$ кН

Профілограмми поверхонь зразків до і після випробувань приведені на рис. 24. Висота нерівностей обкатаної поверхні зменшилася в 1,5 - 1,8 рази, а шліфованої - в 1,2 рази. Знос обкатаних поверхонь привів до деякого зменшення радіусів тому, що r закруглює вершин при майже незмінних кутах β^0 профілю, а шліфованих - до збільшення як радіусів, так і кутів профілю. Аналіз характеру змін опорної (несучої) площі показує, що на шліфованій поверхні при більш інтенсивному, ніж на

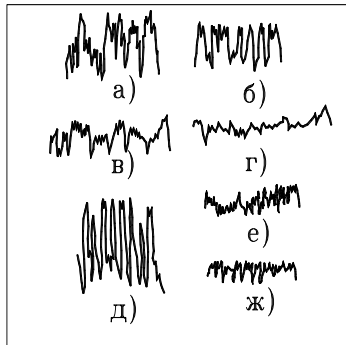


Рис. 24. Профілограмми поверхні зразків, зняті до і після випробувань (по вертикалі $\times 4000$, по горизонталі $\times 40$): а і б - валів сталевих шліфованих до і після випробувань; в і г - валів сталевих, обкатаних при $P = 1,25$ кН до і після випробувань; д - бронзових вкладишів до випробувань; е і ж - бронзових вкладишів, випробуваних в парі з шліфованим валом і з валом, обкатаним при $P = 1,25$ кН

обкатаній поверхні, зносі створюється нова шорсткість з висотою, мало відмінна від початкової. На обкатаних же поверхнях виникаюча при їх зносі шорсткість утворюється в основному за рахунок згладжування вершин виступів без істотного розповсюдження шорсткості в нижчележачі шари зміцненого металу. Завдяки цьому відмінність у величині опорної площі між шліфованою і обкатаною поверхнями в процесі їх зношування зростає ще більше.

Знос бронзового вкладиша визначається, як видно на рис. 23, в основному параметрами шорсткості працюючого в парі з ним сталевого валу. Так, найбільший знос мали вкладиші, сполучені з шліфованим валом, рельєф поверхні якого характеризується порівняно з обкатаним валом меншими радіусами r закруглює вершин виступів і великими кутами β^0 профілю. В даному випадку знос вкладиша посилюється, крім того, супроводжується шаржуванням шліфованої поверхні абразивними зернами. Якнайменший знос мали вкладиші, сполучені з валами, обкатаними при $P = 1,25$ кН.

У всіх випадках на поверхні вкладишів формується новий рельєф поверхні з огляду на те, що їх лінійний знос у багато разів перевершує

висоту нерівностей початкової поверхні. При цьому у разі роботи з обкатаним валом різко збільшилися радіуси r закруглення вершин і

Таблиця. 4. Параметри шорсткості поверхні валу, вкладиша і гільз

Зразок	Параметри шорсткості		Кут профілю, β°	Радіус закруглення вершин r , мкм
	R_a , мкм	R_z , мкм		
Вал сталевий:				
шліфований...	1,8/1,5*	6,7/5,5	7/8	250/260
обкатаний				
при $P = 1,25$ кН	0,9/0,5	3/1,8	5/5	800/700
....	<u>2,1</u>	<u>7,9</u>	<u>11</u>	<u>160</u>
Вкладиш бронзовий ...	0,8 – 0,6	3,1 – 1,8	6-2	250 - 650
Гільзи:				
розточені....	3/2,8	12/10	15	150
розточені і				
шліфовані	1/0,9	3,8/3,4	15	70
розточені і				
розкатні	0,8/0,8	3/3	9	850
* Чисельник – до випробувань, знаменник після випробувань (для вкладиша перша цифра – після роботи з шліфованим валом, друга – після роботи з обкатаним валом).				

зменшилися кути β^0 профілю. При роботі з шліфованим валом спостерігалось аналогічне явище, але ступінь зміни параметрів шорсткості вкладишів був меншим. В обох випадках після випробувань кривизна вершин нерівностей поверхні вкладиша була близька до кривизни вершин на поверхні сполученого валу. Якщо кути профілю для вкладиша, що працює в парі з шліфованим валом, стають приблизно однаковими з їх значеннями для валу, то для вкладиша, зв'язаного з обкатаним валом, спостерігалось більше згладжування вершин, що

привело до менших значень кута профілю на вкладиші, ніж на валу. Це позначилося на створенні більшої опорної площі поверхні вкладишів, що працюють в парі з обкатаним валом, чим і обумовлена їх більша зносостійкість.

В парі поршень з гумовими ущільненнями - сталева гільза був досліджений вплив методів обробки гільз на зносостійкість ущільнень.

Методика випробувань, що проводяться на спеціальних стендах, була наближена до умов роботи пневмоциліндрів в експлуатації [48]. Для досліджень використовувалися гумові манжети по ГОСТу 6678 - 85. Обробка внутрішньої поверхні гільз (сталь 40) діаметром 80 мм проводилася по трьох варіантах: розточуванням з параметрами шорсткості, $R_a = 3$ мкм, $R_z = 12$ мкм, розточуванням і шліфуванням ($R_a = 1$ мкм, $R_z = 3,8$ мкм), розточуванням і розкочуванням роликками ($R_a = 0,8$ мкм, $R_z = 3$ мкм). Режим розкочування визначали по методиці [1].

Випробування показали, що знос манжет, що працюють у контакті з розточеними або розточеними і шліфованими гільзами, значно більше, ніж працюючих у контакті з розточеними, а потім розкатаними гільзами. Особливо інтенсивно зношування цих манжет в перший період роботи ($L = 10 \div 15 \cdot 10^3$ м); продукти зносу манжет в цей період є дрібною гумовою стружкою, що зрізається гострими вершинами виступів нерівностей поверхні гільз. Помітимо, що знос манжет, що працюють в розточених гільзах, виявився дещо менше ніж в шліфованих, хоча останні мали меншу шорсткість поверхні. В гільзах розточених, а потім розкатаних знос манжет з самого початку їх роботи протікає рівномірно, продукти зносу манжет спостерігаються у вигляді забруднюючих масло частинок і стирання гуми, а величина зносу в 5 - 10 разів менше ніж в шліфованих гільзах. Періодичною перевіркою ущільнень відключених від сіті циліндрів встановлено, що падіння тиску в циліндрах зі шліфованими і розкатаними гільзами відбувається на початку роботи ущільнень приблизно однаково, після $L \approx 20 \cdot 10^3$ м шляху тертя в циліндрах з

шліфованими гільзами тиск протягом 3 хв падає з 0,64 до 0,2 МПа, а в циліндрах з розкатаними гільзами навіть через 40 хв зберігається на рівні 0,24 МПа. Очевидно, результати випробувань даної пари також слід оцінювати у зв'язку з параметрами шорсткості гільз, оброблених різними технологічними методами. При цьому слід враховувати наявність на поверхнях шліфованих гільз абразивних зерен. На рис. 25 показані профілограмми поверхні гільз, підготовлених до випробувань. Після випробувань відбувається деяке зменшення висоти нерівностей поверхні розточених і шліфованих після розточування гільз; поверхня гільз, оброблених розточуванням з подальшим розкочуванням, не зазнавала помітних змін в процесі роботи.

При цьому збереглася значна відмінність радіусів заокруглення вершин виступів шорсткості поверхні гільз, оброблених різними методами (див. табл. 4). Кути профілю у всіх випадках залишилися майже незмінними. Підвищенню зносостійкості гумових ущільнень також сприяло створення більшої опорної площі у розкатаних поверхнях.

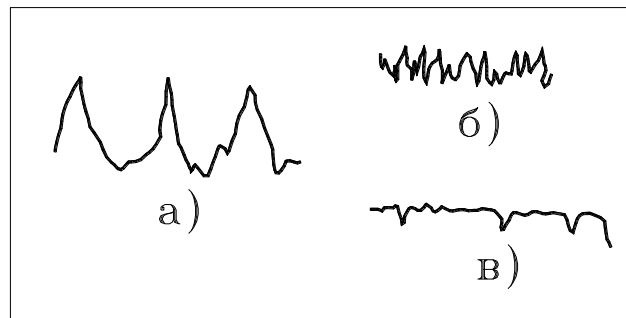


Рис. 25. Профілограмми поверхні гільз пневматичних циліндрів, оброблених: а - розточуванням; б - розточуванням і шліфуванням; в - розточуванням і розкочуванням (по вертикалі $\times 1000$; по горизонталі $\times 40$)

Дані про зносостійкість гвинтових пар з гвинтами, що мають трапецеїдальну різьбу кроком 12,7 мм і обкатану пальцевими роликами по методу обгинання [1], отримані на контувачі опок 27-тонного струшуючого столу формувальної лінії Уралмашзавода і на стані холодного плющення труб ХПТ - 75 Первоуральського новотрубного

заводу. Бронзові і чавунні гайки кантувача опок працюють в середовищі, запиленому компонентами формувальної суміші (кварцовий пісок SiO_2 - 90 - 96%, глинозем Al_2O_3 - 3%, інше - MgO , Cr_2O_3 , $FeO + Fe_2O_3$, CaO , NaO), і повністю зношуються за 1 - 3 місяці.

Візок кантувача з опокою, заповненою землею, і моделлю загальною вагою 36 т встановлена на чотирьох гвинтах. Гвинти виготовляються із сталі 40Х, гайки - з бронзи АЖМц 10 - 3 - 1,5 або сірого чавуну. Розрахунковий тиск в різьбі при рівномірному завантаженні всіх чотирьох гвинтів складає 2,55 МПа. Швидкість ковзання в гвинтових парах при підйомі і опусканні опоки складає 30 м/хв.

Перед установкою гайок до них прикручуються бронзові різьбові надставки. Призначення надставок - частково розвантажити різьбу на гайках і збільшити міжремонтний термін роботи кантувача. Після певного часу роботи гайок з надставками останні знімалися і по величині їх зносу оцінювався знос гайок. Потім надставки замінювалися новими. Після повного зносу різьби в гайках навантаження сприймалося одними надставками. В цей період роботи визначалася зносостійкість надставок.

Оцінка зносу гвинтів проводилася вимірюванням товщини його витка штангельним зубоміром. Зношені гайки і надставки розрізали по створюючій. Вимірювання товщини витків в них проводилося на інструментальному мікроскопі. Для виключення впливу випадкових чинників при випробуваннях зносостійкості гвинтових пар обкатані гвинти встановлювали в різних комбінаціях з необкатаними у всі чотири опорні крапки кантувача.

Знос гвинтів за міжремонтний термін склав 0,4 - 1 мм. Заміна бронзових гайок чавунними приводить до збільшення зносу гвинтів на 35 - 50%. При однаковому зносі стійкість обкатаних гвинтів, що працюють з бронзовими гайками, вище, ніж необкатаних, на 78%, працюючих з чавунними гайками - на 54%. Зносостійкість чавунних

гайок дещо вищий, ніж бронзових. Проте унаслідок низького опору чавуну згинаючому навантаженню стійкість чавунних гайок може бути понижений в результаті поломки неповністю зношеного витка. Відносне збільшення стійкості гайок в результаті обкатування гвинта таке ж, як і для самих гвинтів. Довговічність бронзових надставок після зносу гайок в результаті обкатування гвинтів збільшується більш, ніж удвічі. Це пояснюється тим, що надставки працюють в самих несприятливих умовах (найбільша запилюваність і підвищені навантаження). Слід помітити, що обкатування гвинтів роликami повністю виключило задираки і заклинювання гвинтових пар, які до введення операції обкатування гвинтів траплялися в період прироблення.

Гайки механізму подач станів холодного плющення труб виготовлені з бронзи АЖМц 10 - 3 - 1,5, гвинти - із сталі 40Х. Розрахунковий тиск в різьбі при знятті заготовки з облямовування досягає 1 МПа, швидкість ковзання в гвинтовій парі - 3 м/с. Гвинтова пара працює в середовищі, насиченим пилом і металевою окалиною. Спостереження за зносостійкістю гвинтових пар велось на чотирьох станах ХПТ - 75, встановлених в одному цеху і працюючих приблизно з рівною продуктивністю. На двох станах були встановлені гвинти з обкатоною різьбою і на двох - з необкатоною. Оцінка зносу гвинтів проводилася вимірюванням товщини витка штангельним зубоміром. Знос гвинтів після їх обкатування роликami зменшився в 2,6 рази.

Для зміцнення профілю струмка канатного блоку судоперенавантажувача застосовано обкатування його клиновим роликami. Проте підвищення твердості поверхневого шару на 25 - 30 % профілю струмка, отриманого за допомогою наклепу, не привело до зменшення зносу поверхні. Аналіз процесу зносу робочої поверхні блоку показав, що окрім стирання і зминання поверхні має місце зрізання поверхневого шару окремою розжареними дротиками каната. З теорії різання металів відомо, що для того, щоб зрізання наклепаного металу

затрачується менша робота, ніж при різанні ненаклепаного металу. Такі ж результати отримали М. М. Хрущев і М. А. Бабичев при порівняльних випробуваннях на зносостійкість наклепаних і ненаклепаних металів під час зносу їх абразивними шкурами [50]. Твердість абразиву значно перевищувала твердість зношуваних матеріалів. Не знайшов також впливу наклепу на зносостійкість осьової сталі В. Н. Кащеев [51] зношуючи її абразивними кругами на керамічній зв'язці. Проте, досліджуючи зносостійкість матеріалів за наявності в контакті поверхонь, що труться, абразивних частинок М.М. Тененбаум [52], показав, що кварцові зерна з твердістю, значно перевершуючій твердість стискаючих їх пластинок, руйнуються. Причому руйнующе навантаження різко зменшується з підвищенням твердості однієї із стискаючих пластинок.

З урахуванням вищевикладеного для підвищення довговічності блоків був замінений метал блоку: сталь 25Л - на сталь 45Л і введений гарт блоку в масло. Твердість поверхневого шару профілю струмка після гарту і обкатування роликом склала приблизно 400 *HV*. Процес зрізування поверхневого шару дротиками каната був усунений і довговічність блоків і працюючих з ними канатів підвищилася в 2 - 3 рази.

Частка ефекту в підвищенні зносостійкості наклепаного поверхневого шару, у відсутності процесу його зрізування, належить і залишковим стискаючим напруженням, що утворюються в шарі в результаті пластичної деформації [53].

Підвищення зносостійкості деталей за рахунок наклепу поверхневого шару А. А. Маталин [54] вважає наслідком посиленої дифузії кисню повітря в зміцнений метал, в якому створюються тверді хімічні з'єднання FeO , Fe_2O_3 і Fe_3O_4 , характерні для окислювального зносу, що протікає з якнайменшою інтенсивністю. Попереднє зміцнення металу перешкоджає розвитку сумісної пластичної деформації металів

деталей, що труться, що викликає холодну зварку - схоплювання, є найінтенсивнішим видом зносу.

Контрольні питання:

1. Розкажіть про методику дослідження впливу ППД на зносостійкість пари вал – втулка?
2. Від яких параметрів шорсткості поверхні залежить зносостійкість пари вал – втулка?
3. Як впливає обкатування витків на зносостійкість пари гвинт – гайка при абразивному зносі?
4. Як впливає обкатування профілю канатного блоку на зносостійкість пари блок – канат?

Лекція 8. Жорсткість технологічної системи при обкатуванні роликами і точність обкатаних деталей

1. Жорсткість технологічної системи верстат – інструмент – деталь при обкатуванні роликами на металоріжучих верстатах
2. Уточнення розмірів деталей при обкатуванні їх роликами

Реалізація оптимального режиму обкатування роликами пов'язана з можливостями верстатів, що використовуються. Однією з умов при цьому є можливість створення і стабілізації робочого зусилля обкатування необхідної величини.

При односторонній схемі обкатування універсальними однороликовими пристроями зусилля обкатування повністю сприймається вузлами верстата, тому воно обмежується розмірами і фірмовими особливостями верстатів. В табл. 5 вказано допустиме зусилля обкатування на верстатах різних типів і розмірів.

Постійність необхідного зусилля безпосередньо пов'язана з жорсткістю технологічної системи верстат – інструмент - деталь. Жорсткість j системи, що складається з декількох ланок, визначається по А.П. Соколовському:

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

Таблиця 5. Зусилля, допустиме при обкатуванні одним роликом на металлоріжучих верстатах¹

Токарні верстати			Карусельні верстати			Продольно-стругальні верстати	
Висота центрів, мм	Зусилля, що допускається експлуатації, кН		Діаметр планшайби, мм	Зусилля в кН, що допускається при обкатуванні супортом		Довжи на столу, мм	Допустиме зусилля, кН
	Дітє-льной	Коротко-тимчасової		Верті-кальним	Боко-вим		
200	3	5	800	4,5	6	2000	10
300	6-10	9-15	850-1400	5	8	3500	24
500	15	16-25	1400-1850	6,5-8	10	4000	30
550-650	20-30	30-50	2000-2500	8,5-10	15	5000	40
800-1000	50	60	2600-3700	10-16	20	6000	50
1250-1500	60	70	4000-4600	16	30	8000-	60-
			5000-6000	25-30	40	12000	80

¹ Уточнюється залежно від особливостей верстатів.

Одна з основних складових жорсткості системи - жорсткість верстата. На жорсткість металорізальних верстатів робить великий вплив співвідношення складових зусилля різання. Співвідношення, на яке розраховані універсальні металорізальні верстати, відрізняється найбільшим значенням P_z . При досить широких коливаннях вказане співвідношення, в середньому характерне для процесу різання, складає 1: 0,4: 0,25.

На відміну від цього процес обкатування характеризується привелюючим значенням P_y при незначній величині решти складових. Безпосередні вимірювання зусиль обкатування валів діаметром 100 мм роликами різних розмірів, виконані динамометром УДМ конструкції ВНІІ із записом осцилограм, показали, що для обкатування характерне співвідношення $P_z : P_y : P_x = 0,03 : 1 : 0,3$ [1]. У більшості конструкцій верстатів максимальна жорсткість досягається при відношенні $P_y : P_z = 0,4$ і різко падає при його збільшенні.

В значенні збереження оптимального режиму обкатування представляє небезпеку не стільки зниження жорсткості, скільки її непостійність. Наприклад, при обкатуванні на токарних верстатах кінців валу, окрім жорсткості супорта, на жорсткість системи істотно впливає жорсткість передньої і задньої бабки. Прийнято вважати, що у міру пересування супорта від передньої бабки до задньої жорсткість знижується на 40-60%. За даними Санкт-петербурзького технічного університету у токарних верстатів з висотою центрів 200-300 мм перепад жорсткості складає 50-100%, досягаючи в окремих випадках чотирикратного. Аналогічна картина спостерігається у крупних токарних верстатів з висотою центрів 500-1500 мм

Очевидно зміна жорсткості в процесі обробки на розточувальних і карусельних верстатах. При збільшенні вильоту шпінделя в 3 рази жорсткість вузла шпінделя розточувального верстата з діаметром шпінделя 90 мм падає в 4 рази, а верстата з діаметром шпінделя 150 мм - в 3,5 рази [55].

При характерному для обкатування роликми розподілі зусиль збільшується гістерезис кривої залежності зусилля - віджимання. Це пов'язано з визначальною роллю стиків в деформації вузлів верстатів [56]. Пружні деформації що входять в них деталей складають лише невелику частку деформації вузлів.

На рис. 26 приведена експериментальна залежність деформації від радіального зусилля для трьох токарних верстатів різних розмірів [5]. На початку розвантаження зусилля різко падає при дуже малих переміщеннях, пов'язаних з пружною деформацією деталей без участі стиків. У цей момент жорсткість системи вельми висока; вона вимірюється сотнями кілоньютонів на міліметр.

В процесі обкатування ексцентричне закріплення деталі, радикальне биття роликів і інші погрішності призводять до того, що система працює в коливальному режимі розвантаження - навантаження

поблизу максимуму прикладеного навантаження. Моделювання цього процесу шляхом шести послідовних циклів зміни навантаження в межах 8,5-10,5 кН, виконане на верстаті з висотою центрів 286 мм, представлено кривою 1 в збільшеному масштабі на рис. 26. Отриманий графік показує, що жорсткість системи при цьому залишається в області вельми високих значень, характерних для розвантажувальної гілки кривої $P=f(y)$.

Задача стабілізації зусилля обкатування в межах допустимих відхилень розв'язується введенням в конструкцію пристроїв обкату пружних елементів зниженої жорсткості.

Об'єднуючи у виразі (1) жорсткість верстата, деталі, кріпильних пристосувань загальним символом j_c і виділивши жорсткість інструменту для обкатування, знайдемо жорсткість системи [56]:

$$j = \frac{j_c j_u}{j_c + j_u}. \quad (32)$$

Припустимо, що відношення жорсткості інструменту до жорсткості решти елементів, тоді

$$j_u = m j_c. \quad (33)$$

Якщо жорсткість j_c коливається в межах від $j_{c \max}$ до $j_{c \min}$, причому $j_{c \max} = n j_{c \min}$, то введення в технологічну систему інструменту з жорсткістю по формулі (33) приведе до зменшення цих коливань:

$$\Delta j = j_{\max} - j_{\min} = \frac{m}{1+m} (n-1) j_{c \min}.$$

Коливання жорсткості системи зменшаться в $\frac{1+m}{m}$ раз, або на $\frac{100}{m}\%$.

Одним з радикальних шляхів стабілізації режиму обкатування роликами є виключення із загальної жорсткості технологічної системи поперечної жорсткості верстата. У виробництві широко застосовується обкатування валів багатороликовими охоплюючими пристроями різних типів. А розкочування отворів великої довжини б було неможливе без використання багатороликових головок з урівноваженим радіальним тиском. Розвантаження супорта верстата від робочого зусилля

обкатування спрощує силову схему процесу. Зусилля замикається між деталлю і пристроєм обкату. Якщо при цьому деталь має стінки достатньо великої товщини, то величина і постійність зусилля визначаються конструкцією і жорсткістю інструменту. При обкатуванні або розкочуванні тонкостінних деталей їх жорсткість повинна бути врахований. Розглянемо жорсткість системи інструмент - деталь на прикладі розкочування втулок. Представимо втулку в процесі розкочування у вигляді тонкої циліндрової оболонки, шарнірно упертої на кінцях і навантаженої в середньому перетині радіальними складовими зусилля, рівномірно що рознесли по колу і прикладеними в точках контакту роликів. Такий випадок розглянутий в роботі П.П. Бейларда [57].

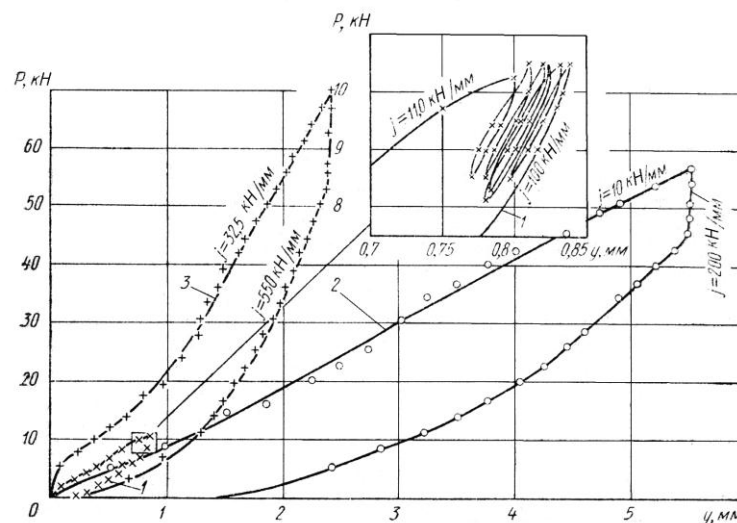


Рис. 26. Залежність віджимання супорта токарного верстата від радіального зусилля при висоті центрів:
1 - 286 мм; 2 - 500 мм; 3 - 1250 мм

Диференціальні рівняння оболонки розв'язуються методом розкладання переміщень і навантажень в подвійні ряди Фур'є.

В результаті отриманий вираз для радіального переміщення w , придатне для чисельних розрахунків:

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

де P - радіальне зусилля на кожному ролику;

k - кількість сил (роликів);

E, μ - модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу розкатуваної втулки;

$\rho = \frac{|D_d|}{2}; l; h$ - радіус, довжина і товщина стінки втулки;

$$\alpha = \frac{2l}{|D_d|}; \gamma = \frac{|D_d|}{2h};$$

x, φ - циліндрові координати;

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

Розрахунки виконані на ЕОМ для циліндрів діаметром $|D_d|=300$ мм з різними відносинами радіусу до товщини стінки і довжини до радіусу.

Прийняте при розрахунку шарнірне закріплення кінців оболонки з нескінченною жорсткістю в радіальному напрямі не може служити моделлю реального кріплення втулок при розкочуванні поблизу торців. З результатів розрахунку практичне значення мають прогинання на достатньому видаленні від кінців оболонки при великих значеннях α .

Вважаючи, що при $\alpha=6,6$ вплив способу закріплення кінців на прогинання в середині не істотно при будь-якій кількості сил, розрахуємо прогинання і побудуємо графіки залежності відносної жорсткості від при різній кількості радіальних зусиль в перетинах, видалених від торців. Під жорсткістю при цьому розуміється зусилля, віднесене до радіального прогинання оболонки в точці додатку зусилля. Отримані графіки (рис. 27) показують, як жорсткість зростає при збільшенні товщини стінки і кількості докладених зусиль (кількості роликів пристрою гуркоту).

Заслугує уваги той факт, що при збільшенні кількості зусиль не у всіх випадках монотонно росте жорсткість. Перевищення певної

кількості зусиль приводить до загального розтягання втулки і відповідного зменшення жорсткості в результаті взаємодії сусідніх зусиль. Наприклад, при відношенні радіусу розкатуваної втулки до товщини стінки рівному 23 жорсткість однакова при 12 і 16 зусиллях. При зменшенні цього відношення до 16 (більш товстостінна гільза) стають рівними жорсткості втулок, навантажених 16 і 8 зусиллями і т.д.

Графіки 1-7, приведені на рис. 27, дозволяють визначити жорсткість втулок з найпоширенішими діаметральними розмірами в перетинах, видалених від торців. Поблизу торців жорсткість істотно знижується.

Жорсткість консольної оболонки, навантаженої радіальними зусиллями, діючими в перетинах, що лежать поблизу торця, визначали експериментально. Випробовували жорсткість втулки завдовжки 600 мм з внутрішнім діаметром 300 мм Товщина її стінки була спочатку 15 мм ($\gamma = 10$), потім втулку проточували зовні до товщини 10 мм ($\gamma = 15$); 7,5 мм ($\gamma = 20$) і 5 мм ($\gamma = 30$).

Для навантаження втулки виготовлений спеціальний гідравлічний динамометр (рис. 28), що має вісім радіально розташованих робочих циліндрів і циліндр навантаження, винесений на протилежний кінець центрального облямовування. Облямовування встановлено в підшипниках центровика з конусом для кріплення динамометра в пінолі задньої бабки токарного верстата.

Навантаження заміряли манометром. При необхідності частину робочих циліндрів можна було відключати поглибленням різьбових упорів, що обмежують радіальний хід плунжерів. Таким чином, можна варіювати кількість точок навантаження. Втулка навантажувалася послідовно на відстані 5, 10, 100 і 300 мм від торця в 2, 4 або 8 крапках. Зусилля, що прикладаються в кожній крапці, складали 3, 2 і 1 кН. Зусилля обмежувалося у міру зменшення товщини стінки для запобігання залишкових деформацій втулки. Пружні деформації втулки

вимірювалися при навантаженні в діаметрально протилежних крапках двома мікронними індикаторами, встановленими на супорті.

По деформаціях і докладеним зусилля розраховувалася жорсткість втулок. Графіки зміни жорсткості по довжині втулок з різною завтовшки стінки приведені на рис. 29. Графіки показують, що жорсткість поблизу торця при двохроликовій схемі розкочування приблизно в 4 рази нижче жорсткості на глибині, рівній діаметру, причому на всій цій довжині жорсткість підвищується у міру видалення від торця. Збільшення кількості точок навантаження до 4 і тим більше до 8 дещо скорочує перепад жорсткості до триразового і істотно наближає до торця перетин, в якому жорсткість стабілізується. Представляє інтерес повний збіг досвідчених значень жорсткості, отриманих на глибині, рівній діаметру втулки, з розрахунковими значеннями, для відповідних γ і кількості зусиль. Експериментальні крапки відзначені на рис. 27. Сказане підтверджує практичну придатність застосованої методики розрахунку жорсткості втулок при розкочуванні на глибині, рівній діаметру і більшій при різній кількості роликів в пристрої гуркоти.

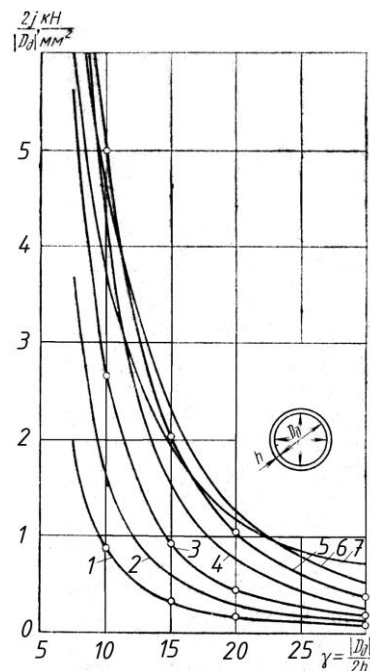


Рис. 27. Жорсткість втулок в перетинах, видалених від торців при двох (1), трьох (2), чотирьох (3), шести (4), восьми (5), дванадцяти (6) і шістнадцяти (7) радіальних зусиллях

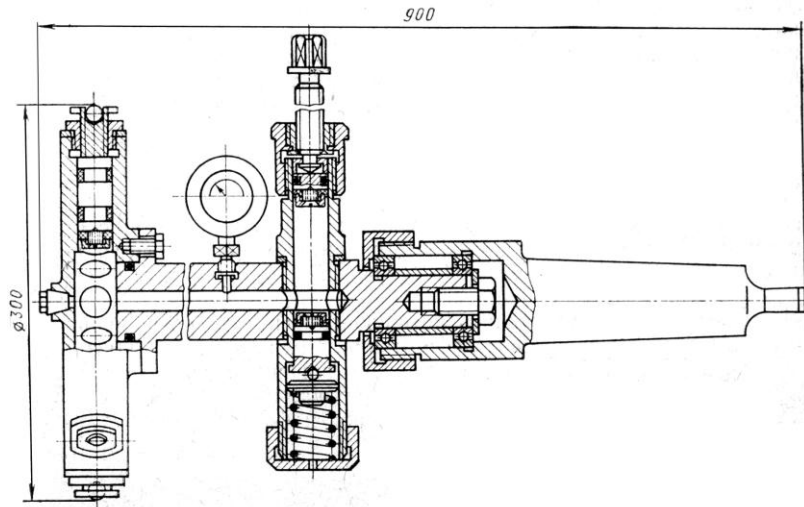


Рис. 28. Динамометр для навантаження втулок радіальними зусиллями

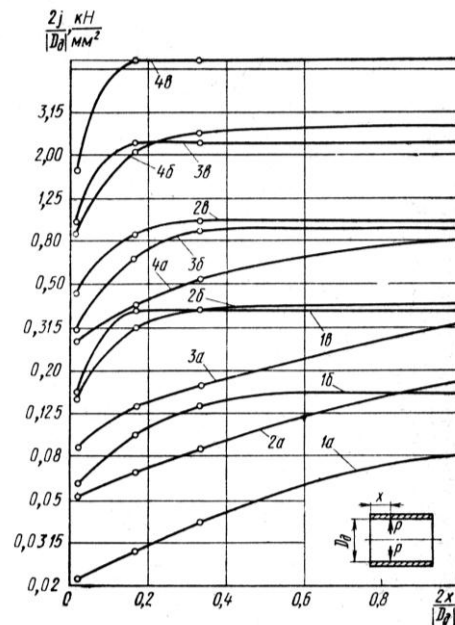


Рис. 29. Жорсткість втулок поблизу торців, навантажених двома (а), чотирма (б) і вісьма (в) зусиллями при $\gamma = 30$ (1), 20 (2), 15 (3), 10 (4)

Розглядаючи шорсткість поверхні, як відхилення від номінальної форми деталі, можна говорити про обкатування роликми, як про ефективний спосіб уточнення мікропрофілю деталей машин. В значно меншій мірі це відноситься до хвилястості, можливість зменшити яку залежить від співвідношення кроку хвилі і розмірів зони деформації. Хвиля з малим кроком усувається достатньо ефективно. Співвідношенням зони деформації з габаритними розмірами

оброблюваної деталі визначається можливість уточнення її розмірів і форми в макрооб'ємі. Для деталей малих розмірів процес обкатування є процесом холодного формоутворення.

Допуск на точні вали малих діаметрів у багато разів менше усадки, наприклад для діаметра 5 мм шостого квалітета ISO він складає всього 0,008 мм. Тому із заготовок низької точності, виготовлених з припуском, не перевершуючим усадку, обкачуванням досить легко одержують деталі підвищеної точності. У міру збільшення розмірів деталей усадка від обкачування зменшується. Деформація набуває поверхневого характеру і на зміні розмірів позначається в основному перерозподіл матеріалу мікронерівностей, зім'яло гребінців і заповнення западин.

Звичайно зміна діаметрів (зменшення діаметра валу і збільшення діаметра отвору) помітно перевершує висоту початкових мікронерівностей, на яку повинен був би змінитися діаметр при повному тому, що зім'яв мікронерівностей трикутного профілю. Це пояснюється, по-перше, тим, що при вимірюванні діаметрів контактні поверхні вимірювальних інструментів стикаються з самими виступаючими гребінцями мікронерівностей, тобто вимірюється звичайно найбільший описаний діаметр валу і якнайменший вписаний діаметр отвору; по-друге, тим, що середня лінія мікропрофілю поверхні, наприклад, після обточування, проходить дещо нижче за половину висоти мікронерівностей, оскільки унаслідок того, що округляє вершини різця форма мікронерівностей відрізняється від трикутної і об'єм западин мікропрофілю перевершує об'єм гребінців. Крім того, на зміну розмірів впливають витяжка поверхневого шару у країв обкачуваної ділянки і пружна деформація деталі від залишкових напружень.

В табл. 6 приведені отримані в результаті узагальнення виробничого досвіду зміни діаметрів сталевих деталей залежно від початкової шорсткості поверхні і способу її обробки. Ці величини прийняті на ряді заводів для коректування розмірів при обкатуванні

точних деталей. Якщо допуск обкатуваної поверхні по величині порівняний з очікуваною зміною діаметра або менший його, деталь повинна бути підготовлений під обкачування із заданим допуском, але із зміненним на величину зменшення номінального розміру в процесі обкачування в плюс для валів і в мінус для отворів. Практично це означає, що діаметри до 250 мм 8-го квалітета ISO і всі діаметри 7-го квалітета ISO необхідно коректувати. Деталі 8-го квалітета ISO з діаметром більше 250 мм, а також менш точні деталі всіх розмірів обкачують після виготовлення їх за остаточними креслярськими розмірами.

Таблиця 6. Зменшення (збільшення) діаметрів валів (отворів) при обкатуванні роликами

Спосіб обробки під обкатування	Шорсткість поверхні, підготовленої під обкатування, мкм	Зміна діаметра після обкатування, мм
Точіння і розточування	$R_z = 40$	0,03 – 0,06
	$R_z = 20$	0,02-0,04
	$R_a = 2,5$	0,01-0,02
Шліфування	$R_z = 20$	0,01-0,03
	$R_a = 2,5$	0,005-0,015
Точіння широким різцем	$R_z = 20$	0,01-0,02
	$R_a = 2,5$	до 0,01

Питання про підвищення точності, тобто про звуження поля допуску в результаті обкатування, пов'язаний з можливістю регулювати робоче зусилля. Очевидно, що при малій жорсткості системи верстат - інструмент - деталь, необхідної для обкатування деталей роликами кругового профілю, коли для успішного проведення операції необхідне збереження зусилля в межах, обмежених допустимим кутом вдавлювання, можна говорити лише про збереження точності, отриманої на попередніх операціях. Щоб в результаті обкатування отримати уточнення розмірів обкатуваних деталей, необхідно використовувати схеми високої жорсткості, в яких зміна натягу за рахунок коливання

розмірів заготовки викликала б помітну зміну зусилля і відповідну зміну усадки. При цьому вказана зміна зусилля не повинна приводити до зниження якості обкатаної поверхні. Цій вимозі в найбільшій мірі задовольняє процес обкатування з каплевидною формою контакту роликів прямолінійного профілю. Постійний кут вдавлювання таких роликів оберігає обкатувану поверхню від хвилястості і дозволяє одержувати необхідну якість поверхні в деякому діапазоні зусиль.

Наприклад, при розкочуванні отворів залежно від допуску ε_1 на заздалегідь розточений отвір натяг головки в отворі змінюється. При високій жорсткості системи інструмент - деталь цю зміну викличе відповідна зміна робочого зусилля, а отже, і різні прирости діаметра розкатуваного отвору. В результаті допуск на отвір, що розкотив, буде менше ніж в заготовці.

Відносне звуження поля допуску $\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ характеризує уточнення, що досягається при розкочуванні отворів. Уточнення, необхідні для перекладу розміру деталей в більш високий квалітет ISO, приведені в табл. 7.

Таблиця 7. Величини уточнення $\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}$

Початковий квалітет ISO	Вимагається квалітет ISO			
	6	7	8	9
6	0			
7	0,33	0		
8	0,5	0,25	0	
9	0,75	0,67	0,5	0
10	0,85	0,78	0,7	0,4

Експериментально можливість уточнення перевірялася при розкочуванні отворів діаметром 46 і 58 мм і завдовжки 100 мм в товстостінних сталевих втулках із зовнішнім діаметром 140 мм і у втулках з алюмінію із зовнішнім діаметром 100 мм. Втулки розкочували жорсткими планетарними головками з п'ятьма роликами діаметром 9 мм

Шорсткість поверхні зменшується при розкочуванні сталі з $Rz = 80$ мкм до $Ra = 0,63$ мкм і з $Rz = 20$ мкм до $Ra = 0,32$ мкм; для алюмінію зменшення шорсткості ще більш значне – з $Rz = 160$ мкм до $Ra = 0,32$ мкм і з $Rz = 40$ мкм до $Ra = 0,16$ мкм.

Оптимальним для отримання якнайменшої шорсткості на сталі 20 є натяг 0,2 мм. При натягу близько 0,3 мм з'являється хвилястість поверхні, а при 0,4 мм поверхню починає лущитися. На більш твердій сталі 40Х шорсткість зменшується аж до натягу 0,3 мм, але при цьому також з'являється хвилястість, що свідчить про початок руйнування поверхневого шару, що наближається. Алюміній краще всього розкочується при менших значеннях натягу (0,1-0,15 мм). На рис. 30 дані графіки зміни діаметра втулок, що розкотили, залежно від натягу.

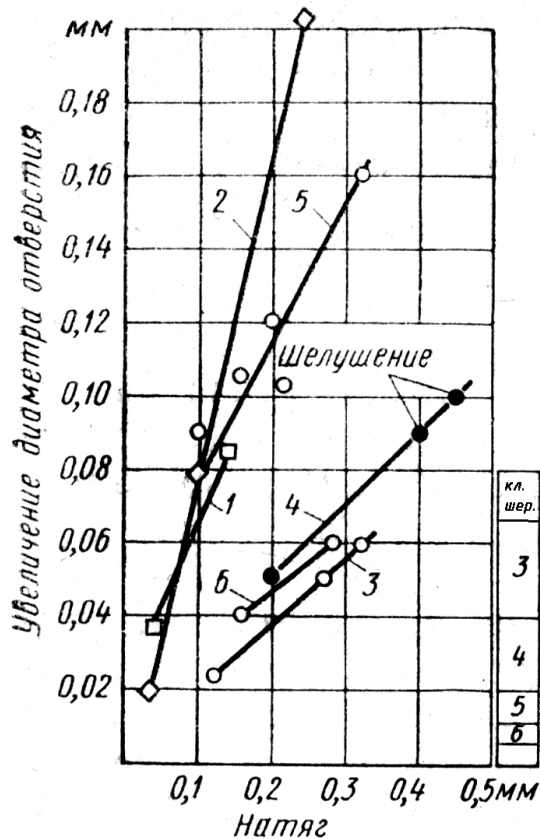


Рис. 30. Збільшення діаметра отворів при розкочуванні товстостінних втулок:
 1,2 - з алюмінію з початковою шорсткістю відповідно $Rz = 40$ мкм і $Rz = 160$ мкм;
 3-5 – із сталі 20 з початковою шорсткістю відповідно $Ra=2,5$ мкм, $Rz= 20$ мкм і $Rz= 80$ мкм;
 6 – із сталі 40Х з вихідної шорсткістю $Rz= 20$ мкм.

Зміна розмірів пов'язана з початковою шорсткістю. Звертає на себе увагу той факт, що збільшення діаметра отворів істотно перевершує ступінь шорсткості. Уточнення за даними мал. 5 складають для сталі при початковій шорсткості $Ra = 2,5$ мкм 17,5%, $Rz = 20$ мкм - 22,5%, $Rz = 80$ мкм - 39 %, Вони ледве досягають величин, необхідних для перекладу отворів 7 квалітета ISO в 6-й, 8 в 7 і 10 - в 9 (табл. 7). Для алюмінієвих втулок уточнення складає 62 і 85% відповідно для $Rz = 40$ мкм і $Rz = 160$ мкм, що дозволяє розглядати розкочування жорсткими головками як спосіб калібрування отворів в деталях з алюмінієвих сплавів, правда, у вельми вузькому діапазоні натягу. При зменшеній товщині стінки обкатування дозволяє в деяких випадках калібрувати і сталеві деталі. При розкочуванні з натягом втулок з товщиною стінки менше 20 мм спостерігається збільшення їх зовнішнього діаметра (рис. 31), що досягає у втулки з двохміліметровою стінкою 0,1 мм

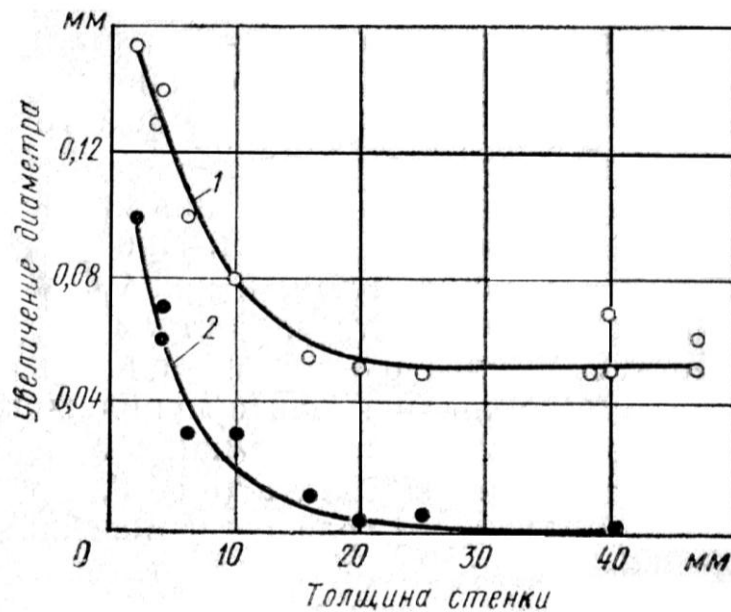


Рис. 31. Збільшення внутрішніх (крива 1) і зовнішніх (крива 2) діаметрів сталевих втулок залежно від товщини стінки

Зміна жорсткості і пластичний перебіг матеріалу, втулок поблизу торців приводять до спотворення їх форми. Спотворення форми осевого перетину втулок спостерігається у всіх зразків (рис. 32), що

розкотили, причому у товстостінних втулок тим більше, чим товще стінка. Якнайменше деформованої виявилася втулка з товщиною стінки 4 мм. У втулки з товщиною стінки 2 мм отвір у торця розкотилося на меншу величину, ніж в глибині, через недостатню жорсткість деталі на краю. Зовнішня поверхня спотворилася більше у втулок із стінкою завтовшки 10 мм.

Спотворенням форми тонкостінних деталей на краях запобігає зниженням зусиль (натягу), за рахунок зменшення діаметра роликів і деякого збільшення заднього кута вдавлювання, що дозволяє локалізувати деформації в більш тонкому поверхневому шарі. Збереженню форми втулок сприяє також збільшення кількості роликів головок гуркотів, що підвищує жорсткість системи.

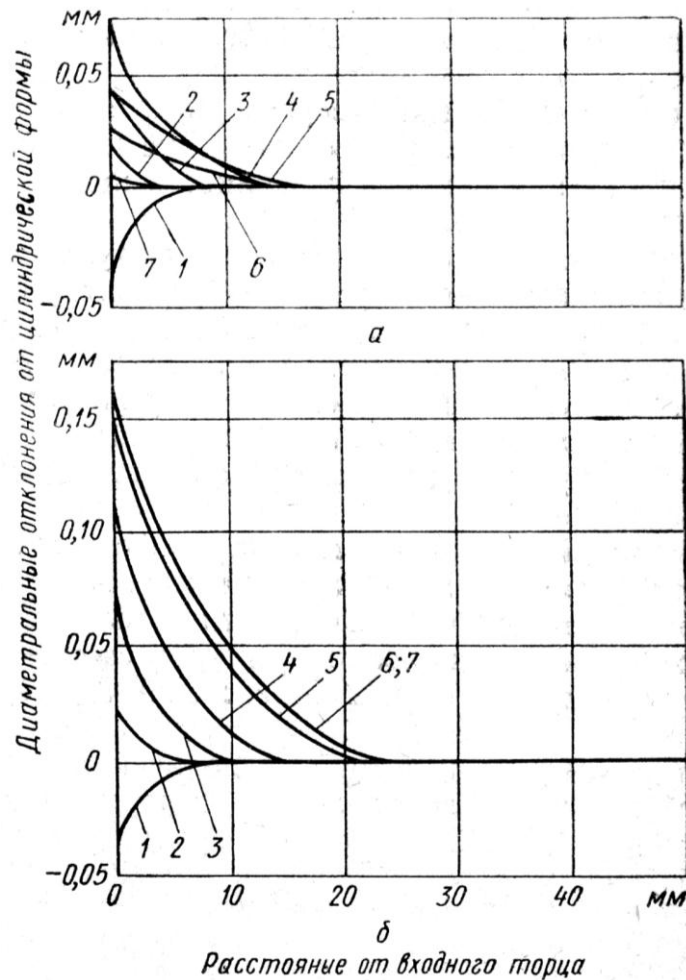


Рис. 32. Форма зовнішньої (а) і внутрішньої (б) поверхонь втулок, що розкотили, діаметром 58 мм у торців при різній товщині стінки:

1 – 2 мм; 2 – 4 мм; 3 – 6 мм; 4 – 10 мм; 5 – 16 мм; 6 – 25 мм; 7 – 40 мм

Контрольні питання:

1. Відношення складових зусилля обкатування валів роликами?
2. Покажіть залежність віджимання супорту токарного верстату від радіального зусилля?
3. Як змінюється жорсткість втулок від кількості точок прикладення радіальних зусиль?
4. Як змінюється жорсткість втулок поблизу їх торців?
5. Як змінюється діаметр валів і отворів після обкатування і від чого залежать ці зміни?
6. Як змінюється діаметр отворів втулок поблизу їх торців при розкатуванні?

Лекція 9. Підвищення контактної міцності сталейних деталей обкатуванням роликами

1. Дослідження ступеня зміцнення та дифузії хімічних елементів в поверхневому шарі в процесі поверхневого деформування обкатуванням роликами
2. Розробка способу обкатування клиновим роликом канатних блоків
3. Розробка технології обкатування клиновим роликом канатних блоків

Для оцінки ступеня зміцнення сталей за допомогою обкатування роликами зразки із сталей 40Х, 45 і армкозалізо були обкатані на токарному верстаті за допомогою пристрою, що зображений на рис. 33 [58].

Консольний тороподібний ролик 1 встановлений на вісі 2, яка змонтована на конічних підшипниках 3 і 4 у корпусі 5. Деформація пружного корпусу сприймається стрижнем 6 і через штовхач 7 передається на індикатор 9, закріпленим до корпусу гвинтом 10.

Пружина 8 підтискає шток 7 і стрижень 6 до пружного елемента корпусу. Максимальна деформація пружного корпусу дорівнює 3,1 мм, при цьому зусилля на ролик дорівнює 10 кН.

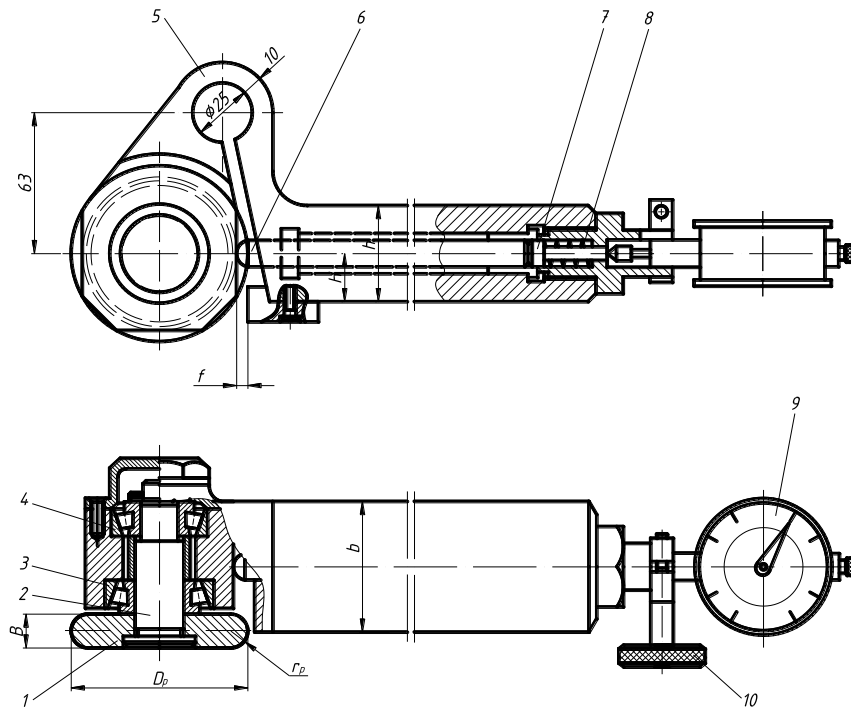


Рис. 33. Пристрій з пружним корпусом і індикатором вимірювання зусилля обкатування:

1 – ролик; 2 – вісь; 3, 4 – підшипники; 5 – корпус; 6 – стрижень;

7 – штовхач; 8 – пружина; 9 – індикатор; 10 – гвинт;

$B = 16$ мм; $r_p = 2,5$ і 5 мм; $D_p = 32$ мм; $b = 45$ мм; $H = 12$ мм; $h = 25$ мм

Ширина пружної частини корпусу $b = 60$ мм. Профільний радіус ролика r_p був прийнятий рівним 2,5 мм і 5 мм. Середній кут втискання ролика φ в залежності від зусилля обкатування P змінювався для різних зразків в межах від $2,5^\circ$ до 5° , $\varphi = 10^\circ$, для того щоб перевищити рекомендований для сумісного чистового і зміцнюючого обкатування $\varphi = 5^\circ$ і отримати значну ступінь деформації металу. Обкатуванню піддавались конічні зразки діаметром 200 мм. З метою моделювання процесу обкатування роликом бокової поверхні струмка канатного

блоку, утворюючи якої складає з перпендикуляром до вісі обертання барабану кут $22,5^\circ$, кут α_m біля основи конуса зразків дорівнює $75^\circ 45'$.

Величина кута α_m визначена із умови рівності колового проковзування на поверхні контакту ролика з деталлю при обкатуванні профілю канатного блока і конусної моделі.

$$\frac{b \cdot \cos \alpha_{\bar{o}}}{r_{\bar{o}}} = \frac{b \cdot \cos \alpha_m}{r_m},$$

де b – вісь еліпса контакту ролика на конічній поверхні канатного блока;

$\alpha_{\bar{o}}$ – кут профілю канавки канатного блока;

$r_{\bar{o}}$ – середній радіус профілю канавки канатного блока;

α_m – кут конуса моделі;

r_m – середній радіус моделі.

$$\text{Звідси } \cos \alpha_m = \frac{\cos \alpha_{\bar{o}} \cdot r_m}{r_{\bar{o}}}.$$

При $\alpha_{\bar{o}} = 22,5^\circ$; $r_m = 100$ мм; $r_{\bar{o}} = 375$ мм

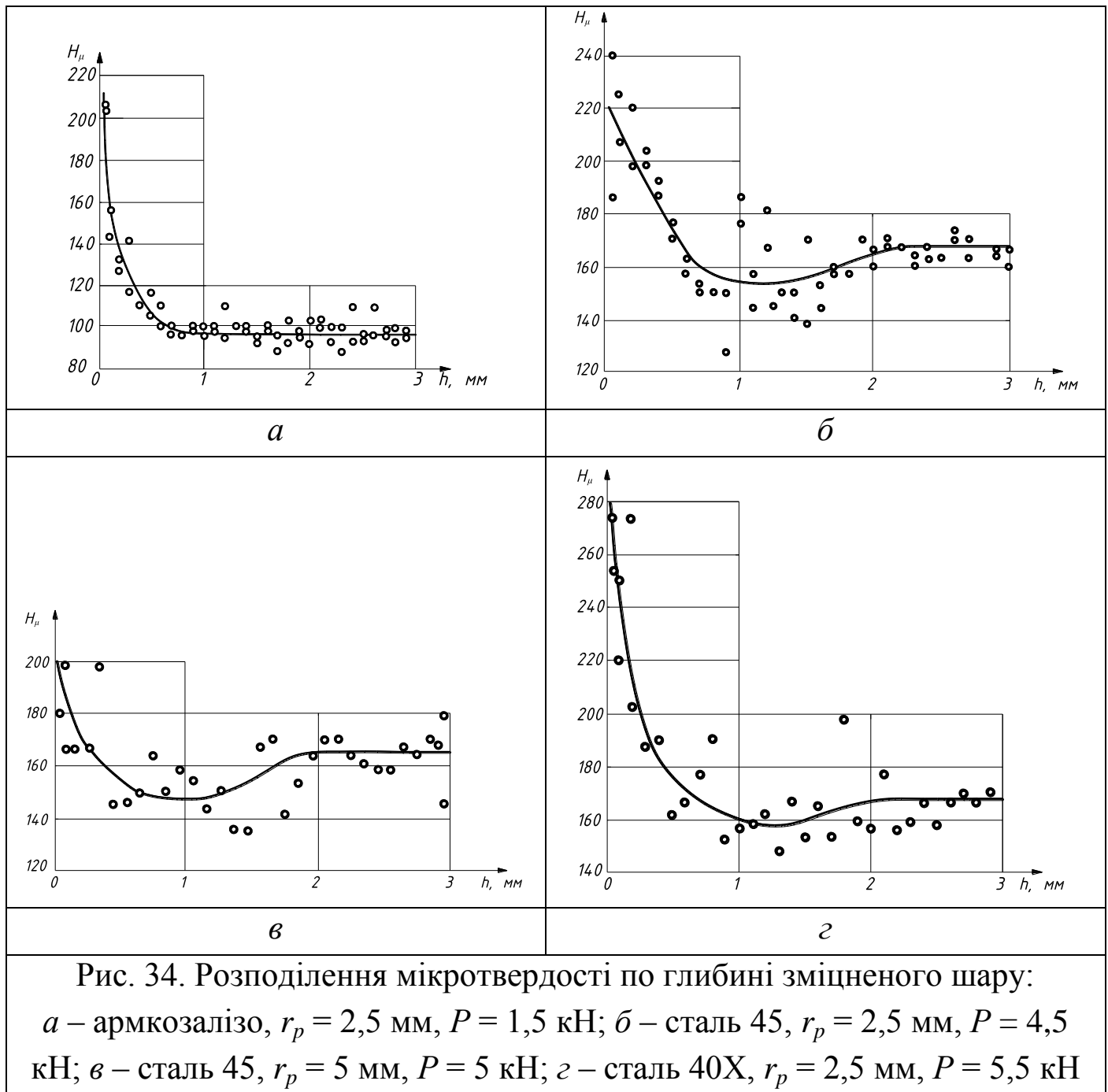
$$\cos \alpha_m = \frac{\cos 22,5^\circ \cdot 100}{375} = 0,24637,$$

$$\alpha_m = 75^\circ 45'.$$

Після обкатування з різними режимами (див. табл. 8) зразки розрізалися і в поперечному перерізі вимірювалась мікротвердість H_μ з навантаженням на піраміду 1,0 Н.

Розподілення мікротвердості H_μ по глибині 4-х зразків показано на рис. 34.

На графіках (рис. 34, б – г) для сталей 45 і 40Х виявлено зниження мікротвердості $H_{\mu(n.z.)}$ в перехідній зоні між зміцненим шаром і вихідним металом, мікротвердістю $H_{\mu(u.)}$. Середні значення $H_{\mu(n.z.)}$ і $H_{\mu(u.)}$ нормально розподілених величин порівнювали за допомогою t – критерію Стьюдента [59, 60].



Якщо $|t| \geq t_{\alpha, K}$ (табл. V [61]), то різниця середніх значень суттєва. Величину довірчої імовірності $P = 1 - \alpha$ вибираємо рівною 0,95, ($\alpha = 0,05$), число ступенем вільності визначаємо з виразу $K = n_1 + n_2 - 2$. Результати розрахунків поміщенні у табл. 8.

Таблиця 8

Параметри обкатування конусної поверхні сталей 45, 40Х, армкозаліза та статистична обробка результатів випробувань зразків

Марка матеріалу	r_p , мм	D_p , мм	P , кН	φ , град	$H_{\mu max}$	t_{H_μ}	$\sum K$, мм ⁻¹	$K_{\sigma_{0,2}}$	$t_{\sigma_{0,2}}$	$t_{теор}^2$
45	5	32	5,00	2,5	200	1,8	0,241	1,4	2,52	2,55
45	2,5	32	4,50	5	240	1,8	0,441	1,3	2,34	2,35
40Х	2,5	32	5,50	5	275	1,7	0,441	1,3	2,21	2,25
Армкозалізо	2,5	32	1,50	5	230	1,0	0,441	1,3	1,3	1,35

Продовження табл. 8

n_1	n_2	\bar{x}_1 ($H_{\mu(n.z.)}$)	\bar{x}_2 ($H_{\mu(u.)}$)	S_1^2	S_2^2	t	$t_{\alpha, K}$	Ступінь різниці \bar{x}_1 і \bar{x}_2
9	12	148,18	164,82	70,88	142,62	5,3	1,96	Різниця суттєва
24	18	174,86	186,28	175,4	13,54	3,55	1,96	Різниця суттєва
11	34	157,2	167,3	34,40	121,39	2,49	2,1	Різниця суттєва
9	37	98,0	97,56	4,25	29,3	0,238	1,96	Різниця не суттєва

Примітки:

$$1. \sum K = \frac{1}{r_p} + \frac{2}{D_p} + \frac{2}{D_M};$$

2. $t_{теор} = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}$, де P – зусилля обкатування, кН; σ_T – межа текучості сталі, кН/мм². $K_{\sigma_{0,2}} = t_{\sigma_{0,2}} / t_{H_\mu}$. Його значення вибираються в залежності від приведеної кривизни $\sum K$ у контактi ролика з деталлю по графіку (рис. 65, в [67]).

Аналіз результатів дослідження мікротвердості показують, що при обкатуванні роликами сталей 40Х і 45 простежується значне зниження

мікротвердості у перехідній зоні між зміцненим шаром і вихідним металом. При обкатуванні армкозаліза такого спаду не виявлено.

Запропонована ідея дифузійного переносу зміцнюючих хімічних елементів (Cr, C) з глибинних шарів на поверхню. Розподілення зміцнюючих хімічних елементів Cr і C було досліджено за допомогою мікрохіманалізатора фірми Jeol «Superprobe – 733». Встановлено, що в перехідній зоні вміст Cr і C зменшилося на 20 – 30 %, а в зміцненому шарі збільшилося до 10 – 15 %. Аналогічні результати отримані в роботах [62, 63] на поверхнях тертя і при термо- і електромеханічному зміцненні сталей [64]. В цих роботах в якості основних механізмів дифузії називають температурний градієнт [65] і електроперенос [66]. Оскільки у нашому випадку ці механізми є несуттєвим чи зовсім відсутні, слід рахувати при ППД суттєвим механізмом дифузії – градієнт щільності дислокацій [67].

Дифузія (масоперенос, який супроводжується зміною хімічного складу металу) елементів в металі направлена перпендикулярно до поверхні обкатування від ділянок недеформованого металу, тобто по вісі градієнтів і в першу чергу пластичної деформації, яка визначає градієнт щільності дислокацій і слугує додатковою термодинамічною силою, стимулююча дифузію елементів, які входять у склад металу. Зона дифузії атомів елементів порівняна з зоною деформаційного обкатування металу.

Дифузія легуючих елементів в деформованому обкатуванням шарі металу призводить до різних результатів зміни концентрації по глибині зміцненого шару металу. Дифузійні потоки в поверхні обкатування карбідоутворюючих елементів (Cr, C) призводять до того, що самому поверхневому шарі утворюються додатково карбідна фаза з одночасним зменшенням вмісту цих елементів у матриці. В умовах деформування, зародження тріщин і зношування відбувається викришування карбідів, які в процесі перетворення укрупнюються. Зменшення вмісту

карбідоутворюючих елементів в поверхневому шарі металу знижує експлуатаційні властивості матеріалів: контактна міцність, зносостійкість при сухому і граничному терті, корозійна стійкість, стійкість проти фретинг-корозії, полегшує умови фазових переходів в залізовуглецевих сплавах ($\alpha - \gamma$), тобто являється крайнє негативним явищем. При накопиченні (збільшенні) атомів елементів (Cr, C), фізико-механічні властивості поверхневих шарів металу – корозійна стійкість, контактна міцність металічної основи (твердого розчину) – підвищується і це сприяє покращенню антифрикційних властивостей матеріалів. Виходячи із концепцій процесів масопереносу, що відбувається при обкатуванні, можна розробити найбільш дієві системи легування сталейних деталей, які будуть в залежності від умов роботи показувати свої максимальні експлуатаційні показники.

Робочий профіль канатного блоку складається з тороїдальної частини, виконаної з радіусом профілю дещо перевищуючим половину діаметра каната $r_0 = 20 - 22$ мм, і профіль двох конічних поверхонь, виконаний під кутом $\sim 22^\circ$ до перпендикуляра осі блоку.

Тороїдальна частина робочої поверхні канатного блоку є галтельний перехід між конічними поверхнями. При роботі блоку найінтенсивнішому зносу піддається галтельний перехід, де спостерігається відшаровування металу, особливо за наявності в поверхнях шару газових раковин і пустот, отриманих в процесі відливання заготовок з ливарних сталей 25Л, 35Л. Проте розбиваються канатом і конічні поверхні. В розділі 3 показана ефективність технології поверхневої пластичної деформації обкатуванням роликми для підвищення контактної міцності деталей машин. Тому доцільно піддати деформації всю робочу поверхню канатного блоку [68].

В даний час при обкатуванні галтелей валів радіусом до 10 мм з метою підвищення ефективності зміцнення застосовуються як деформуючі елементи малі ролики або кульки без матеріальної осі

обертання [69]. Кульки, застосовані для обкатування, мають дещо більшу кривизну, ніж відповідні галтелі (див. табл. 9). Це має важливе значення, оскільки лінійний контакт кульки з галтеллю став точковим і, отже, сприяв збільшенню ступеня деформації. Обкатуванням кулькою зміцнюються галтелі радіусом до 10 мм. В окремих випадках при неповному профілі галтелі цим способом вдається зміцнювати дещо великі радіуси (до 12 мм). У міру збільшення радіусу галтелі відповідно росте і діаметр кульки. Це приводить до необхідності використання все більших робочих зусиль.

Таблиця 9

Параметри обкатування галтелей радіусом 10 мм кулькою та клиновим і похилим роликами ($D_o = 180$ мм)

Деформуючий елемент	r_p , мм	b' , мм	D_{pm} , мм	γ , град	P_M , кН	$\frac{\Delta HV}{HV}$	t_{HV} , мм
Кулька	9,9	-	19,8	-	50,0	0,40	6,0
Ролик:							
похилий	5,0	7,0	158,0	3,6	15,5	0,36	3,5
					35,0	0,64	6,0
клиновий			157,0	3,3	8,5	0,30	2,7
					17,5	0,45	4,0

Другий шлях підвищення ефективності обкатування галтелей – застосування роликів з профільним радіусом, зменшеним в порівнянні з радіусом галтелі [70]. Проте при використанні таких роликів для деформації всієї криволінійної ділянки необхідна подача ролика по створюючій галтелі. Великі можливості для зміцнення галтелей відкриває застосування роликів з биттям робочого профілю.

Розглянемо докладніше процес обкатування галтелей похилими роликами, тобто роликами, робочий профіль яких нахилений до осі обертання ролика.

На рис. 35, *a*, показана конструкція похилого ролика і схема обкатування ним циліндричної поверхні. Площина симетрії робочого профілю цього ролика нахилена під невеликим кутом до осі обертання. В результаті, під час обкатування, робочий профіль б'є на δ мм в осьовій площині. Центр кривизни профілю ролика відхиляється від площини поперечного перетину на $\frac{\delta}{2} \sin(\varphi_0 + \varphi)$, де φ_0 – початкова фаза повороту ролика, φ – кут повороту ролика в даному перетині. В загальному випадку, коли діаметри ролика і деталі не кратні, кожний подальший оберт деталі викличе зсув синусоїди в круговому напрямі на $\pi(nD_p - D_o)$, де n – ціле число, найближче до відношення $D_o : D_p$. В результаті зсуву ролик при другому проході починає деформувати поверхню деталі із збільшеною кривизною в початковий момент, що приводить до інтенсивної деформації металу, значного розширення і поглиблення контактної канавки.

Третій прохід починається при такому ж зсуві синусоїди, і знову ролик глибоко вдавлюється в метал. Процес інтенсивної деформації металу продовжується до тих пір, поки кінець синусоїдального сліду після деякого n -го оберту деталі не співпадає з його початком.

Після закінчення обкатування за перші n обертів деталі на обкатаній поверхні залишається сітка слідів ролика. Відстань між сусідніми слідами у напрямі осі деталі:

$$\Delta S = \delta \cos(\varphi_0 + \varphi + \pi/n) \sin \pi/n, \quad (36)$$

де n знаходиться як часте від ділення найменшого кратного діаметрів деталі і ролика на діаметр деталі.

Прирівнявши нулю похідну, знайдемо

$$\Delta S_{\max} = \delta \sin \pi/n. \quad (37)$$

Значення ΔS_{\max} характеризує найбільший зсув слідів у напрямі осі обкатуваної деталі, що з'явилося в результаті биття робочого профілю ролика, і зростає по мірі збільшення биття ролика і зменшується із зростанням n , тобто із зростанням найменшого кратного діаметрів деталі і ролика.

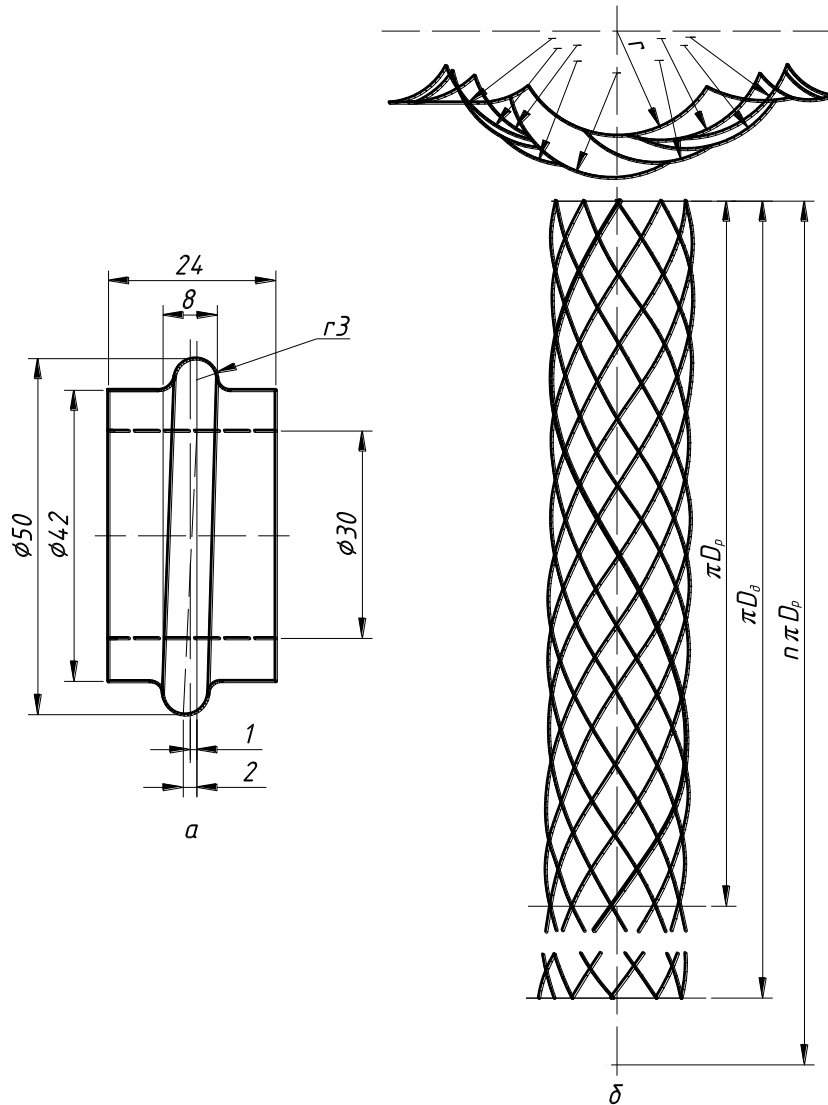


Рис. 35. Накатка кільцевих канавок похилим роликом:

a – похилий ролик; b – схема деформування

За допомогою похилого ролика (див. рис. 35, a) був обкатаний вал діаметром 95 мм із сталі 20. Хоча сила обкатування складає лише 5,40 кН на валу були отримані канавки шириною 8 і глибиною 4 мм. Що

правда, 1,5 мм доводилося на висоту хвилеподібних напливів видавленого металу у країв канавки. Щоб представити ступінь інтенсифікації деформації за рахунок биття, вкажемо, що в результаті обкатування такого ж валу тороподібним роликом з профільним радіусом 5,5 мм при силі 8,40 кН була отримана канавка глибиною 0,6 мм.

Застосування похилих роликів із заданим осьовим биттям для обкатування циліндричних поверхонь з продольною подачею дозволяє одержувати явно хвилясті поверхні, які можуть мати певні експлуатаційні переваги. Особливість обкатування галтелей на відміну від накатування кільцевих канавок на циліндричних поверхнях полягає в тому, що обкатуваний діаметр деталі безперервно міняється і в кожний момент залежить від того, з якої точки профілю галтелі стикається ролик.

Клиновий ролик, див. рис. 36, б, відрізняється від похилого ролика, див. рис. 36, а, тим, що у нього нахилено до його осі обидва торці робочої поверхні. Широка сторона клинового перерізу ролика дорівнює хорді, що стягує дугу обкатуваної галтелі, вузька – дещо перевищує подвосну величину профілю ролика. Вісь обертання ролика розташована ексцентрично щодо його зовнішнього діаметра. Робочі поверхні клинового ролика залишають на поверхні обкатуваної галтелі одночасно два синусоїдальні сліди, які у міру обертання валу і ролика поступово зміщуються в круговому напрямі, поки вся поверхня галтелі не виявиться деформованою.

Схеми розрахунку параметрів процесу обкатування галтелі похилим і клиновим роликами показані на рис. 36, а, б.

Профільний радіус r_p роликів для отримання значного ступеня деформації і в той же час відсутності хвилястості на обкатаній поверхні розраховується по формулі:

$$r_p = \frac{r'_p R_z}{R_z + r'_p}, \quad (38)$$

де r'_p – приведений радіус кривизни ролика і деталі в їх осьовому перетині.

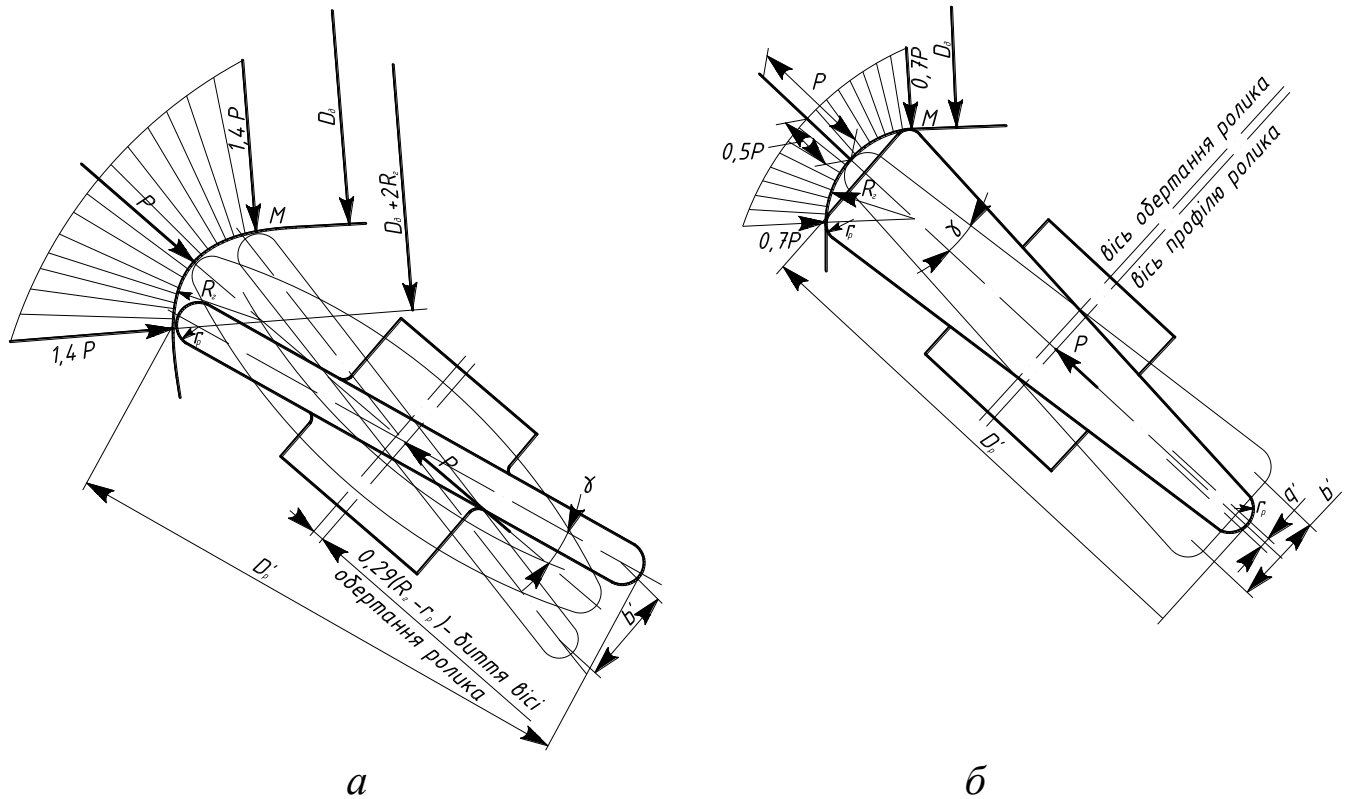


Рис. 36. Схеми розрахунку параметрів процесу обкатування галтелей похилим (а) і клиновим (б) роликами

Для галтелей радіусом $R_z > 10$ мм, $r_p - 10 \div 25$ мм. Биття профілю роликів b згідно рис. 36 складає

$$b' = 1,4(R_z - r_p). \quad (39)$$

Половина кута биття профілю для нахилу ролика (рис. 36, а) визначиться виразом

$$\gamma = \arctg \left[\frac{1,4(R_z - r_p)}{D'_p - 2r_p} \right], \quad (40)$$

для клинового ролика (рис. 36, б)

$$\gamma = \arctg \left[\frac{1,4(R_z - r_p)q'}{D'_p - 2r_p} \right], \quad (41)$$

де D'_p – діаметр ролика;

q' – мінімальна відстань між центрами кривизни двох торців ролика.

Умовний діаметр ролика в точці M складе

$$D_{pM} = 2\rho_M = \frac{D'_p - 2r_p [1 - \cos(\pi/4 - \gamma)]}{\cos(\pi/4 - \gamma)}, \quad (42)$$

де ρ_M – радіус кривизни ролика в перетині, перпендикулярному осі обкатуваного валу.

Перевірка процесу обкатування кулькою, похилим і клиновим роликами проведена на валах з нормалізованої сталі 40 діаметром 180...230 мм. Обкатували галтелі радіусом 10 мм. Зусилля P обкатування кулькою складало 50 кН. Діаметр кульки 19,8 мм гарантував точковий початковий контакт на початку навантаження. Діаметр похилого і клинового ролика $D_p = 120$ мм, профільний радіус = 5 мм. Зусилля на роликах з биттям змінювали в межах 11...25 кН. Розрахункове зусилля в точці M галтелі при обкатуванні роликами з биттям визначали відповідно до рис. 36. Для випадку обкатування кулькою розрахункове зусилля 50 кН визначали в середині галтелі в точці початкового контакту кульки з галтеллю. Результати розрахунку і вибору параметрів процесу обкатування галтелей валу кулькою, клиновим і похилим роликами приведені в табл. 9. Ступінь і глибину наклепу в зоні галтелі визначали по твердості 10/40 HV в перетинах галтелі для випадку обкатування кулькою під кутом 45° до осі валу в середині профілю галтелі і під кутом 90° до осі валу в точці M – при обкатуванні роликами з биттям. Зміна твердості зміцненого поверхневого шару валів із сталі 40 в зоні галтелі показано на рис. 37.

Аналіз глибини і ступеня наклепу металу в зоні галтелі показує, що найбільшу ефективність забезпечує обкатування галтелей похилим роликом, при якому отриманий максимальний ступінь (64 %) і значна

глибина наклепу (7,2 мм) при зусиллі на ролик 25 кН, удвічі меншому, ніж зусилля обкатування кулькою. Менші глибина і ступінь наклепу досягаються при обкатуванні з тими ж зусиллями при застосуванні клинового ролика. Помітне зниження ефекту в цьому випадку в порівнянні з похилим роликом є результатом розподілу робочого зусилля між двома точками контакту ролика з обкатуваною деталлю.

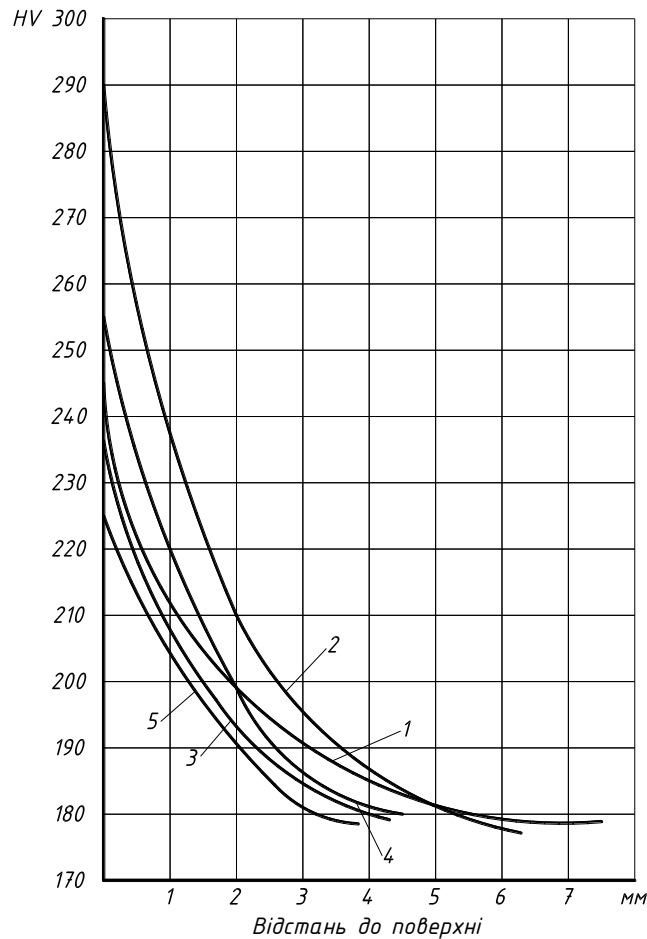


Рис. 37. Розподілення твердості HV поверхневого шару валів із сталі 40 та по глибині для галтелей радіусом 10 мм:

1 – обкатування кулькою з $P = 50$ кН; 2 і 3 – похилим роликом, $P = 25$ кН і 11 кН; 4 і 5 – клиновим роликом, $P = 25$ кН і 12 кН

З порівняння схем обкатування похилим і клиновим роликами (див. рис. 36) видно, що зусилля обкатування в зоні деформації у клинового

ролика менше ніж у похилого. Проте істотною перевагою клинового ролика є врівноваженість осьової складової зусилля обкатування.

Постійний напрям реактивного зусилля на супорт в площині обертання ролика створює більш сприятливі умови роботи. У похилого ролика реакція напряму по нормалі до поверхні галтелі. Залежно від того, в якій крапці з нею стикається ролик, напрям реактивного зусилля безперервно змінюється в межах прямого кута. Тому допустиме робоче зусилля обмежується жорсткістю супорта токарного верстата. В точках сполучення кругового профілю галтелі з циліндричною і торцевою поверхнями зусилля обкатування як похилим, так і клиновим роликами досягає найбільшої величини. В цих крапках зближуються сліди ролика. В результаті у країв обкатаної ділянки деформація посилюється і виникають кільцеві поглиблення типу розвантажуючих канавок глибиною до декількох десятих часток міліметра.

В процесі обкатування галтелей валів різних діаметрів роликами з биттям робочого профілю іноді виникає кратність діаметрів деталі і ролика, що не забезпечує обкатування всієї поверхні галтелі. Для усунення кратності діаметрів деталі і ролика необхідно змінити швидкість обертання деталі. При цьому зміниться величина прослизання ролика по деталі і процес обкатування всієї поверхні галтелі стабілізується. Спроба розрахувати теоретично діаметр ролика, при якому не настає кратності, практично не виправдовується, оскільки прослизання ролика по деталі розрахувати не вдається. Обкатування роликами з биттям робочого профілю ефективно для галтелей і кругових канавок радіусом до 30 мм.

Оскільки ми поставили собі задачу одночасно обкатати роликами весь робочий профіль канатних блоків, то найраціональнішим способом обкатування слід рахувати зміцнення одночасно і тороїдальної і конічних поверхонь. А для цього необхідно застосувати клиновий ролик [71]. При цьому широка частина клинового ролика буде рівна ширині

западини канатного блоку по його максимальному діаметру. Значна частина канатних блоків, що виготовляються в ремонтно-механічному цеху (РМЦ) ВАТ «Миколаївський глиноземний завод», мають радіус галтелей $R_c \sim 20 - 22$ мм. Глибина профілю ~ 55 мм, половина кута α_δ профілю канатного струмка $\sim 22,5^\circ$ (див. рис. 38).

Приведений радіус кривизни ролика, r'_p і деталі в їх осьовому перетині при обкатуванні конічної поверхні рівний радіусу кривизни ролика. З метою отримання інтенсивної деформації бічних поверхонь профілю при реальних зусиллях обкатування ($\sim 30,0$ кН) приймаємо $= 16$ мм.

Тоді приведений радіус кривизни r'_p ролика і деталі в їх осьовому перетині при обкатуванні галтелі (при ~ 22 мм) відповідно до формули (38) буде рівний 60 мм. При такому радіусі і діаметрі ролика рівним 140 мм і твердості 160 *HV* сталі 35Л, з якої виготовляються канатні блоки, необхідне зусилля на ролик складе $\sim 20,0$ кН.

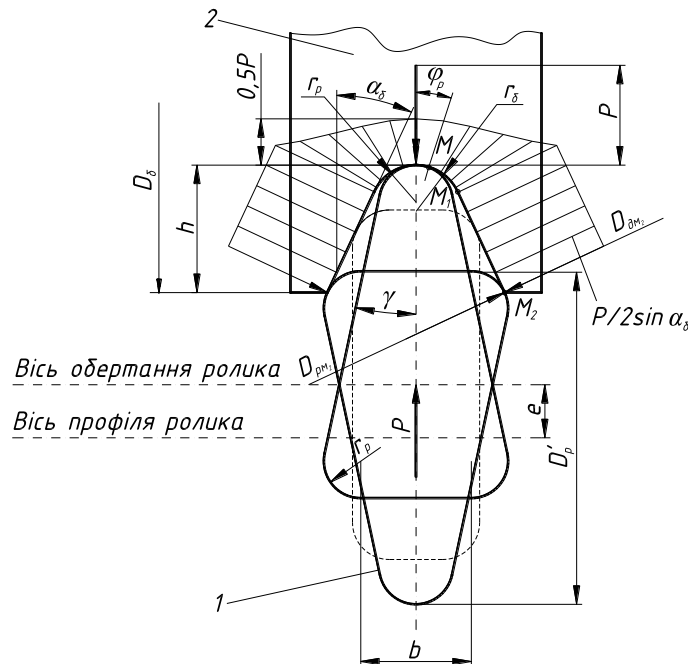


Рис. 38. Схема розрахунку параметрів процесу обкатування робочої поверхні канатного блоку клиновими роликом:

1 – ролик; 2 – оброблювана деталь

На підставі початкових даних при проектуванні пристрою для обкатування канатних блоків виконані розрахунки геометричних параметрів клинового ролика, розрахована його кривизна, кривизна обкатуваної деталі і нормальне посилення між роликом і деталлю в зоні деформації у всіх точках профілю деталі [72].

Биття профілю ролика згідно рис. 38 складає:

$$b = 2[(h - r_{\delta}) \operatorname{tg} \alpha_{\delta} + r_{\delta} / \cos \alpha_{\delta} - r_p \cos \alpha_{\delta}], \quad (43)$$

де h , r_{δ} , α_{δ} – відповідно глибина, радіус і кут профілю деталі;

r_p – радіус профілю ролика.

Ексцентриситет (відстань між осями обертання і профілю ролика) визначиться по залежності:

$$e = (h - r_p + r_p \sin \alpha_{\delta}) / 2. \quad (44)$$

Половина кута биття профілю клинового ролика

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left[\frac{(h - r_{\delta}) \operatorname{tg} \alpha_{\delta} + r_{\delta} / \cos \alpha_{\delta} - r_{\delta} \cos \alpha_{\delta}}{D'_p - 2r_p} \right], \quad (45)$$

де D'_p – діаметр ролика.

Умовний діаметр ролика при обкатуванні тороїдальної поверхні канатного блоку при поточному значенні кута φ_p (див рис. 38)

$$D_{p_M} = \frac{D'_p - 2r_p(1 - \cos \varphi_p)}{\cos \varphi_p}. \quad (46)$$

В точці M_1 спряження тороїдальної і конічної поверхонь профілю канатного блоку $\varphi_p = 90^\circ - \alpha_{\delta}$.

Звідки

$$D_{p_{M_1}} = \frac{D'_p - 2r_p(1 - \sin \alpha_{\delta})}{\sin \alpha_{\delta}}. \quad (47)$$

Умовний діаметр деталі в точці контакту її з роликом на тороїдальній поверхні

$$D_{\phi_M} = \frac{(D_{\phi} - 2h) + 2r_{\phi}(1 - \cos \varphi_p)}{\cos \varphi_p} \quad (48)$$

і на зовнішньому діаметрі канатного блоку

$$D_{\phi_{M_2}} = D_{\phi} / \sin \alpha_{\phi}. \quad (49)$$

Зусилля в точці контакту з тороїдальною поверхнею канатного блоку

$$P_M = P / 2 \cos \varphi, \quad (50)$$

де P – зусилля пружини.

На конічній поверхні профілю

$$P_{M_1} = P_{M_2} = P / 2 \sin \alpha_{\phi}. \quad (51)$$

Розрахунки показують, що оптимальне зусилля обкатування конічної поверхні струмка P_K , менше оптимального зусилля обкатування тороїдальної поверхні струмка P_T , тобто $P_K \ll P_T$ і не дивлячись на те, що при постійному зусиллі пружини P докладене зусилля P_M (рис. 38) в точці контакту з тороїдальною поверхнею струмка, розрахованого по формулі (50), декілька менше зусилля $P_{M_1} = P_{M_2}$, розрахованого по формулі (51) для конічної поверхні струмка, на ній в процесі обкатування утворюється хвилястість із-за збільшеного кута φ втискування ролика [73].

Цей недолік усувається виконанням профільного радіусу r_p змінної величини, що забезпечує постійність кута $\varphi = 5^\circ$ втискування ролика на всіх ділянках профілю деталі. Відрізки кіл профілю ролика з різною кривизною виконані в системі координат xOy , пов'язаній з віссю симетрії профілю ролика на його торці по математичних залежностях (рис. 39). Цим рішенням вдається уникнути перенаклепу поверхневого шару на конічній поверхні струмка канатного блоку, що забезпечує високу якість обробки всіх ділянок профілю струмка.

Координати центрів радіусів O_i і точок з'єднання відрізків кіл A_i профілю ролика в системі координат xOy , пов'язаній з віссю симетрії профілю ролика на його торці, по математичних залежностях:

$$O_i \begin{cases} x_{O_i} = x_{O_{i-1}} - (r_{p_{i-1}} - r_{p_i}) \cos \varphi_i; \\ y_{O_i} = y_{O_{i-1}} + (r_{p_{i-1}} - r_{p_i}) \sin \varphi_i. \end{cases}$$

$$A_i \begin{cases} x_{A_i} = x_{A_{i-1}} + r_{p_{i-1}} (\cos \varphi_{i-1} - \cos \varphi_i); \\ y_{A_i} = y_{A_{i-1}} + r_{p_{i-1}} (\sin \varphi_i - \sin \varphi_{i-1}). \end{cases}$$

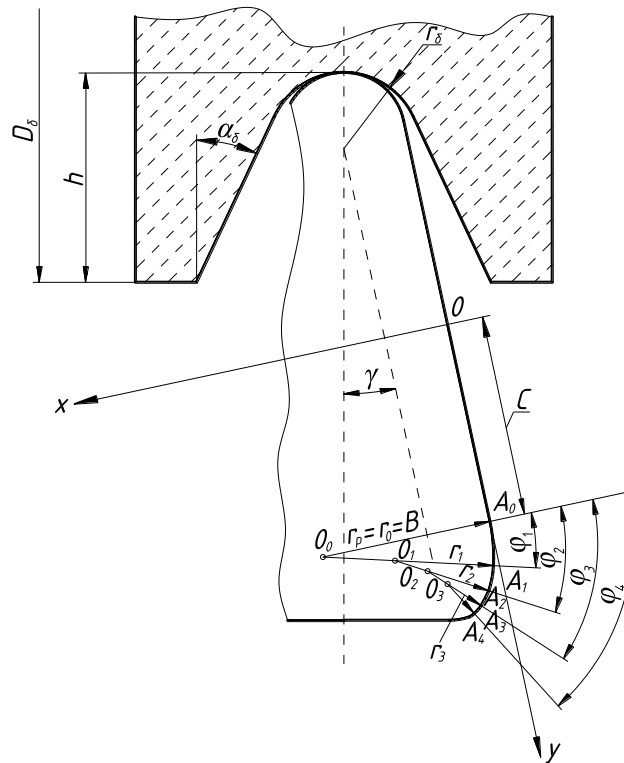


Рис. 39. Схема розрахунку змінної кривизни профілю ролика

Конструкція пристрою для обкатування канатних блоків показана на рис. 40 [72].

Клиновий ролик 1, що знаходиться у контакті з деталлю 2, встановлений на осі 3 за допомогою голчатого підшипника 4. Вісь 3 встановлена в отворі важеля 5. Важіль 5 змонтований на кронштейні 6 з можливістю повороту навкруги осі 7 на голчатих підшипниках 8 і опорних підшипниках 9 і 10. Вісь 3 прикріплена до важеля 5 планками

11 і 12. В отворі важеля 5 встановлені сферична шайба 13 і втулка 14, на яку одягнена пружина 15. На верхній торець пружини 15 вставлена втулка 16. В кронштейн 6 вкручена тяга 17 і зафіксована штифтом 18. На верхній кінець тяги 17 нагвинчується гайка 19 з рукояткою 20. В тілі кронштейна 6 виконано розточування з різьбленням, в яке вкручений гвинт 21 з контргайкою 22. В різьбові отвори важеля 5 вкручені римболти 23 і 24.

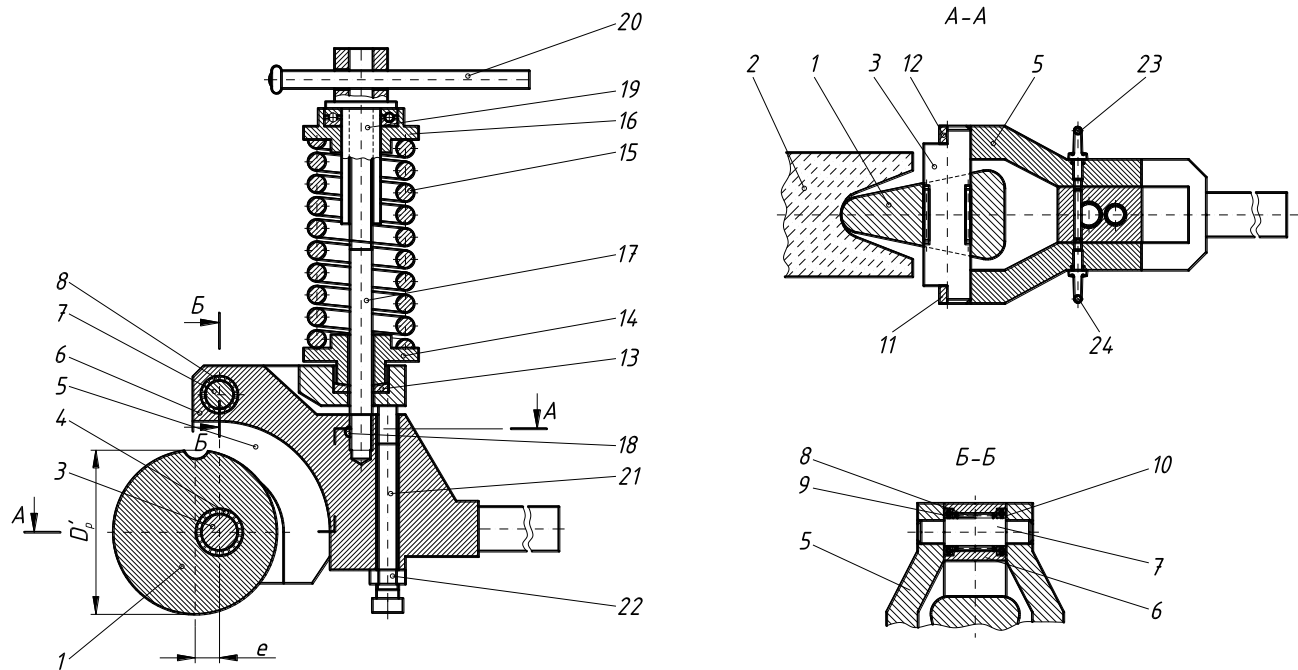


Рис. 40. Пристрій для обкатування канатних блоків клиновим роликом:

1 – ролик; 2 – обкатувана деталь; 3, 7 – вісь; 4, 8, 9, 10 – підшипники;
 5 – важіль; 6 – кронштейн; 11, 12 – планки; 13 – сферична шайба;
 14 – втулка; 15 – пружина; 16 – втулка; 17 – тяга; 18 – штифт;
 19, 22 – гайка; 20 – рукоятка; 21 – гвинт; 23, 24 – римболти

Пристрій працює таким чином. Канатний блок 2 встановлюють розточеним отвором в маточині на оправку, вставлену в центральний отвір планшайби карусельного верстата, закріплюють до планшайби по торцю маточини фіксуючою гайкою і притягують планками до планшайби верстату через мірні призми. Пристрій квадратним кінцем

кронштейна 6 закріплюють в різцетримачі бічного супорта карусельного верстата. Переміщенням супорта верстата ролик 1 вводять в струмок канатного блоку так, щоб ролик знаходився посередині осі 3, а своєю вузькою частиною робочого профілю торкнувся западини струмка деталі. Після цього бічний супорт верстата закріплюють на спрямовуючих. Обертанням гайки 19 за допомогою рукоятки 20 стискають пружину на необхідну величину. При стисненні пружини на 1 мм зусилля на ролику складає 0,38 кН.

Жорсткість пружинно-важільного механізму складає 0,38 кН/мм. Наприклад, при зусиллі на ролику, $P = 10$ кН необхідно стиснути пружину на величину $f_{np} = 10 / 0,38 = 26,3$ мм.

Для передачі зусилля з ролика на обкатувану деталь обертанням гвинта 21 встановлюють зазор між його торцем і поверхнею важеля 5 величиною $\approx 2 - 3$ мм. Обкатувану поверхню деталі мащують машинним маслом і включають обертання деталі із швидкістю 40 – 50 м/хв.

При обертанні деталі і ролика робочі поверхні (торці) ролика залишають на обкатуваній поверхні деталі два синусоїдальні сліди, які у міру обертання деталі і ролика поступово зміщуються в круговому напрямі, доки вся поверхня струмка не виявиться деформованою. При цьому наявність ексцентриситету (e) на ролику дозволяє звести до мінімуму (≤ 2 мм) переміщення осі ролика 1 разом з важелем 5 щодо кронштейна 6.

Зусилля на ролику коливається в межах ± 5 %, оскільки важіль 5 легко повертається навкруги осі 7; сили тертя в підшипниках кочення 8, 9, 10 невеликі. Цим забезпечується рівномірна деформація поверхневого шару струмка канатного блоку. Після цього, обертанням гвинта 21 повертають важіль 5, щоб виключити контакт ролика 1 з деталлю 2, а потім вимикають обертання деталі і переміщенням бічного супорта виводять ролик із струмка.

При зусиллі P пружини і на ролику, рівному 10 кН (величина стиснення пружини ≈ 25 мм) глибина пластичної деформації поверхневого шару струмка на вершині профілю складе

$$t = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} = \sqrt{\frac{10}{2 \cdot 0,3}} = 4,25 \text{ мм},$$

де σ_T – межа текучості сталі 35Л, рівний 0,3 кН/мм²;

а на конічній поверхні профілю з урахуванням формули (51) і $\alpha_\phi = 22,5^\circ$:

$$t_{M_1} = \sqrt{\frac{10}{2 \cdot 2 \cdot \sin 22,5^\circ \cdot 0,3}} = \sqrt{\frac{10}{1,2 \cdot 0,382}} = 4,65 \text{ мм}.$$

Ступінь наклепу (підвищення твердості) поверхневого шару з урахуванням рис. 37 складе ≈ 28 %.

При зусиллі P , рівному 20 кН

$$t = \sqrt{\frac{20}{2 \cdot 0,3}} = 5,8 \text{ мм}, \quad t_{M_1} = \sqrt{\frac{20}{1,2 \cdot 0,382}} = 6,6 \text{ мм},$$

а ступінь наклепу поверхневого шару складе ≈ 45 %.

Контрольні питання:

1. Як впливає дифузія зміцнюючих хімічних елементів на фізико-механічні властивості обкатаного поверхневого шару?
2. Розкажіть, в чому полягають переваги і недоліки при виборі способу обкатування клиновим роликом?
3. Як створюється зусилля на ролику при обкатуванні пристроєм з клиновим роликом?
4. Яким чином можливо уникнути перенаклепу поверхневого шару на конічній поверхні струмка канатного блоку при обкатуванні клиновим роликом?
5. За рахунок чого підвищується контактна міцність сталейних деталей при обкатуванні роликами?

**Кредитно-трансфертна схема
вивчення дисципліни “Ремонт машин”**

№ мо ду ля	Назва модуля	Всього годин кредитів	Розподіл аудиторного навантаження		Самостій на робота студентів	Вагомість модуля у формуванні знань та умінь, %
			Лекції	Лабораторно -практичні заняття		
1-й семестр						
1.	Надійність системи в період нормальної експлуатації та з резервуванням	54(1,5)	8	8	38	50
2.	Технологія усунення дефектів типових деталей	54(1,5)	8	8	38	50
	Всього	108(3)	16	14	76	100

Примітка: кожен структурний модуль з дисципліни може бути поділений на окремі змістові модулі.

**Рейтингова система балів
по дисципліні “Ремонт машин”**

Оцінювання знань студентів здійснюється за рейтинговою системою балів. Для забезпечення конкретної оцінки всіх видів роботи студента максимальна кількість залікових балів за кожний модуль приймається 100 з наступним перерахунком в загальну оцінку через коефіцієнт вагомості модуля. Оцінка виставляється у відповідності із приведеною шкалою.

Шкала оцінок

За шкалою ECTS	За національною шкалою	За шкалою навчального закладу (як приклад)
A	5 (відмінно)	90 - 100
BC	4 (добре)	75 - 89
DE	3 (задовільно)	60 - 74
FD	2 (незадовільно) з можливістю повторного складання	35 - 59
F	2 (незадовільно) з обов'язковим повторним курсом	1 - 34

Обсяг робіт з дисципліни “Ремонт машин” та рейтингова оцінка знань

Модулі	№ п\п	Назва роботи	тиждень	Кількість балів за виконану		
				3	4	5
Х семестр						
1. Надійність системи в період нормальної експлуатації та з резервуванн ям	1	Л.Р. Визначення середнього напрацювання на відмову T_{cp}	1,2	5	6	7
	2	Л.Р. Визначення напрацювання на відмову системи в цілому при експлуатаційному законі розподілу	3,4	5	6	7
	3	ЛР. Визначення ймовірності безвідмовної роботи системи	5,6	5	6	8
	4	ЛР. Визначення надійності гальмівної системи автомобіля	7,8	5	6	8
	Всього балів за 1 модуль			20	24	30
2.Технологія усунення дефектів типових деталей	5	Л.Р. Виконання ремонту гільзи	9-12	5	8	10
	6	Л.Р. Виконання ремонту шестерні	13-15	5	8	10
	7	Л.Р. Виконання ремонту зірочки	16-18	6	9	10
	Всього балів за 2 модуль			16	27	30
Всього				36	51	60
Іспит				24		40
Разом				60		100

ЛІТЕРАТУРА

1. *Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г.* Поверхностное упрочнение металлов – Киев: Наук. думка, 1995-256 с.
2. *Бутаков Б.И.* Усовершенствование процесса чистового обкатывания деталей роликами // Вестник машиностроения – 1984 - №7 – С. 50 - 53.
3. *Бутаков Б.И.* Способы обкатывания роликами винтов и червяков с крупным шагом в тяжелом машиностроении // Вестник машиностроения – 1985 - №3 – С. 44 - 50.
4. *Браславский В.М., Топычканов В.В., Бутаков Б.И.* Технология обработки медных плит кристаллизаторов // Вестник машиностроения. – 1980 - №9 - С. 58 - 59.
5. *Браславский В.М.* Технология обкатки крупных деталей роликами.- М. машиностроение, 1975 –160 с.
6. *Патент 1838080 СССР, В24В 39/02.* Устройство для чистовой и упрочняющей обработки отверстий раскатыванием // Бутаков Б. И. – Оpubл.30.08.93г. – Бюл. № 32.
7. *А.С. 1486327 СССР, В24В 39/04.* Устройство для чистовой обработки поверхностей тел вращения // Бутаков Б. И. – Оpubл. 15.06.89 – Бюл. № 22.
8. *Бутаков Б. И.* обкатывание роликами стандартных упорных резьб // Тр. ВНИИМЕТМАШа – 1978 - № 66 - У2 - С. 82 - 90.
9. *Патент 1838079 СССР, В24В 39/00.* Устройство для обкатывания боковых поверхностей канавок // Бутаков Б.И. – Оpubл. 30.08.93 – Бюл. № 32.
10. *Бутаков Б. И.* Обкатывание роликами шкивов клиноременных передач // Станки и инструмент – 1983 - № 2 - С. 28.
11. *Бутаков Б. И.* Обкатка крупных резьб методом огибания роликами //Технология, организация и механизация механосборочных работ – 1973 - № 12 -73 - 3 - С. 1-5.

12. *Бутаков Б.И.* Многороликовое устройство для обкатки резьб // Там же — С. 5 - 8.
13. *А.С. 1031719 СССР, В24В 39/00.* Устройство для обкатывания винтовых поверхностей // Бутаков Б.И. — Оpubл. 30.07.83 — Бюл. № 28.
14. *А.С. 1588474 СССР, В21 Н 5/02; В24В39/04.* Устройство для обкатывания поверхностей деталей // Бутаков Б.И., Маршалик Ю.З. — Оpubл. 30.08.90 — Бюл. № 32.
15. *Семибратов В.П., Топычканов В.В., Бутаков Б.И.* Экономическая эффективность обработки крупных деталей машин поверхностным пластическим деформированием // Вестник машиностроения — 1971 - № 12- С. 71 - 73.
16. *Кудрявцев И. В.* Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении.— М.: Машгиз, 1951.— 278 с.
17. *Хейфец С. Г.* Аналитическое определение глубины наклепанного слоя при обкатке роликами стальных деталей // Сб. ЦНИИТМАШа, кн. 49.— М.: Машгиз, 1952.— С. 7—17.
18. *Беляев Н. М.* Местные напряжения при сжатии упругих тел // Инженерные сооружения и строительная механика.— Л., 1924.— С. 20 — 32.
19. *Кудрявцев И. В., Петушков Г. Е.* Влияние кривизны поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом // Вестник машиностроения.— 1966. - № 7. — С. 41 — 43.
20. *Дрозд М.С., Федоров А. В.* Исследование глубины наклепанного слоя и интенсивности пластической деформации при вдавливании сферического пуансона произвольной кривизны // Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием.— 1970.— 90.— С. 224—233.
21. *Прочность, устойчивость, колебания: Справочник. Т. 2. — М.: Машиностроение, 1968.— 468 с.*

22. *Дрозд М. С., Федоров А. В., Сидякин Ю. И.* Расчет глубины распространения пластической деформации в зоне контакта тел произвольной кривизны // Вестник машиностроения. — 1972. — № 1. — С. 54 — 57.
23. *Дрозд М. С.* Определение механических свойств металла без разрушения.— М.: Металлургия, 1965. — 208 с.
24. *Черный А. Г.* Исследование зависимости пределов выносливости упрочненных валов от характеристик поверхностного пластически деформированного слоя и параметров процесса упрочнения: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 1971. — 215 с.
25. *Патшев Д. Д.* Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 1978. — 152 с.
26. *Жасимов М. М.* Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. — Алма-Ата: Наука, 1986. — 208 с.
27. *Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П.* Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин.— М.: Машиностроение, 1979.— 170 с.
28. Исследование давления на поверхности пластического контакта ролика с деталью при деформационном упрочнении / В. М. Браславский, В. А. Оленева, М. А. Петрова и Б. И. Бутаков // Производство крупных машин. Технология обработки и сборки. — 1975. — Вып. XXV. — С. 193 — 199.
29. *Хаимова-Малькова Р.И.* Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. — М.: Наука, 1970. — 150 с.
30. *Unkel H.* Zeitschrift für Techn. - Physik. - 1938. - Bd 19. - S.7. - 12.
31. *Tamman G., Müller H.* Zeitschrift für Metallkunde. - 1938. - Bd 28. - S. 49 – 54.

32. *Саверин М.М.* Контактная прочность материала в условиях одновременного действия нормальной и касательной нагрузки. — М.: Машгиз, 1956. — 195 с.
33. *Целиков А.И.* Теория расчета усилий в прокатных станках. — М.: Metallurgizdat, 1962. — 496 с.
34. *Бутаков Б.И.* Оценка точности определения глубины наклепа при поверхностном пластическом деформировании // Вестник машиностроения. — 1982.— № 11. — С. 22—24.
35. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов.— М.: Оборонгиз, 1952. — 556 с.
36. *Кобрин М. М.* Эпюры остаточные напряжений при контактной и контактно-сдвиговой схеме поверхностного пластического деформирования // Вестник машиностроения. - 1963. — № 1. — С. 56 — 60.
37. *Солонин И. С.* Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: машиностроение, 1972. — 216 с.
38. *Смирнов Н. В., Дунин-Борковский И. В.* Курс теории вероятностей и математической статистики. — М.: Наука, 1969. — 512 с.
39. *Степнов М. Н.* Статистическая обработка результатов механических испытаний.— М.: Машиностроение, 1972. — 232 с.
40. *Бутаков Б. И.* Статистическая оценка точности определения глубины изменения механических свойств упрочненного поверхностного слоя // Оборудование и технологии высоковольтного разряда в жидкости. - Киев: Наук. думка, 1987. — С. 48 — 53.
41. *Хальд А.* Математическая статистика с техническими приложениями.— М.: Изд-во иностр. литературы, 1956. — 664 с.
42. Исследование поверхностного слоя валов, упрочненных обкаткой роликами / В. М. Браславский, Б. И. Бутаков, Б. И. Гольдштейн и др. // Пр-во крупных машин. Технология механической обработки и сборки.— 1975.— Вып. XXV.— С. 162—170.

43. *Гольдштейн М.И., Фарбер В. М.* Исследование отпуска закаленного железа // Физика металлов и металловедение. — 1963. — 25, вып. 1. - С. 94 - 96.
44. *Орлов Л. Г.* Деформация поликристаллического железа у предела текучести // Физика твердого тела. — 1967. — 9, № 8. — С. 23 — 34.
45. *Крагельский И.В.* Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
46. *Демкин Н.Б.* Контактное шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 226 с.
47. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
48. *Браславский В.М., Топычканов В.В.* Обкатка деталей роликами как средство повышения износостойкости. В кн.: Производство крупных машин. Вып. XIX. - М.: Машиностроение, 1969. - С.56 - 60.
49. *Браславский В. М., Топычканов В. В.* Влияние раскатывания гильз пневмо-цилиндров на износостойкость резиновых уплотнений. В кн.: Производство крупных машин. Вып. XIX. - М.: Машиностроение, 1969. - С. 60 - 64.
50. *Хрущев М.М., Бабичев М.А.* Экспериментальные основы теории абразивного изнашивания// Вестник машиностроения. - 1964. - №6. - С. 56 - 62.
51. *Кащеев В.Н.* Абразивное разрушение твердых тел: Автореф. дис. ... доктора физ. мат. наук. - Томск, 1963. - 45 с.
52. *Тененбаум М. М.* Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. - М.: Машиностроение, 1966. - 332 с.
53. *Школьник Л.М., Шахов В.И.* Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. - М.: Машиностроение, 1964. - 184 с.

54. *Маталин А.А.* Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – Киев: Техника, 1971. – 144 с.
55. *Фукс А.И., Эльясберг М. Е.* Определение оптимального состава гаммы горизонтально-расточных станков. - М.: НИИМАШ, 1969. - 65 с.
56. *Рыжов Э. В.* Контактная жесткость деталей машин. - М.: Машиностроение, 1968. -180 с.
57. *Бейлард П. П.* Напряжения от локальных нагрузок в цилиндрических сосудах давления. Сб. Вопросы прочности цилиндрических оболочек. - М., Оборонгиз, 1960, - С. 43—65.
58. *Бутаков Б. И.* Повышение контактной прочности стальных деталей обкатыванием их роликами / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // Сучасні проблеми трибології : міжнар. наук.-техн. конф., 19-21 травня 2010 р. : тези доп. — К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2010 — С. 74.
59. *Степнов М. Н.* Статистическая обработка результатов механических испытаний / М. Н. Степнов. — М. : Машиностроение, 1972. — 232 с.
60. *Степнов М. Н.* Статистическая обработка результатов механических испытаний. Справочник / М. Н. Степнов. — М. : Машиностроение, 1985. — 306 с.
61. *Смирнов Н. В.* Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. — М. : Наука, 1969. — 512 с.
62. *Рыбакова Л. М.* Структура и износостойкость металла / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова. — М. : Машиностроение, 1982. — 212 с.
63. *Марковский Е. А.* Научные предпосылки создания новых износостойких литых материалов с высокими эксплуатационными свойствами / Е. А. Марковский // Прогрессивные технологии литья и кристаллизации сплавов. — 1983. — С. 43—57.
64. *Бабей Ю.И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – Киев: Наукова думка, 1988. – 240 с.

65. *Бокштейн Б. С.* Диффузия в металлах / Б. С. Бокштейн. — М. : Металлургия, 1978. — 248 с.
66. *Кузьменко П. П.* Электроперенос, термоперенос и диффузия в металлах / П. П. Кузьменко – К. : Вища школа, 1983. — 152 с.
67. *Бутаков Б. И.* Основные принципы технологии импульсного и малоскоростного воздействия на структуру и свойства металлов и сплавов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, - Киев: -1992 – 533 с.
68. *Бутаков Б. И.* Разработка способа обкатывания роликами стальных деталей с целью повышения их контактной прочности / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // MOTROL. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch of Lublin Ropczyce School of Engineering and Management. — Lublin, 2008. — Vol. 10B. — P. 15—28.
69. *Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г.* Поверхностное упрочнение металлов.- Киев: Наукова думка, 1995. – 256 с.
70. *Бутаков Б. И.* Технология обкатывания роликами галтелей валов / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко, П. А. Бондар // Материалы десятой юбилейной международной промышленной конференции, 18 – 22 февраля 2010 г. — Славское, 2010. — С. 125—131.
71. *Бутаков Б. И.* Технологія обкатування роликами деталей складної форми / Б. І. Бутаков, Д. Д. Марченко // Вісник аграрної науки Причорномор'я. — Миколаїв, 2007. — Випуск 1 (39). — С. 242—251.
72. *Пат. 93252 України, МПК В 24 В 39/04.* Спосіб чистової та зміцнюючої обробки поверхонь тіл обертання складного профілю і пристрій для його здійснення / Б. І. Бутаков, В. С. Шебанін, Г. С. Бутакова, Д. Д. Марченко ; заявник і патентовласник Миколаївський державний аграрний університет. – № а200815098 ; заявл. 29.12.2008 ; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13.

73. *Бутаков Б. И.* Разработка технологии обкатывания роликами стальных деталей с целью повышения их контактной прочности / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // *Праці Таврійської державної агротехнічної академії.* — Мелітополь, 2007. — Випуск 7, том 5. — С. 138—150.