

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Г.М. ВИГОВСЬКИЙ
Н.О. БАЛИЦЬКА
Л.Є. ГЛЕМБОЦЬКА
О.Л. МЕЛЬНИК**

**ПРОГРЕСИВНІ ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ
Навчальний посібник**

Видання друге, доповнене

**Житомир
2021**

Рекомендовано Вченою радою Державного університету «Житомирська політехніка» (Протокол № 3 від 25 червня 2021 року)

Авторський колектив:

- Г.М. Виговський – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка»;
- Н.О. Балицька – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка»;
- Л.Є. Глембоцька – кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка»;
- О.Л. Мельник – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Рецензенти:

- І.В. Луців – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя;
- Я.Д. Ярош – доктор технічних наук, професор, декан факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроекологічного університету;
- П.П. Москвін – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики та вищої математики Державного університету «Житомирська політехніка».

П78 Прогресивні процеси обробки матеріалів : навчальний посібник / Г.М. Виговський, Н.О. Балицька, Л.Є. Глембоцька, О.Л. Мельник – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – 181 с.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до робочої програми дисципліни «Прогресивні процеси обробки матеріалів», яку включено до навчального плану підготовки здобувачів освітнього ступеня «Доктор філософії» спеціальності 131 «Прикладна механіка».

У навчальному посібнику висвітлені теоретичні основи прогресивних процесів обробки матеріалів.

УДК 621.9.04

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| ВСТУП | 3 |
| Розділ 1. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ | 4 |
| Розділ 2. РІЗАННЯ ІНСТРУМЕНТАМИ, ОСНАЩЕНИМИ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ | 11 |
| Розділ 3. ОБРОБКА АЛМАЗНИМИ СТРІЧКАМИ ТА ХОНАМИ | 16 |
| Розділ 4. ПОЛІПШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН СПОСОБАМИ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ | 20 |
| 4.1. Класифікація методів поверхневого пластичного деформування .. | 20 |
| 4.2. Области раціонального застосування різних методів ППД..... | 24 |
| 4.3. Процеси обробки деталей машин дорнуванням | 25 |
| 4.4. Алмазне вигладжування..... | 36 |
| 4.5. Процеси обкочування та розкочування..... | 47 |
| 4.6. Вібраційні способи вигладжування, обкочування, розкочування й накатування | 64 |
| Розділ 5. УДАРНО-ВІБРАЦІЙНІ СПОСОБИ ЗМІЦНЕННЯ | 83 |
| 5.1. Дробоструминне зміцнення..... | 83 |
| 5.2. Об'ємне віброударне зміцнення | 92 |
| 5.3. Ударно-відцентрові способи обробки..... | 98 |
| 5.4. Зміцнення карбуванням | 104 |
| Розділ 6. ТЕРМОМЕХАНІЧНІ І ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ І НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ | 109 |
| 6.1. Електромеханічна обробка..... | 109 |
| 6.3. Нанесення покриттів | 116 |
| 6.4. Наплавлення і напилювання | 118 |
| 6.5. Полімерні та емалеві покриття | 122 |
| Розділ 7. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ Й ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ | 125 |
| 7.1. Електроерозійна обробка | 125 |
| 7.2. Електроіскрова та електроімпульсна обробка | 128 |
| 7.3. Електроконтактна обробка..... | 134 |
| 7.4. Електрохімічна обробка..... | 136 |
| 7.5. Електрохімікомеханічна обробка | 143 |
| 7.6. Ультразвукова обробка..... | 149 |
| 7.7. Комбіновані методи обробки | 159 |
| 7.7.2. Електроерозійно-хімічна обробка | 162 |
| 7.7.3. Ультразвукова електрохімічна обробка | 163 |
| Розділ 8. ПРОМЕНЕВІ МЕТОДИ ОБРОБКИ | 166 |
| 8.1. Фотоннопроменева обробка..... | 166 |
| 8.2. Електроннопроменева обробка..... | 169 |
| 8.3. Обробка матеріалів плазмовим струменем | 172 |
| ЛІТЕРАТУРА | 176 |

ВСТУП

Навчальний посібник являє собою результат аналізу і узагальнення літературних джерел по процесам обробки, заснованих на застосуванні високоєфективних різальних інструментів з надтвердих матеріалів, методів поверхневого пластичного деформування, способів ударно-вібраційного зміцнення, термомеханічної і електрофізичної обробки, процесів комбінованого різання з накладанням на зону різання вібрацій і ультразвукових коливань. В посібнику висвітлено основні способи електрохімічної та електрофізичної обробки матеріалів підвищеної міцності, описано можливості обробки цих матеріалів електронним і лазерним променем.

При підготовці розділу 1 «Експлуатаційні властивості деталей машин та якість поверхневого шару» використані роботи [1–3, 51–55]. Розділ 2 посібника «Різання інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами» ґрунтується на аналізі робіт [3–4, 51–55]. Праці [5–8, 51–55] стали інформаційною базою для розділу 3 «Обробка алмазними стрічками та хонами». В розділі 4 «Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин способами пластичного деформування» представлені результати наукових напрацювань [1, 3, 7, 9–35]. Для підготовки розділу 5 навчального посібника «Ударно-вібраційні способи зміцнення» використано матеріали робіт [5, 7, 21, 22, 27, 31, 33, 36–45]. На основі узагальнення праць [33, 46–49] було розроблено розділ 6 «Термомеханічні і електрофізичні способи обробки і нанесення покриттів». Джерела [2–3, 15, 24, 50] стали науково-інформаційною базою для розділу 7 посібника «Електрофізичні й електрохімічні методи обробки». Результати робіт [2–4, 36, 49, 50] використані в процесі розробки розділу 8 «Променеві методи обробки».

Навчальний посібник розрахований на здобувачів освітнього ступеня «Доктор філософії» спеціальності 131 «Прикладна механіка», а також може бути корисний науковцям та інженерно-технічним працівниками машинобудівних підприємств.

Розділ 1

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

Характеристики роботи машин безпосередньо залежать від якості виконання окремих деталей, які входять до їх складу. Необхідним є дотримання геометричної форми та якісних характеристик поверхневого шару деталей. У процесі експлуатації деталей на них діють сили змінних напрямів та величин, агресивні середовища, мають місце високі теплові навантаження тощо. Деталі повинні протистояти зовнішнім впливам протягом заданого періоду роботи – це буде забезпечувати надійну роботу механізмів та машин у цілому. Контакткування спряжених деталей відбувається по поверхнях різних форм. При цьому від якості поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості – опір утоми, зносостійкість, корозійна стійкість тощо.

Поверхневий шар деталі піддається найбільш сильному фізико-хімічному впливу: механічному, тепловому, магнітоелектричному, світловому, хімічному тощо. У більшості випадків починають погіршуватися властивості поверхні деталі, наприклад внаслідок зношування, ерозії, кавітації, корозії, тріщин та інших руйнувань. Тому до поверхневого шару деталей зазвичай висуваються більш високі вимоги.

Поверхневий шар деталі – це шар, структура, фазовий і хімічний склад котрого відрізняються від основного матеріалу, з якого виготовлена деталь.

У поверхневому шарі можна виділити наступні основні зони (рис. 1.1): адсорбованих з навколишнього середовища молекул і атомів органічних і неорганічних речовин; продуктів хімічної взаємодії металу з навколишнім середовищем (зазвичай оксидів); зі зміненими параметрами в порівнянні з основним металом; зі структурою, фазовим і хімічним складом, що виникає при виготовленні деталі й змінюється в процесі експлуатації.

Товщина й стан зазначених шарів поверхневого шару можуть змінюватися залежно від складу матеріалу, методу обробки, умов експлуатації. Оцінка цього стану здійснюється методами хімічного, фізичного й механічного аналізу. Різноманіття параметрів стану поверхневого шару й методів їхньої оцінки не дозволяє виділити єдиний параметр, що визначає якість поверхневого шару. На практиці стан поверхневого шару оцінюється набором одиничних або комплексних властивостей, які оцінюють якість поверхневого шару. Ці параметри характеризують: геометричні параметри нерівностей поверхні; фізичний стан; хімічний склад; механічний стан.

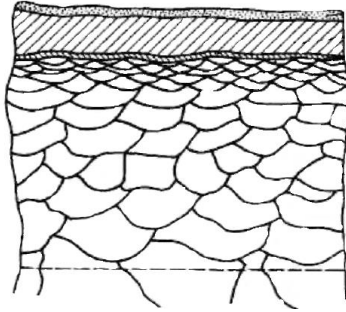


Рис. 1.1. Схема поверхневого шару деталі

Геометричні параметри нерівностей поверхні оцінюються параметрами шорсткості, регулярних мікрорельєфів, хвилястості.

Шорсткість поверхні – це сукупність нерівностей з відносно малими кроками (співвідношення висоти нерівностей і кроку менше 50).

Хвилястість поверхні – це сукупність нерівностей, що мають крок більший, ніж базова довжина, яка використовується для виміру шорсткості (співвідношення висоти і кроку більше 50 і менше 1000).

Регулярні мікрорельєфи – це нерівності, які, на відміну від шорсткості й хвилястості, однакові за формою, розмірами і взаєморозташуванням.

Регулярний мікрорельєф одержують обробкою різанням або поверхневим пластичним деформуванням роликками, кульками, алмазами тощо.

Фізичний стан поверхневого шару деталей у технології зміцнення найбільш часто характеризується параметрами структури й фазового складу.

Структура – це характеристика металу, що залежить від методів вивчення його будови. Виділяють наступні типи структур: кристалічна, субструктура, мікроструктура, макроструктура.

Кристалічна структура. Метали являють собою кристали із тривимірною періодичністю. Основою кристалічної структури є тривимірні ґратки, у просторі яких розташовуються атоми.

Субструктура. У реальному металі кристалічна структура має безліч дефектів, які в значній мірі визначають його властивості. Сукупність дефектів ґраток та їхній просторовий розподіл у кристалі називається субструктурою. Тут кристали можуть утворювати більші фрагменти – кристаліти, блоки, зерна, фрагменти, полігони.

Мікроструктура – це структура, яка вивчається при великих збільшеннях за допомогою металографічних мікроскопів. Цей аналіз

дозволяє визначити наявність, кількість і форму структурних складових матеріалу.

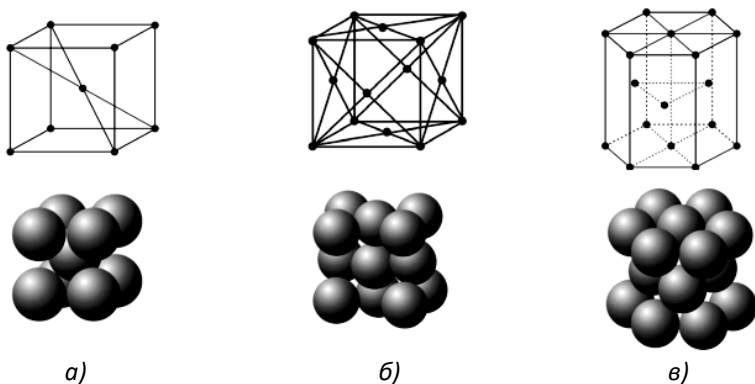


Рис. 1.2. Типи кристалічної структури металів:
а) об'ємно-центрована кубічна; б) гранецентрована кубічна;
в) гексагонально-щільноупакована

Макроструктура – це структура, що визначається неозброєним оком або при невеликих збільшеннях. За допомогою макроаналізу визначають тріщини, неметалічні включення, домішки тощо.

Фізичний стан характеризується числом і концентрацією фаз, розподілом фаз по поверхневому шару, обсягом сплаву тощо.

Дослідження фізичного стану здійснюється експериментальними методами фізики твердого тіла: дифракційними й мікроскопічними.

Хімічний склад характеризується елементним складом сплаву й фаз, концентрацією елементів в обсязі фаз, сплаву тощо.

Дослідження хімічного складу поверхневого шару дозволяють оцінити адсорбцію з навколишнього середовища молекул і атомів органічних і неорганічних речовин, дифузійні процеси, процеси окислювання й інші, що відбуваються при обробці металів.

Механічний стан металу визначається параметрами:

- опором деформуванню: межа пружності, межа пропорційності, межа текучості, межа міцності, твердість тощо;
- пластичністю: відносне подовження, відносне звуження, ударна в'язкість та іншими, які реєструються спеціальними випробуваннями зразків.

Наприклад, у процесі пластичної деформації, що завжди супроводжує механічну обробку, всі характеристики механічного стану поверхневого шару змінюються: показники опору деформуванню збільшуються, а

показники пластичності зменшуються. Це явище називають **деформаційним зміцненням**.

В інженерній практиці деформаційне зміцнення поверхневого шару визначають виміром твердості або мікротвердості. Для цього твердість вимірюють на поверхні металу й усередині металу (за допомогою пошарового травлення). У результаті встановлюють товщину зміцненого шару і ступінь деформаційного зміцнення δ_H .

$$\delta_H = \frac{(H_{OBR} - H_{ВИХ})}{H_{ВИХ}},$$

де H_{OBR} і $H_{ВИХ}$ – відповідно твердість (мікротвердість) металу після й до обробки.

Важливою характеристикою стану поверхневого шару є залишкові напруження.

Залишкові напруження – це пружні напруження, які залишилися в деталі після обробки. Залежно від обсягів зони, у яких розраховують залишкові напруження, вони умовно підрозділяються на залишкові напруження:

- першого роду, урівноважені в макрооб'ємах тіла;
- другого роду, урівноважені в межах розміру зерен;
- третього роду, урівноважені в межах декількох міжатомних відстаней.

Залежно від характеру й інтенсивності фізико-механічних процесів, що відбуваються при обробці, залишкові напруження можуть мати різний знак:

- (+) – розтягування;
- (-) – стискання.

Умова рівноваги вимагає, щоб в об'ємі деталі сума проекцій всіх сил дорівнювала нулю. Тому в деталі є області зі стискаючими й залишковими напруженнями розтягу.

Узагальнено можна сказати, що залишкові напруження першого роду є результатом нерівномірних пластичних деформацій різних шарів деталі (викривлення деталі).

Залишкові напруження впливають на міцність і довговічність деталей машин і конструкцій. Залишкові стискаючі напруження, що виникають у поверхневому шарі, підвищують циклічну міцність деталей, тому що вони розвантажують поверхневі шари від напружень, викликаних навантаженнями й, навпаки, залишкові напруження розтягу зменшують міцність деталей внаслідок підвищення напруженості поверхневого шару.

Останнім часом відбувається інтенсифікація процесів експлуатації деталей зі збільшенням швидкостей переміщення робочих органів, підвищенням температур і тисків. Це викликає необхідність підвищення якісних характеристик поверхневого шару. Оптимальними (з погляду підвищення експлуатаційних властивостей деталей) є поверхні високої твердості з дрібнодисперсною структурою, зі стискаючими залишковими напруженнями та раціональною формою мікронерівностей.

Одним із найважливіших параметрів, що визначає якість обробки, є шорсткість обробленої поверхні, яка характеризується не тільки висотними розмірами, але й параметрами мікрорельєфу, та фізико-механічними характеристиками оброблених поверхонь.

Характеристиками оброблених поверхонь є нормовані висотні й крокові параметри шорсткості. На експлуатаційні властивості поверхні деталі впливають нормовані параметри, а також радіуси закруглення виступів r_B і западин $r_{3П}$ мікронерівностей, кути нахилу їхніх бічних сторін ρ і відстань від лінії виступів до середньої лінії R_ρ . Ці параметри впливають на такі експлуатаційні властивості деталей, як зносостійкість, корозійна стійкість, герметичність і міцність з'єднань, особливо при динамічних навантаженнях та тяжких умовах тертя. Значно впливають на зносостійкість і герметичність з'єднань також напрямки слідів обробки.

Всі причини, що обумовлюють утворення шорсткості на оброблених поверхнях, можуть бути пов'язані з геометрією й кінематикою процесу обробки, з особливостями пластичної й пружної деформацій оброблюваного матеріалу, а також з виникненням вібрацій. При цьому характер виникаючих мікронерівностей може визначатися як однією із зазначених вище причин, так і взаємодією багатьох факторів.

Так, зносостійкість, що визначає здатність поверхонь деталей опиратися руйнуванню при терті ковзання й кочення, а також при мікропереміщеннях, обумовлених вібраціями, залежить від характеру й параметрів мікрорельєфу поверхні, особливо таких як висота мікронерівностей, форма й радіус закруглення їхніх вершин, напрямку слідів обробки тощо.

Контактна твердість, що характеризує здатність контактуючих поверхонь пручатися дії деформуючих сил, у значній мірі залежить від розміру фактичної опорної поверхні, зумовленої відносною опорною довжиною профілю, радіусом закруглення вершин, кроком і кутом нахилу бічних сторін мікронерівностей.

Міцність втоми визначає здатність деталей машин опиратися руйнуванню протягом певного проміжку часу при дії на них знакозмінних і динамічних навантажень, вона підвищується зі зменшенням висоти мікронерівностей і збільшенням радіусів закруглення вершин і западин, а також залежить від напрямку слідів обробки й наявності поверхневих

тріщин.

Корозійна стійкість визначає спроможність поверхонь деталей опору руйнуванню під впливом навколишнього середовища (повітря, рідини, газів та інших корозійних середовищ); вона зростає зі зменшенням висоти мікронерівностей, зі збільшенням радіусів закруглень вершин і западин, що утворюються при обробці поверхонь різанням чи пластичним деформуванням.

Під дією сил різання й пластичного деформування в поверхневому шарі металу оброблюваної деталі відбувається подрібнювання й витягування кристалічних зерен у напрямку обробки з утворенням текстури, а також викривлення площин ковзання з появою напружень. Перекручування кристалічних ґраток супроводжується збільшенням твердості й міцності поверхневого шару, зменшенням пластичності й в'язкості, зміною магнітних та інших властивостей металу.

Одночасно зі зміцненням, під дією температури, що виникає в зоні обробки, відбувається деяке зменшення міцності поверхневого шару металу. Тривалий температурний вплив зменшує величину зміцненого шару, який одержуємо в результаті деформації.

Ступінь і глибина зміцненого шару залежать від методів, режимів і умов обробки, а також від геометрії інструмента. Зміна режиму різання або пластичного деформування, призводить до зміни сил, що впливають на оброблювану поверхню, а збільшення тривалості цього впливу викликає підвищення ступеня зміцнення та зростання глибини зміцненого шару. Зменшенню зміцнення в процесі обробки металів різанням сприяє зниження сил тертя й збільшення інтенсивності відводу тепла із зони різання за рахунок застосування охолодження і вибору оптимального режиму обробки й геометрії різального інструменту.

Зміцнення поверхневого шару в більшості випадків підвищує зносостійкість з'єднаних поверхонь.

Зміцнення запобігає виникненню субмікроскопічних порушень суцільності металу, що викликає утворення й розвиток тріщин, а також перешкоджає росту вже наявних у металі тріщин й інших дефектів. Воно нейтралізує вплив окремих зовнішніх дефектів, що шкідливо впливають на працездатність деталі, параметрів шорсткості поверхні. Все це підвищує міцність деталей, що працюють у нормальних умовах або при температурах не більше 600–800 °С.

Зміцнення значно впливає на корозійну стійкість деталей. При обробці металів різанням у поверхневому шарі створюються неоднорідності, які викликають появу корозійних мікроелементів. При цьому наявність на поверхні шорсткості з особливо великими висотами і малими радіусами закруглення западин викликає інтенсивне протікання корозійних процесів.

При механічній обробці в поверхневому шарі виникають залишкові напруження, величина, глибина поширення й знак яких залежать від застосовуваних методів, режиму обробки, геометрії різального або деформуючого інструмента й ряду інших факторів. При пластичному деформуванні поверхні в зовнішньому шарі виникають стискаючі, а в глибинних шарах – розтягуючі напруження. У результаті швидкого охолодження поверхневого шару, після припинення впливу на нього різального інструменту, у зовнішньому шарі розвиваються залишкові напруження розтягу, а в глибинних шарах – напруження стиску. Перевага того або іншого фактора розвитку напруженого стану в поверхневих шарах при різних методах і режимах обробки визначає характер і глибину поширення напружень.

Таким чином, деталі, які мають однакову шорсткість поверхні, та виготовлені різними способами при різних режимах і умовах обробки, різним інструментом, мають різні фізико-механічні властивості поверхневих шарів та експлуатаційні властивості.

Більшість деталей виготовляється із застосуванням процесів різання, які характеризуються високою продуктивністю і точністю, а також універсальністю виготовлення. Разом з тим, обробка різанням не завжди дозволяє отримати деталі з раціональними характеристиками поверхневого шару.

Традиційні процеси технології машинобудування в більшості випадків побудовані на процесах обробки різанням (точінням, фрезеруванням, свердлуванням та ін.) та фінішною абразивною обробкою шліфуванням, хонінгуванням тощо. Але ряд процесів обробки можливо спростити використанням таких сучасних процесів як методи поверхневого пластичного деформування, електрофізичні та електрохімічні методи тощо. При цьому у ряді випадків є можливість суттєво підвищити продуктивність праці та забезпечити отримання поверхневого шару деталей зі необхідними стабільними характеристиками. Інколи ці методи є єдиним способом отримання поверхневих шарів необхідної якості.

Так, наприклад, поверхнєве пластичне деформування (ППД), при якому відбувається тонке пластичне деформування поверхневого шару без утворення стружки, зміцнює поверхневий шар, підвищує зносостійкість та стійкість до корозійних впливів.

Розділ 2

РІЗАННЯ ІНСТРУМЕНТАМИ, ОСНАЩЕНИМИ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Однією з основних передумов підвищення якості деталей і точності обробки важкооброблюваних конструкційних матеріалів є створення й ефективне застосування нових надтвердих матеріалів (НТМ) на основі щільних модифікацій нітриду бору. При цьому розширюються технологічні можливості металообробки, більш повно використовується верстатний парк, підвищується віддача наукомістких технологій, з'являються основи для високопрецизійних робочих процесів.

Надтверді матеріали на основі щільних модифікацій нітриду бору, дещо поступаючись алмазу за твердістю, характеризуються високою термостійкістю, що досягає 1500 °С, високим опором термічним ударам та циклічним навантаженням, а також слабкою хімічною взаємодією з залізом.

Як підтверджує широка практика, найбільш ефективним є застосування лезового інструмента з нітриду бору при обробці загартованих сталей, чавунів різноманітної твердості, наплавлених матеріалів, важкооброблюваних високолегованих сталей та сплавів. Тут переваги надтвердих нітридборних матеріалів реалізуються найбільш повно.

Процес різання лезовим інструментом на основі надтвердих модифікацій нітриду бору істотно відрізняється від процесу різання алмазним інструментом, що визначається його особливими фізико-механічними властивостями.

Особливостями формування обробленої поверхні при лезовій обробці інструментами із нітриду бору є не тільки вплив геометричних параметрів інструмента, але й значною мірою короткочасна ударна дія високої температури та силового фактора. Короткочасність і локальність дії цих факторів впливає на найтонші прошарки поверхні 10–30 мкм. Звідси великі градієнти температур, напружень і можливості фазово-структурних змін в обробленій поверхні.

Експлуатаційні властивості деталей машин, які оброблені лезовим інструментом, залежать від шорсткості, твердості й залишкових напружень у поверхневих шарах оброблених деталей. Значення шорсткості поверхні, що досягаються при основних способах лезової обробки, наведені нижче, мкм:

- точіння чистове 5,0–2,5;
- точіння тонке 1,25–0,32;
- точіння тонке незагартованих сталей 0,5–0,15;

- точіння тонке загартованих сталей 0,25–0,125;
- точіння чистове чавунів сірих 2–0,5;
- точіння тонке високоміцних чавунів 1–0,25;
- фрезерування чистове 2,5–0,63;
- фрезерування тонке 1,25–0,63;
- стругання тонке широкими різцями 2,5–0,63;
- розгортання чистове 1,25–0,63;
- розгортання тонке 0,63–0,32;
- розгортання алмазне чавунів 0,5–0,16.

Мінімальні шорсткості при точінні й фрезеруванні досягаються при використанні інструментів з надтвердих матеріалів на основі нітриду бору.

НТМ зазвичай виготовляються у вигляді полікристалів діаметром 4–8 і висотою 3,5–8 мм. Найпоширенішими НТМ є ельбор-Р, гексаніт-Р, білбор, ісмит-1 і ісмит-2. Ними оснащуються різного призначення й розмірів збірні токарні різці й торцеві фрези діаметром 80–250 мм. Найбільше поширення одержали збірні конструкції інструментів, в основу яких покладені різцеві вставки.

При лезовій обробці загартованих сталей різцями з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) у поверхневому прошарку формуються стискуючі залишкові напруження, що підвищують зносостійкість деталей машин. Виявлено однаковий характер залежностей залишкових напружень і мікротвердості від режимів різання при точінні і розточуванні. Розходження лише кількісні: більший вплив глибини різання, підвищений рівень стискуючих напружень і менша глибина їх залягання при розточуванні.

Встановлено, що при розточуванні різцями на основі нітриду бору загартованої сталі максимальні стискуючі напруження вищі і локалізуються ближче до поверхні деталі через силові та температурні особливості обробки. Вирішальний вплив на залишкові напруження при розточуванні робить силовий чинник, що формує їх стискаючий характер. Висока температура, що виникає при різанні, діє короткочасно і, проникаючи на незначну глибину, не викликає істотних фазових перетворень у поверхневому прошарку.

Величина і знак залишкових напружень залежать від швидкості різання, подачі, геометрії різця та інших умов, вплив яких виявляється в зміні ролі силового і температурного факторів. Превалююча дія першого призводить до виникнення в поверхневих прошарках стискуючих залишкових напружень, другого – розтягуючих.

Завдяки високій якості процес лезової обробки нітридодоборним інструментом є конкурентоспроможним абразивній обробці. На формування мікронерівностей обробленої поверхні найбільше впливають

режими різання і знос інструмента, а також твердість оброблюваного металу.

Аналіз параметрів якості поверхневого прошарку і шорсткості поверхні, обробленої розточуванням, дозволив зробити висновок про можливість, а у ряді випадків – доцільність заміни операції внутрішнього шліфування розточуванням отворів у загартованих сталях різцями з ельбору-Р і гексаніту-Р.

Дослідження і практика застосування інструмента з кубічного нітриду бору показують, що технологічні процеси, що базуються на його використанні, дозволяють:

- знизити шорсткість обробленої поверхні до $R_a = 0,08$ мкм і досягти точності обробки 5–6 квалітету;
- виключити структурні зміни в поверхневому прошарку оброблюваних матеріалів;
- змінити традиційний технологічний процес виготовлення деталей із загартованих сталей (побудувати його за схемою: прецизійні заготівельні операції – термообробка – фінішна обробка);
- підвищити продуктивність обробки в 2–5 разів порівняно із шліфуванням;
- замінити тверді сплави, що містять вольфрам, на операціях чистового та напівчистового точіння.

Особливо перспективним варто вважати застосування інструмента з нітриду бору при лезовій обробці чавунів, причому, і сирих, і важкооброблюваних – загартованих. Високі різальні властивості нітриду бору при обробці чавунів потребують високої швидкості різання, в іншому випадку він не тільки недовикористовується, але й може при низьких швидкостях різання поступатися твердосплавному інструменту.

Необхідно відзначити обробку наплавлених поверхонь. Обсяги застосування таких деталей зростають безупинно, а обробка традиційними методами не завжди задовольняє вимогам.

Ефективність тонкого точіння залежить від точності верстата. Так, при точінні ступінчастого валика зі сталі Р6М5 62...64 HRC або зі сталі ХВГ 60...64 HRC перехід від роботи на верстатах з нормальною точністю виконання до верстатів високої точності зменшує висоту мікронерівностей $R_a = 0,60...1,20$ мкм до $R_a = 0,16...0,30$ мкм, тобто в три–чотири рази. Збільшення твердості сталі призводить до зниження величини мікронерівностей. Висока розмірна зносостійкість різців з НТМ і невеликі значення радіальної складової сили різання дозволяють на верстатах високої й особливо високої точності обробляти деталі за 5 і 6 квалітетами точності.

Режими тонкого точіння та фрезерування інструментом з НТМ

| Оброблюваний матеріал | Точіння | | | Фрезерування | | |
|---|-----------|-------------|----------|--------------|----------------|----------|
| | V , м/с | S , мм/об | t , мм | V , м/с | S_z , мм/зуб | t , мм |
| Сталі загартовані, HRC 40–70 (конструкційні, леговані, інструментальні) | 0,7–4,5 | 0,02–0,3 | 0,05–1,2 | 1,3–5 | 0,02–0,15 | 0,1–2,0 |
| Чавуни сірі ковкі, HB 160–270 | 5–15 | 0,04–0,2 | 0,1–2,0 | 10–30 | 0,02–0,1 | 0,1–2,0 |
| Чавуни високоміцні вибілені, HB 300–600 | 1,5–5 | 0,02–0,1 | 0,1–1,5 | 1,5–4,5 | | |
| Тверді сплави ВК, HRA 88–90 | 0,13–0,36 | | 0,1–0,8 | | | |

Як при точінні так і при фрезеруванні інструментами, оснащеними НТМ, зі збільшенням твердості сталі значно знижується величина R_a . При фрезеруванні гексанітом-Р сталевих деталей з $V < 5$ м/с і $t > 1,0$ мм швидкість і глибина різання майже не впливають на шорсткість обробки поверхні. Зі зношуванням ножів фрези величина R_a зростає. На шорсткість поверхні при фрезеруванні сталі найбільше впливає подача на зуб:

$$R_a = 18S_z^{1,22}, \text{ мкм.}$$

Аналогічно впливають параметри процесу обробки на шорсткість поверхні деталей із чавуну.

При фрезеруванні відсутні припіки й структурні зміни поверхневого шару деталей. Одержання низької шорсткості при фрезеруванні чавуну дозволяє рекомендувати фрезерування інструментом, оснащеним гексанітом-Р як фінішну операцію замість шліфування.

Торцеві фрези з ножами з НТМ застосовуються для чистої обробки, у зв'язку із чим висуваються високі вимоги до величини торцевого й радіального биття різальних кромки, яке після заточення не повинно перевищувати 0,02...0,04 мм. Ця вимога забезпечується заточенням фрез в зборі.

На якість обробки значно впливає перпендикулярність зачисної кромки до осі фрези. Відхилення кута її розташування навіть на 1°

призводить до збільшення висоти мікронерівностей на 6 мкм, що при чистовому або тонкому фрезеруванні неприпустимо.

Розділ 3

ОБРОБКА АЛМАЗНИМИ СТРІЧКАМИ ТА ХОНАМИ

Існує велика кількість способів алмазно-абразивної обробки. Умови виконання основних абразивно-алмазних способів обробки впливають на параметри обробленого поверхневого шару (табл. 3.1), а отже, на його експлуатаційні показники.

Таблиця 3.1

Шорсткість поверхні R_a , мкм, що досягається різними способами алмазно-абразивної обробки

| Вид обробки | Шорсткість R_a , мкм |
|---|------------------------|
| шліфування чистове | 1,25–0,32 |
| шліфування тонке | 0,63–0,08 |
| шліфування алмазне зі збільшеним числом проходів | 0,08–0,04 |
| хонінгування алмазне сталей | 0,08–0,04 |
| хонінгування алмазне чавунів | 0,16–0,025 |
| хонінгування брусками з ельбору загартованих сталей | 0,63–0,08 |
| суперфінішування брусками з ельбору загартованих сталей | 0,32–0,04 |
| доведення алмазно-абразивне чистове | 0,16–0,02 |
| доведення алмазно-абразивне тонке | 0,04–0,01 |
| стрічкове алмазне шліфування чистове | 0,63–0,16 |
| стрічкове алмазне шліфування | 0,63–0,16 |
| стрічкове алмазне шліфування тонке | 0,16–0,05 |
| віброоб'ємне шліфування | 2,5–0,63 |
| полірування чистове | 1,25–0,16 |
| полірування тонке | 0,08–0,01 |

Алмазне стрічкове шліфування застосовується при обробці зовнішніх циліндричних і фасонних поверхонь. Для цього використовують спеціальні верстати або нескладні пристрої, які встановлюють замість різцетримача на супорті токарного верстата. Кінематична схема такого пристрою наведена на рис. 3.1.

Від електродвигуна 1 через клинопасову передачу 2 обертання передається приводному шківу 3. Натяг стрічки здійснюється шківом 7. Упорний шків 5 забезпечує притиск стрічки 4 до оброблюваної заготовки 6.

Для алмазного стрічкового шліфування деталей зі сталі 38Х2МЮА застосовуються стрічки типу АСМ і АСО з концентрацією алмазів 100%, зернистістю – 80/63; 63/40; 20/14 і зв'язкою Р1, Р9, Р11.

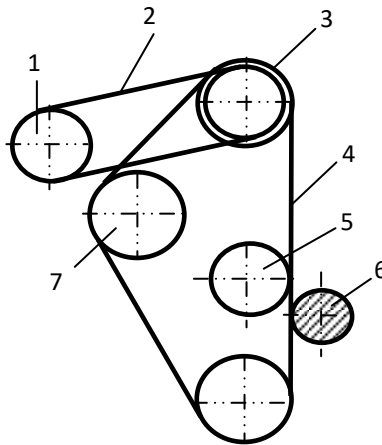


Рис. 3.1. Схема стрічкового шліфування

Сила притиснення стрічки становить 10–30 Н, вихідна шорсткість $R_a = 2,5 \dots 0,63$ мкм. У якості МОТС застосовується суміш 75% гасу із 25% індустріальної оливи марки І-30. На результати шліфування впливають характеристики алмазних стрічок. Так, з підвищенням зернистості стрічки (рис. 3.2) збільшується хвилястість і шорсткість, зменшується точність обробки, але зростає продуктивність. Максимальна продуктивність досягається при використанні стрічки на напівтвердій зв'язці Р9-АСО 80/63–100%. Продуктивність шліфування продовжує підвищуватися й при збільшенні сили притиску й швидкості обертання оброблюваної деталі. Однак при цьому спостерігається перекручування попереднє обробленого профілю поверхні, з'являються завали, знижується точність обробки.

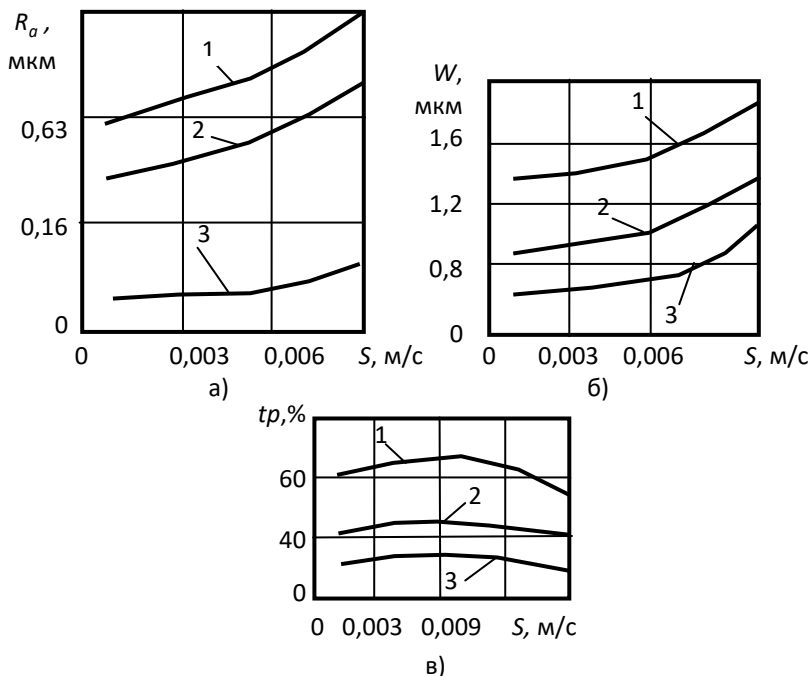


Рис. 3.2. Залежності шорсткості (а), хвилястості (б) і опорної довжини (в) поверхонь від подачі й зернистості алмазної стрічки ($V = 3$ м/с; $S = 0,16$ м/с; $P = 20$ Н; зернистість стрічок: 1 – 80/63,2; 2 – 63/50; 3 – 20/14; оброблювана деталь зі сталі 38Х2МЮА, HV 900...1000)

При шліфуванні алмазними стрічками на обробленій поверхні не виникають мікротріщини, припіки й інші дефекти, властиві шліфуванню абразивними кругами. Наприклад, продуктивність алмазного шліфування шнеків машин для лиття під тиском пластмас значно більша, ніж при оздоблювальному шліфуванні абразивними кругами з наступним доведенням. Алмазне стрічкове шліфування дозволяє одержувати поверхні з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

Алмазне стрічкове шліфування можна використовувати для зниження залишкових напружень й зменшення термічних деформацій. Нова технологія обробки шнеків машин для лиття під тиском пластмас зі сталі марки 38Х2МЮА передбачає попереднє розтягування заготовок шнеків і азотування їх у тліючому розряді замість азотування у газових печах.

Алмазне хонінгування дає можливість не тільки виконувати видалення металу у межах висоти мікронерівностей, але й обробляти основний матеріал, знімаючи підвищені припуски. При цьому чистове шліфування,

що звичайно передує хонінгуванню, у деяких випадках можна замінити алмазним чорновим хонінгуванням. При правильному виборі зернистості брусків і величин припусків алмазним хонінгуванням можна досягти шорсткості R_a від 2,5 до 0,04 мкм, можна також у деяких межах керувати формою мікрорельєфу поверхні й досягати 6 квалітету. Точність і шорсткість обробленої поверхні алмазним хонінгуванням залежить від режимів різання, які вибираються залежно від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, розмірів і форми поверхні, вихідної шорсткості й припуску на обробку, характеристики, числа й розмірів брусків.

Алмазне хонінгування застосовується й для оздоблювальної обробки зубчастих коліс. Конструкція алмазного хона для зубохонінгування нагадує шевер, на бічні поверхні якого нанесений алмазозносний шар марки АСР 100/80-М1–100%. При алмазному хонінгуванні зубчастих коліс 7–8-го ступеня точності величина биття зменшується на 20% від вихідного рівня. Шорсткість поверхонь залежить в основному від зернистості алмазів у хонах. Хони з алмазами зернистістю 63/50 і дрібніше стійко забезпечують шорсткість $R_a = 1,2$ мкм. При впровадженні алмазного зубохонінгування на загартованих зубчастих колесах з $m = 4,25$ мм, числом зубів від 16 до 62 і шириною вінця від 28 до 62 мм досягнуте зниження шуму при роботі зубчастих пар на 2...3 Дб, підвищена їхня контактна міцність у порівнянні з нехонінгованими, що позитивно позначається на довговічності коробок передач. Так, при зніманні металу в межах 0,025–0,03 мм за товщиною зуба контактна міцність хонінгованих зубчастих коліс у порівнянні з нехонінгованими підвищується на 40%.

Розділ 4

ПОЛІПШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН СПОСОБАМИ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

4.1. Класифікація методів поверхневого пластичного деформування

Відповідно до ГОСТ 18296-72 методи поверхневого пластичного деформування (ППД) підрозділяють на статичні й ударні. При статичних методах обробки інструмент, робочі тіла або середовище впливають на оброблювану поверхню з постійною силою P , відбувається плавне переміщення зони впливу вздовж всієї оброблюваної поверхні. До таких методів відносяться різні види вигладжування (рис. 4.1.1, а) і накатування (рис. 4.1.1, б), а також метод однократного обтиснення оброблюваної поверхні (рис. 4.1.1, в) без переміщення вогнищ впливу.

При ударних методах (рис. 4.1.1, г) інструмент, робочі тіла або середовище багаторазово впливають на всю оброблювану поверхню або на її частину, при цьому сила впливу P у кожному циклі змінюється від нуля або від деякого значення P_x до максимуму, а у випадку локального ударного впливу вогнище деформування може (як і в статичних методах) послідовно й рівномірно проходити всю оброблювану поверхню

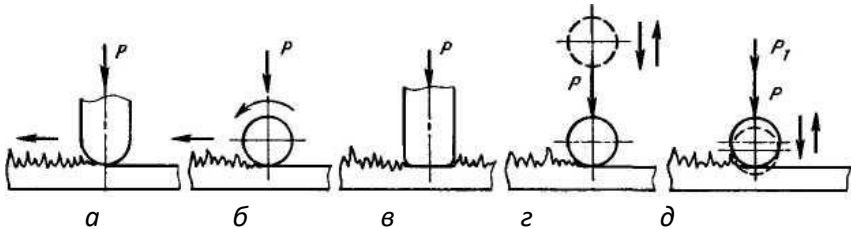


Рис. 4.1.1. Характер контактної взаємодії інструмента з оброблюваною поверхнею при різних методах ППД

Інструментами при ППД можуть бути ролик, куля із примусовою віссю обертання або без неї, вигладжувач, дорн із деформуючими кільцями, бойок тощо. Як робочі тіла при ППД можуть бути використані дріб, кульки зі сталі, скла, пластмаси. Робочим середовищем при ППД можуть бути рідина, газ і суспензії із частками абразиву.

Статичні методи ППД, як правило, забезпечують меншу шорсткість поверхні зі сприятливою формою мікронерівностей; за допомогою

ударних методів можна досягти великого ступеня зміцнення, що характеризується ступенем підвищення мікротвердості, значеннями стискаючих залишкових напружень і товщиною зміцненого шару.

Однак обробка деякими ударними методами поступається за ступенем зміцнення обробці статичними методами. Наприклад, при віброударній обробці ступінь зміцнення буває звичайно менше, ніж при накатуванні.

Обробка поверхневого шару пластичним деформуванням, має в порівнянні з обробкою точінням, шліфуванням, поліруванням, доведенням ряд переваг, у тому числі:

- зберігається цілісність волокон металу й в поверхневому шарі утворюється дрібнозерниста структура;
- відсутнє шаржування оброблюваної поверхні абразивними зернами;
- відсутні термічні дефекти;
- існує можливість забезпечення стабільної якості поверхні та мінімальної шорсткості поверхні;
- можна зменшити шорсткість поверхні в кілька разів за один робочий хід;
- створюється сприятлива форма мікронерівностей;
- можна утворювати регулярні мікрорельєфи із заданою площею заглиблень для затримки мастильного матеріалу;
- в поверхневому шарі створюються сприятливі стискаючі залишкові напруження;
- плавно й стабільно підвищується мікротвердість поверхні.

Зазначені й інші переваги методів ППД забезпечують підвищення зносостійкості, опору втоми, контактної витривалості й інших експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей на 20...50%, а в деяких випадках – в 2–3 рази (за умови вибору в кожному конкретному випадку найбільш раціонального методу й призначення оптимальних режимів обробки).

Разом із забезпеченням високої якості поверхні ППД у багатьох випадках дозволяють механізувати ручну працю й підвищити продуктивність.

Необхідно також враховувати наступні особливості методів ППД:

- переважна більшість методів не підвищує геометричної точності поверхні, звичайно зберігається точність, досягнута на попередній операції;
- у зв'язку зі створенням стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі при обробці тонкостінних і нерівношорстких деталей (товщиною 3–5 мм) може деформуватися поверхня на 5–10 мкм і більше;

- у зв'язку із пластичним плином металу при використанні деяких методів обробки ППД на кромках оброблюваних поверхонь утворюються рівномірні напливи металу товщиною 0,03–0,3 мм.

Поверхневий шар при обробці деталей ППД формується в результаті складних взаємозалежних явищ.

Основні параметри ППД наступні: пружна й пластична деформації у вогнищі деформування, площа контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, сила впливу на інструмент, напруження, що виникають під дією цієї сили, та кратність дії сили.

Як при статичному, так і при ударному впливі на оброблюваній поверхні в початковий момент утворюється відбиток від інструмента, що потім перетворюється в сліди або в серію відбитків. Сферичний індентор із статичною або ударною силою P (рис. 4.1.2, а) втискається в оброблюваний матеріал. По мірі збільшення сили P спочатку відбувається пружна деформація поверхні, а потім пластична деформація (лінія OAB). Внаслідок пластичних деформацій, що виникли, зворотний процес іде по лінії BC .

Залишкова пластична деформація визначається розміром відбитка, який відповідає OC .

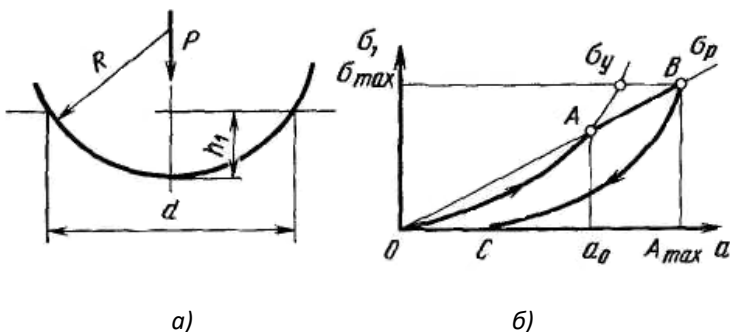


Рис. 4.1.2. Плин металу при втисканні сферичного індентора:
а – відбиток; б – залежність пружної і пластичної деформацій від напружень втискання

Ступінь пластичного деформування:

$$\varepsilon = d/D,$$

де d – діаметр відбитка (лунки); D – діаметр сфери індентора.

Для ППД при обробці конструкційних матеріалів $\epsilon = 0,3...0,7$.

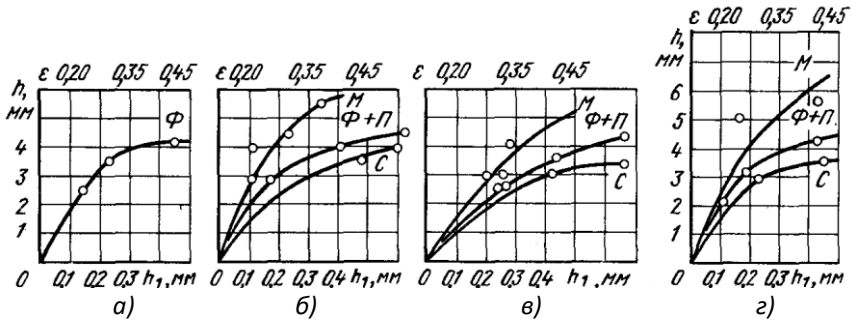


Рис. 4.1.3. Залежність глибини наклепаної зони h від глибини відбитка h_1 для вуглецевих сталей із різними структурами:

а – залізо АРМКО; б – сталь 35; в – сталь 45; з – сталь 50;
 Ф – ферит; М – мартенсит; П – перліт

Глибина наклепу h може бути визначена:

$$h = \sqrt{P/2\sigma_T},$$

де σ_T – межа текучості матеріалу.

Багаторазовий вплив статичного навантаження при втисканні кулі в те саме місце не приводить до помітного збільшення розмірів пластичного відбитка. На відміну від статичного, при ударному втисненні кулі зі збільшенням числа ударів до 15–20 розмір відбитка для різних умов обробки збільшується в 1,25–1,55 рази. Це збільшення буде меншим, якщо сталі більш тверді.

При інтенсивних режимах обробки локальні ділянки поверхневих шарів нагріваються до різної температури: при обкочуванні – до 300–400 °С, при вигладжуванні – до 600–700 °С, при ударних методах – до 800–1000 °С.

Таке нагрівання може викликати термопластичне деформування й інші явища, які знижують ефект зміцнення. Термопластичне деформування призводить до різкого спаду залишкових стискаючих напружень на поверхні, а в деяких випадках – до перетворення їх у напруження розтягу. Можуть утворюватися також вторинні структури, що знижують експлуатаційні властивості поверхні. Стики структур є концентраторами напружень, що призводить до зародження тріщин від втомленості. Необхідно встановлювати такі тиски й швидкості обробки конкретних

матеріалів, які не викликають підвищення температури поверхні більше припустимої.

Обробка ППД супроводжується складними структурними й фазовими перетвореннями, характерними для формування поверхневого шару. У початковий момент відбувається дроблення зерен металу на блоки і утворюється мозаїчна структура. Далі внаслідок посилення розвитку зрушень по площинах ковзання утворюються нові, значно здрібнені зерна. При цьому кристаліти витягаються у напрямку деформування. Різко змінюється співвідношення їхніх розмірів, утворюється впорядкована орієнтована структура волокнистого характеру з анізотропними механічними властивостями, коли пластичність уздовж волокон вище, ніж у поперечному напрямку.

Збільшення твердості при пластичному деформуванні сталей пояснюється частковим перетворенням залишкового аустеніту в мартенсит.

При завищених силових параметрах обробки може відбуватися перенаклеп, у результаті якого в поверхневому шарі з'являються небезпечні мікротріщини та різко збільшується шорсткість поверхні. Наклеп металу можна частково або повністю зняти шляхом відпалу. Перенаклеп – необоротний процес, при якому нагрівання не відновлює вихідну структуру металу і його механічні властивості.

4.2. Области раціонального застосування різних методів ППД

Методами ППД обробляють найбільш тяжконавантажені деталі машин і механізмів, від працездатності яких залежить надійність і довговічність виробів у цілому.

Залежно від розмірів, конфігурації, матеріалу деталі, призначення обробки, серійності виробництва й інших факторів у кожному конкретному випадку обирають найбільш оптимальний метод ППД.

У багатьох випадках доцільно застосовувати накатування (розбкочування, обкочування), алмазне вигладжування, віброударну обробку й обробку дробом, а також вібраційне обкочування (вібровигладжування). Ці методи універсальні, вони доповнюють один одного й у комплексі забезпечують зміцнення поверхонь різноманітних деталей.

Циліндричні, конічні та інші зовнішні й внутрішні поверхні правильної геометричної форми твердістю $HRC < 45 \dots 50$ ефективно обробляти накатуванням роликівим або кульковим інструментом, а поверхні твердістю $HRC >> 50$ – методом алмазного вигладжування. Алмазне

вигладжування у порівнянні з накатуванням має істотно меншу продуктивність, однак має більшу універсальність і дозволяє обробляти нежорсткі деталі, тому що тиск при алмазному вигладжуванні складає 100...200 Н, у той час як при накатуванні – 10...100 кН.

Для здійснення накатування й алмазного вигладжування складних поверхонь у порівнянні з обробкою простих поверхонь необхідно додатково вирішити ряд технологічних і конструкторських завдань, пов'язаних зі створенням деформуючого інструмента спеціального профілю та з необхідністю забезпечення складного руху деформуючого інструмента.

Пружини, ресори, шатуни, лопатки неможливо обробляти накатуванням і алмазним вигладжуванням. Їх доцільно зміцнювати віброударним методом або обробкою дробом. Однак енергетичні витрати на обробку цими методами в 2–3 рази вищі.

Для підвищення довговічності деталей, що піддаються зношуванню, а також схоплюванню металу, на їх поверхні створюють регулярний мікрорельєф шляхом вібраційного накатування (вібраційного вигладжування).

Накатування, вібраційне вигладжування й алмазне вигладжування виконують звичайно на універсальних металорізальних верстатах за допомогою нескладних пристроїв, а об'ємну віброударну обробку й обробку дробом – на спеціальних вібромашинах і установках.

Для обробки дробом, вібраційною ударною обробкою й інших подібних методів характерний одночасний вплив на всю зовнішню або внутрішню поверхню. Якщо яку-небудь поверхню обробляти не можна, її необхідно ізолювати за допомогою спеціальних пристосувань, а також варто передбачити бази для установки й закріплення деталей у контейнері або в камері.

Ефективність зміцнення залежить від матеріалу, структури, виду напруженого стану, форми й т.д. Значну роль відіграє вибір методу й режиму зміцнення. Тому при впровадженні методів ППД у виробництво звичайно попередньо проводять дослідження й випробування. Працездатність деталей підвищують застосуванням комбінованої обробки різними методами ППД, а також обробкою методами ППД у поєднанні з іншими методами зміцнення.

4.3. Процеси обробки деталей машин дорнуванням

Дорнування є ефективним способом зміцнюючої обробки отворів, який широко застосовується у промисловості. Розширенню областей

Його використання сприяє висока надійність одержання заданих параметрів оброблюваних отворів, простота експлуатації й гарні експлуатаційні властивості оброблених цим способом поверхонь. Крім того, освоєння промисловістю технології виготовлення дорнів, що збирають із твердосплавних кілець, різко підвищило їхню стійкість і припустимі межі виконуваної ними пластичної деформації оброблюваних поверхонь.

Дорнування застосовується для обробки великих партій деталей. Найбільше часто ця операція виконується для одержання низької шорсткості поверхні. При вихідній шорсткості в межах $Rz = 40...6,3$ мкм дорнуванням можна знизити шорсткість до $Rz = 3,2...0,8$, а в окремих випадках до $Rz = 0,8...0,2$ мкм. Точність після дорнування зростає до 6...9 квалітету. Дорнуванню піддаються отвори в діапазоні діаметрів від 3 до 120 мм. Слід зазначити про ефективність дорнування отворів малого діаметру, зменшення шорсткості поверхні яких іншими способами представляє велику складність. Дорнуванням обробляються отвори у звичайних і важкооброблюваних сталях і сплавах, чавунах і кольорових сплавах.

При дорнуванні підвищується міцність пресових посадок і довговічність деталей, які мають концентратори напруг у вигляді поперечних отворів. Дорнування дозволяє в ряді випадків виключати з технологічного процесу розгортання, хонінгування й термічні операції.

Основним робочим елементом дорну є зуб. За характером роботи зубів (в умовах ковзання або в умовах кочення) дорни підрозділяють на дорни кочення (рис. 4.3.1. а) і дорни ковзання (рис. 4.3.1. б). Дорни можуть бути однозубі й багатозубі, цільні й набрані з окремих зубів. Іноді використовують цільні блоки по кілька зубів.

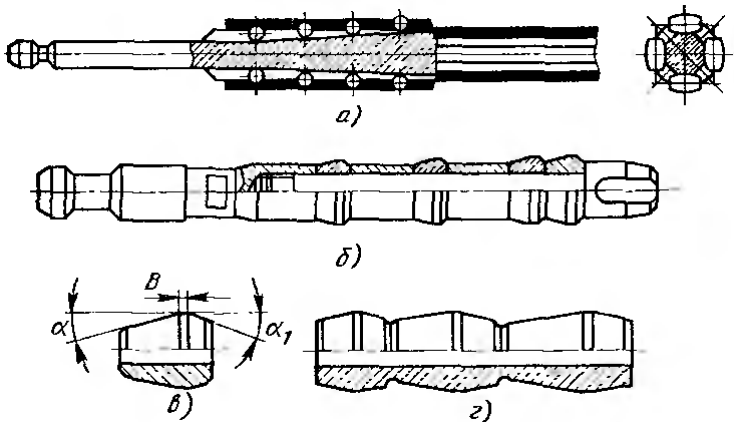


Рис. 4.3.1. Види дорнів: а – дорн кочення; б – дорн ковзання;

v – форма зуба; *z* – блок зубів

Найбільш доцільною формою зуба є зуб із забірною й зворотною поверхнями у вигляді конусів і циліндричною поверхнею між ними (стрічкою). Для різних умов обробки (оброблюваний матеріал, діаметр отвору, натяг тощо) оптимальний кут конуса забірної поверхні складає $\alpha=3...5^\circ$. При дорнуванні середньо- і високовуглецевих сталей $\alpha=4...5^\circ$, високовуглецевих і легованих сталей – $\alpha=3^\circ 30'...4^\circ$, чавунів – $\alpha=2...4^\circ$. Кут конуса зворотної поверхні зуба при дорнуванні сталей і чавунів варто приймати $4...5^\circ$. Ширина стрічки *B* обчислюється по емпіричній формулі $B=0,3d$, де *d* – діаметр дорна. Звичайно $B=1...3$ мм. При обробці в'язких матеріалів варто застосовувати більші кути α й меншу ширину стрічки.

Багатозубий дорн складається з передньої напрямної частини і робочої частини (рис. 4.3.2). Робоча частина багатозубого дорна складається з деформуючих, калібруючих та кінцевих зубів. Деформуючі зуби виконують основну роботу деформування металу, вигладжуючи оброблювану поверхню й забезпечуючи необхідний розмір отвору. Для кращого центрування дорна в отворі ширину першого зуба виконують рівною діаметру попередньо підготовленого отвору під дорнування.

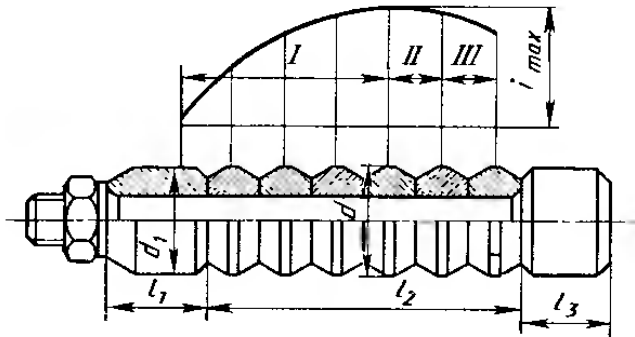


Рис.4.3.2. Розподіл натягу між зубами дорна

Зуби, що калібрують, є запасом на повторне шліфування дорна. Їх діаметр дорівнює діаметру деформуючого зуба з максимальним натягом. Кінцеві зуби забезпечують плавність виходу дорна з отвору. Їх розміри поступово зменшуються до розміру остаточно обробленого отвору.

Для обробки шліцьових та інших фасонних поверхонь використовують однозубі й багатозубі дорни відповідного профілю (рис. 4.3.3), які мають наступні геометричні параметри: α , α_6 – кути конуса забірної поверхні відповідно по зовнішній твірній й по бічній поверхні зуба; α_1 , α_{16} – кути конуса зворотної поверхні відповідно по зовнішній твірній й по бічній поверхні зуба; *b* – ширина циліндричної стрічки; b_1 – ширина зуба (шліца).

Профільні отвори найчастіше обробляють багатозубими дорнами, у яких у напрямку від першого до останнього зуба змінюється діаметр зуба по циліндричній стрічці шириною b і ширина шліца b_1 .

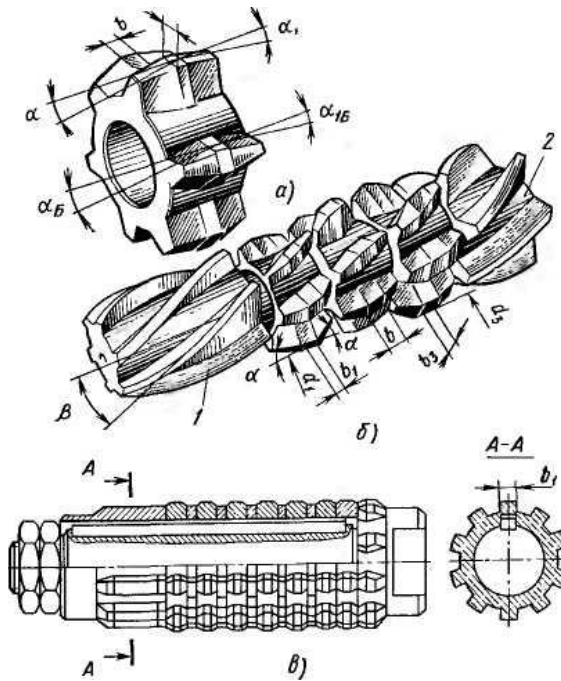


Рис. 4.3.3. Дорни для обробки шліцьових валів: а – однозубий дорн; б – багатозубий гвинтовий дорн; в – багатозубий прямий дорн

Інші геометричні параметри всіх зубів багатозубого дорна звичайно залишаються постійними. Для кращого центрування й більшої точності обробки отворів деталей однозубі й багатозубі дорни найчастіше мають передню і задню напрямні.

Процес дорнування може бути виконаний за різними схемами (рис. 4.3.4).

Дорнування підрозділяють на поверхневе й об'ємне. При поверхневому дорнуванні пластично деформується поверхневий шар, при об'ємному – пластичне деформування відбувається по всьому поперечному перерізу оброблюваної деталі. Пружне деформування в обох випадках може поширюватися на весь об'єм.

За характером розташування оброблюваної деталі розрізняють вільне дорнування, тобто дорнування без обмеження деформації по зовнішній

поверхні деталі (рис. 4.3.4, а, б) і дорнування в обіймах (г-ж). Залежно від закріплення деталі дорнування може бути за схемою стиску (рис. 4.3.4, б) або за схемою розтягу (рис. 4.3.4, в).

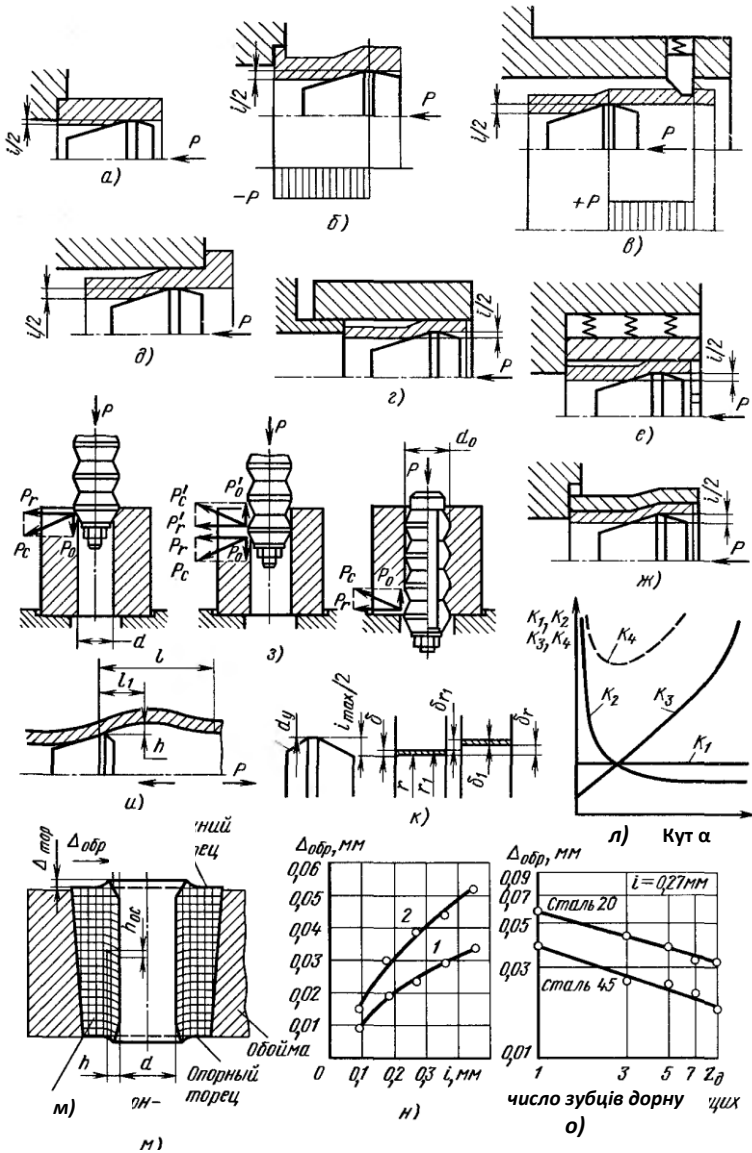


Рис. 4.3.4. Схема процесу (а-к, м) і характер діючих сил і деформацій при дорнуванні (н-о)

За призначенням поверхнєве дорнування може бути згладжуючим та зміцнюючим. Різновидом дорнування є гідродорнування, при якому відбувається постійне й стійке витікання рідких мастильних речовин між робочими поверхнями зубів дорна й оброблюваного отвору.

Поверхнєве дорнування характеризується наступними параметрами: натягом, силою дорнування, швидкістю дорнування V і геометричними характеристиками дорна.

При дорнуванні прикладається сила, за схемою стиску або розтягу.

Найбільш ефективним і довговічним є дорн, що складається з п'яти твердосплавних кілець, зібраних на сталевому загартованому стрижні й закріплених гайкою. За допомогою різєвої частини стрижня дорн з'єднується із хвостовиком трубчастою тягою, через яку в радіальні пази подається МОТС. Дорн має деформуюче кільце симетричної форми, його забірна частина виконана у вигляді зрізаного конуса, що дозволяє легко деформувати метал і плавно входити в отвір. Циліндрична частина кільця, довжина якої дорівнює 1,5...2 мм, призначена для підвищення зносостійкості дорна й поліпшення якості обробки. Затилована частина деформуючого кільця у вигляді конуса необхідна для зменшення сили тертя й, тим самим, для зменшення тягового зусилля й шорсткості. Шорсткість при натягах 0,25...0,4 мм становить $Ra = 0,63...0,16$ мкм. При менших натягах вона трохи вище.

Зі збільшенням величини відносного натягу зростає зусилля дорнування P (рис. 4.3.5.а), збільшується глибина деформованого шару й зменшується шорсткість обробленої поверхні (рис. 4.3. б).

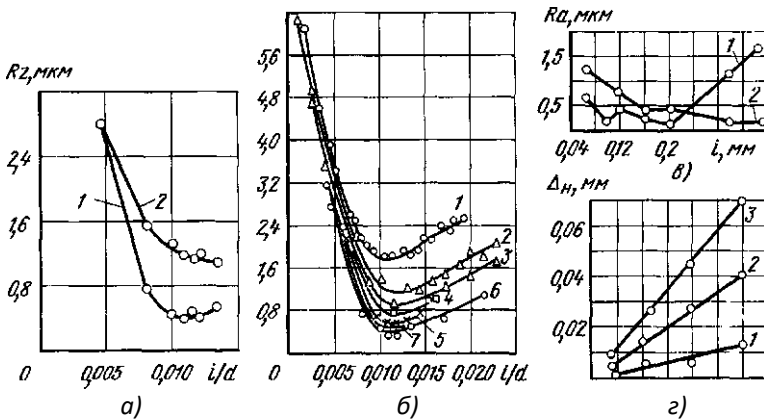


Рис. 4.3.5. Вплив відносного натягу на характеристики оброблюваних поверхонь:

а, б, в – на шорсткість оброблених поверхонь (1 – багатозубий дорн; 2 – однозубий дорн), г – на збільшення зовнішнього діаметра деталі

При збільшенні натягу більше 0,35 мм шорсткість зростає, що пояснюється деформуванням металу не тільки в радіальному напрямку, але й у напрямку руху інструмента, що під впливом сил тертя утворює на обробленій поверхні дефекти та нерівності.

Твердосплавними деформуючими кільцями дорна можна обробляти отвори діаметром від 10 до 45 мм. При дорнуванні високопластичних сталей можна досягти пластичної деформації до 10% від діаметра оброблюваного отвору. Сталеві кільця піддаються двом видам зношування, що спостерігається по перехідній зоні між конусом і стрічкою (механічному стиранню).

Найкращі результати дорнування досягаються при вихідній шорсткості $Ra = 2,5...1,25$ мкм і нижче. Дорнування отворів у товстостінних циліндрах великої довжини зі сталей 38Х2МЮА та 45 забезпечує необхідну точність і шорсткість, однак на початку отвору вона трохи вище й становить $Ra = 0,08...0,012$, а наприкінці – $Ra = 0,012...0,022$ мкм.

Однією з основних умов, від яких залежить успішне проведення дорнування, є встановлення правильних співвідношень натягу й параметрів вихідного стану отвору. Деформація металу при дорнуванні завжди більше залишкової деформації на величину пружної деформації.

$$D_H = 0,69D_K + 9,31D_0,$$

де D_0 – діаметр отвору заготовки; D_K – діаметр останнього кільця дорна; D_H – діаметр першого напрямного кільця.

Для переміщення дорна в отворі деталі необхідне значне тягове зусилля, що залежить не тільки від величини деформації металу, але й від форми деформуючих кілець, швидкості їхнього руху, а також застосовуваного при дорнуванні змащення.

Від величини натягу багато в чому залежить не тільки тягове зусилля, параметри обробленої поверхні, але й деформація всього тіла циліндра.

Так, при дорнуванні циліндрів із товщиною стінки 32,5 мм і при натягах 0,78, 0,46, 0,29 і 0,22 збільшення зовнішнього діаметра відповідно становить 0,19, 0,05, 0,02 і 0,01 мм. Натяг на кожне деформуюче кільце повинен бути нерівномірний. На першому він має найбільшу величину, на наступних меншу, а наприкінці робочої частини дорна встановлюється два кінцевих кільця з діаметрами, рівними діаметру останнього кільця робочої частини. Перенесення 0,5...0,8 загального натягу на перше деформуюче кільце дозволяє робити процес дорнування за один прохід.

Дорнуванням можуть виконуватися не тільки оздоблювально-зміцнюючі, але й попередні операції обробки отворів у трубних заготовках перед подальшою їхньою обробкою. При цьому пластичні

деформації охоплюють всю товщину стінки оброблюваної деталі, діаметр отвору заготовок змінюється до потрібних розмірів, поліпшуються фізико-механічні властивості й оброблюваність металу.

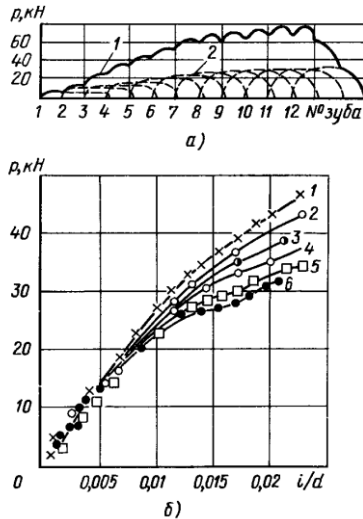


Рис. 4.3.6. Вплив відносного натягу на сили дорнування

Якщо дорнування коротких отворів широко освітлено в літературі, то застосування дорнування для глибоких точних отворів вивчено недостатньо. Звичайно застосовуваний у машинобудуванні технологічний процес виготовлення отворів 7...9 квалітету із шорсткістю поверхні $Ra = 0,63...0,08$ мкм і довжиною більше 25 діаметрів містить досить трудомісткі операції: глибоке свердління, зенкерування, чорнове й чистове розточування, попереднє й остаточне розбкочування або хонінгування. З метою зменшення трудомісткості й поліпшення якості виробництва подібних деталей запропонований технологічний процес обробки отворів, що складається зі свердління однокромковим свердлом із внутрішнім відводом стружки й наступного поверхневого дорнування.

Для поліпшення обробки й відводу стружки ріжуча частина однокромкового свердла має не менш двох стружкоділильних уступів. Величина зсуву вершини свердла від осі не менш $0,1D$, а діаметр нульового стрижня не перевищує $0,3...0,5$ мм. Стружколомаючий уступ на передній грані розташовується під кутом $2...3^\circ$ до різальної кромки, що визначається величиною подачі.

Великий вплив на величину відводу свердла, точність діаметра отвору й шорсткість обробленої поверхні мають опорні напрямні свердла. Вони виготовляються зі сплаву ВК6М. Довжина кожної напрямної становить не

менш $0,5D$, а зворотна конусність – не більше $0,02$ мм на 100 мм довжини. Діаметр цих напрямних звичайно береться рівним діаметру фаски, що калібрує, причому опорна напрямна розташовується в площині, перпендикулярній до передньої грані свердла.

Дотримання зазначених вимог при свердлінні отворів діаметром $D_0 = 30...45$ мм і довжиною більше $25D$ у товстостінних циліндрах зі сталі 38ХШЮА дає можливість одержати точність у межах 9...11 квалітету при шорсткості поверхні $Ra = 2,5...1,25$ мкм. При цьому відхилення осі від прямолінійності не виходить за межі половини допусків на розмір отвору.

Наступне дорнування забезпечує досягнення високої якості й продуктивності, при цьому досяжна точність перебуває в межах 7–8 квалітету, шорсткість $Ra = 0,63...0,08$ мкм, а поверхневий шар зміцнюється у 1,5...2 рази. Дорнування здійснюється на протяжному верстаті, модель якого вибирається залежно від зусилля протягування, обумовленого діаметром оброблюваного отвору й натягом. Натяги дорнування, залежно від діаметра отвору, приймаються від $0,15$ до $0,4$ мм, при вихідній шорсткості $Rz = 40...6,3$ мкм.

Найпоширеніші й зручні багатозубі дорни, що складаються з набору твердосплавних кілець або цільних багатозубих блоків, зібраних на оправці. При дорнуванні отворів невеликих діаметрів, коли конструктивно не можна виготовити дорн збірним, його виконують цільним. Цільні дорни виготовляють зі сталей ХВГ, ШХ15, 9ХС або зі швидкорізальних сталей. Для дорнування отворів у кольорових сплавах як інструмент можуть застосовуватися загартовані кульки.

Сталеві дорни гартуються до максимальної твердості $62...64\text{HRC}$. Для підвищення зносостійкості на їхні робочі поверхні напилують тверді покриття, азотують або хромують. Хромовані дорни в більшості випадків піддають електролітичному сульфідуюванню, що підвищує зносостійкість і за рахунок цього помітно знижується собівартість дорнування.

Кільця збірних дорнів виготовляються із твердих сплавів ВК6, ВК8, ВК15 тощо. Розмірна стійкість їх значно вища в порівнянні зі стійкістю дорнів, виготовлених зі швидкорізальної сталі. Для забезпечення мінімального сумарного зусилля й досягнення заданої прямолінійності отвору заготовки число зубців повинне бути непарним, крок між ними – нерівномірним.

Робоча довжина дорна L – відстань між крайніми деформуючими зубами по їхніх стрічках – визначається залежно від довжини L_3 заготовки: $L = L_3 - (1,5 - 2)\delta$, де δ – номінальна товщина стінки заготовки. На початку робочої частини встановлюється блок із трьох зубів: напрямного, деформуючого й підтримуючого. Довжина напрямного зуба в $1,2...1,5$ рази більше довжини будь-якого іншого; кут заборного конуса $6...8^\circ$, діаметр по стрічці $D = D_0 + (D_{0\text{max}} - D_{0\text{min}})$, де $D_{0\text{max}}$, $D_{0\text{min}}$ – найбільший і

найменший діаметри отворів заготовок. Наприкінці робочої частини встановлюється один-два кінцевих кільця, діаметр D_k яких дорівнює діаметру останнього деформуючого кільця, а кут забірного конуса $1...1^{\circ}30'$. Довжина проміжних кілець між кінцевими зубами не повинна перевищувати величини $(0,1...0,2)D_k$.

Для в'язких металів рекомендується швидкість дорнування отворів циліндрів великої довжини приймати $0,03...0,08$ м/с, для менш пластичних – $0,08...0,12$ м/с. Найкращими змащеннями для сталевих деталей є рослинні масла (сиріпне, лляне, конопельне, касторове).

Однак ці масла можна замінити сульфозфрезолом або рідиною МР-1. Для чавунних деталей рекомендується застосовувати очищений гас, що забезпечує шорсткість обробленої поверхні до $Ra = 0,08$ мкм.

Простовхування або протягання дорна в отворі з більшим або меншим натягом завжди супроводжується тертям ковзання при високих контактних тисках. У таких умовах в напрямку руху дорна утворюється згладжений текстурований поверхневий шар. У ньому сильно виражені пластичні деформації, які викликають підвищення мікротвердості й зміцнення поверхневих шарів, залишкові напруги стиску й, у ряді випадків, здрібнювання зерен. Фізико-механічні властивості й стан утвореного дорнуванням поверхневого шару істотно відрізняються від властивостей основного матеріалу оброблюваної деталі й залежать від оброблюваного матеріалу, загальної величини натягу, числа деформуючих елементів, товщини стінки деформованої деталі й застосовуваного МОТС.

Найбільше на точність у ході дорнування впливає загальний натяг і число деформуючих елементів – кілець. Гранично можливу точність дорнування 6–7 квалітету можна одержати дорнами, що працюють тільки з малими натягами. Натяги повинні зменшуватися від початкового до кінцевого деформуючого елемента. Попередня обробка отвору повинна бути не грубіше 8 квалітету для того, щоб зменшити коливання натягів, а сумарна величина натягу для різних діаметрів повинна дорівнювати $0,025...0,15$ мм. При дорнуванні точних отворів варто забезпечувати загальну деформацію в межах $0,5...1\%$ при числі деформуючих елементів $5...7$ для вуглецевих, низьколегованих сталей, кольорових сплавів і $3...5\%$ для нержавіючих і жароміцних сталей. За таких умов дорнування шорсткість може перебувати в межах $Ra = 1,25...0,05$ мкм.

Коли на попередніх дорнуванні операціях виходить значний по глибині дефектний шар і невисока точність розміру, тоді дорн повинен працювати з такими натягами, щоб кожне деформуюче кільце виконувало однакову деформацію порядку $1...2\%$. Таке дорнування у твердих деталях може забезпечити 8...11 квалітети при шорсткості $Ra = 1,25...1,0$ мкм.

Накопичено досвід успішного впровадження дорнування для виправлення похибок деталей з нерівномірною твердістю. Нерівномірність твердості деталі за довжиною отвору характеризується коефіцієнтом K_T , який розраховується відношенням максимальної до мінімальної товщини стінок деталі. Цей коефіцієнт коливається в межах від 1,5 до 7. Для трьохелементних дорнів підбором величини натягу для різних сполучень K_T і вихідних похибок можна значно знизити похибку форми оброблюваного отвору. При цьому забезпечується висока точність діаметрів отворів та істотне зниження вихідної шорсткості. При дорнуванні будь-яких отворів для досягнення необхідної точності й шорсткості необхідна експериментальна перевірка достатності обраної величини натягу, а отже, і діаметрів деформуючих і калібруючих кілець. Дорнування звичайно є останньою операцією при обробці точних отворів. Це накладає необхідність строгого контролю якості попередньої операції обробки.

Відомо, що при тому самому загальному натягу в структурі поверхневих шарів мають місце тим більші зміни, чим менше натяг на один деформуючий елемент, тобто чим більшому числу циклів деформації була піддана поверхня оброблюваного отвору. При рівності кількості циклів деформації зміни текстури й мікроструктури поверхневих шарів зростають зі збільшенням натягу на кожний деформуючий елемент, а отже, і зі збільшенням загального натягу.

Структурні зміни та ріст мікротвердості в деформованому шарі спостерігаються відразу ж після проходу перших деформуючих елементів. Ступінь максимального зміцнення коливається для різних сталей від 30 до 160%. Для вуглецевих сталей 10, 20, 45, У8А приріст твердості дорівнює відповідно 150, 160, 170, 175%, а глибина впливу дорнування – 1,0, 0,65, 0,4, 0,3 мм. Для високолегованих сталей 38ХМЮА й Х18Н10Т твердість дорівнює відповідно HV 90 і 30, а глибина зміцнення – 0,3 і 1,0 мм. Підвищення мікротвердості, величини й глибини зміцнення в поверхневому шарі покращують експлуатаційні показники поверхонь деталей машин, підданих дорнуванню.

Дорнування отворів у твердих деталях з малими натягами й у деталях середньої твердості створює залишкові напруги стиску. Для деталей з вуглецевих сталей 10, 20, 45 і В8А при натягах 0,05 і 0,1 мм на один деформуючий елемент чисельні значення стискаючих напруг складають відповідно 18, 25, 32, 38 і 14, 20, 25, 35 МПа. Максимум стискаючих напруг має місце на глибині декількох десятих часток міліметра від поверхні отвору. Зі збільшенням числа деформуючих елементів дорна, при однаковій на кожний елемент величині натягу, величина залишкових напруг підвищується. Чим більше міцність оброблюваного матеріалу й кількість циклів деформації, тим на більшій глибині виникають залишкові

напруги (від 1 до 3,5 мм). При натягах на кожний деформуючий елемент, що перевищують 0,4 мм, у поверхневому шарі з'являються несприятливі для експлуатації залишкові напруги розтягу. Їхня величина зростає з ростом натягу.

Підвищувати якість поверхні в ході дорнування можна до певної межі. Ця межа характеризується виникненням процесів перезміцнення. Вони наступають після деякого критичного числа циклів деформації.

Підвищення точності й зміцнення поверхонь після дорнування дає відчутні результати на виробництві. У результаті виконання операцій дорнування підвищується ресурс роботи деталей; знижується витрата запасних частин; до 30% підвищується продуктивність праці за рахунок виключення з технологічного процесу операцій чистового розгортання, хонінгування й термічної обробки.

Важливою для практики властивістю дорнування є можливість підвищення в 1,3...2,5 рази міцності пресових посадок, що досягається обробкою охоплюваної деталі-вала точінням із шорсткістю $Ra = 2,5...2,0$ мкм, а отвору деталі, що охоплює, розточенням з наступним дорнуванням і забезпеченням при зборці їхнього оптимального натягу. При малих натягах дорнування (до 0,002D) зміцнення від дорнування порівняно невелике й міцність з'єднання підвищується незначно. Надмірне збільшення натягу може привести до послаблення з'єднання, тому що профіль поверхні при дорнуванні з більшими натягами наближається до ідеально рівної поверхні, що приводить до зменшення коефіцієнта тертя спокою в з'єднаннях з натягом.

4.4. Алмазне вигладжування

Алмазне вигладжування є одним з найбільш простих способів поверхневого пластичного деформування. Його відрізняє висока продуктивність і стійкість інструмента – вигладжувача. Вигладжуванням досягається шорсткість $Ra = 0,32...0,1$ мкм і навіть дзеркальний блиск поверхні. Зростає мікротвердість і в поверхневому шарі створюються стискаючі залишкові напруги. Вигладжуванням можна знизити в 2...3 рази шорсткість поверхні, домогтися більшої структурної однорідності поверхневих шарів оброблюваного матеріалу. Дуже важливо, що вигладжування змінює сам рельєф вихідної поверхні: згладжуються гострі вершини й западини, що виникли при точінні або шліфуванні, значно збільшується фактична опорна поверхня. Як правило, вигладжування зберігає точність форми й розмірів деталей, отриманих на попередніх операціях.

Алмазним вигладжуванням легко обробляються загартовані, цементовані, азотовані й покриті твердими гальванічними покриттями деталі. Процес протікає при зусиллях від 50 до 350 Н, що дозволяє обробляти тонкостінні й маложорсткі деталі.

Процес алмазного вигладжування кінематично аналогічний точінню, тільки замість різця застосовується алмазний вигладжувач, що, пластично деформуючи тонкий поверхневий шар, вирівнює його й зміцнює. Матеріалом робочої частини є природний або синтетичний алмаз, який забезпечує коефіцієнт тертя по незмазаній поверхні порядку 0,05. Поверхня алмазного вигладжувача полірується до шорсткості $Ra = 0,2$ мкм. Вигладжувачі можуть також виготовлятися із синтетичних рубіна й лейкосафіра, мінералокераміки, твердих сплавів і загартованих інструментальних сталей. Стійкість алмаза при вигладжуванні значно перевершує стійкість перерахованих матеріалів і може досягати 10...30 годин машинного часу.

Конструкції вигладжувачів нормалізовані. Вони виготовляються у вигляді гладкого циліндра або циліндра з головкою, у торці яких запаюються або закріплюються механічно алмазні елементи (рис. 4.4.1).

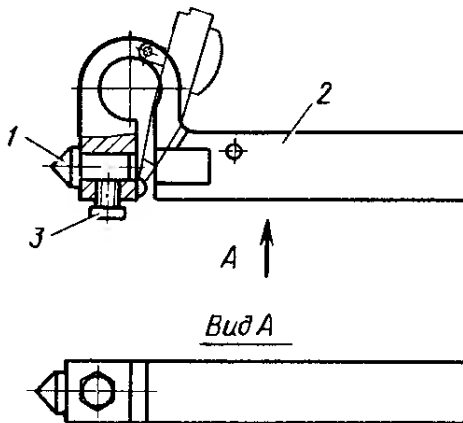


Рис. 4.4.1. Державка з механічно закріпленням вигладжуючим елементом

Відповідно до розмірів алмазів їх підрозділяють на дві марки. Більші, розміром до 6 мм, одержали назву баллас і умовно позначаються АСБ. Вони мають межу міцності на стиск 200...400 МПа, на вигин 500...1000 МПа. Їхня термостійкість на повітрі перебуває в межах 700...800 °С. Більш дрібні синтетичні алмази (карбонадо) мають форму циліндра діаметром 2...4,5 мм із висотою 2...5 мм і умовно позначаються АСПК. АСПК має

майже у два рази більшу міцність на стиск і трохи вище термостійкість, ніж АСБ.

Якщо для вигладжувачів використовуються природні алмази, то їхні кристали повинні мати масу не менше 0,4 карати. Ці кристали можуть бути орієнтовані двома способами:

1) робоча частина алмаза формується в площині сітки ромбододекаедра так, щоб напрямок найбільшої міцності збігався з вектором швидкості;

2) робоча частина формується в площині сітки куба, а вісь найбільшої міцності повинна збігатися з напрямком сили, що діє на вигладжувач.

Перший спосіб орієнтації застосовується в умовах переважного стирання, другий – в умовах підвищених навантажень, що викликають в алмазі напруги стиску.

Геометрична форма робочої поверхні алмазного вигладжувача визначається формою робочої поверхні та умовами роботи. Алмазному вигладжувачу може надаватися форма сфери, бічної поверхні циліндра або конуса, ділянки поверхні тора тощо (рис. 4.4.2).

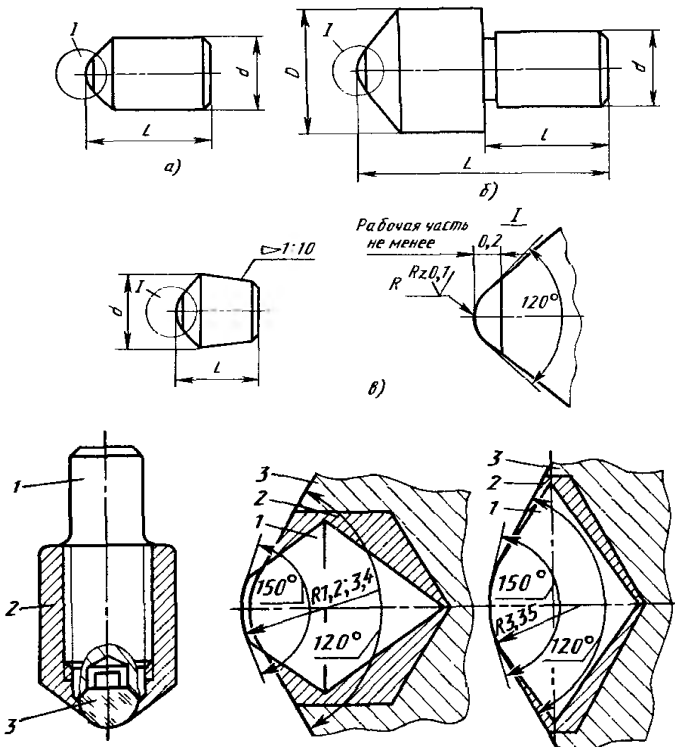


Рис. 4.4.2. Інструменти для вигладжування

З перерахованих форм робочої поверхні найбільше поширення одержала сферична.

При вигладжуванні зовнішніх поверхонь тіл обертання на токарних верстатах, вигладжувач закріплюється в державці різцетримача верстата або в спеціальному пристосуванні, що використовується замість звичайного різцетримача. Загальними вимогами до всіх пристроїв для закріплення вигладжувачів є можливість регулювання зусилля вигладжування й наявність рухомого елемента. У цьому пристрої (рис. 4.4.3) вигладжувач 9 кріпиться гвинтом 8 у підпружиненому плунжері 7. Пружина 5 утримується в корпусі 4 гайкою 6. Другим кінцем пружина через упор 3 зв'язана з мікрометричним гвинтом 2. Поворотом цього гвинта маховичком регулюється зусилля вигладжування.

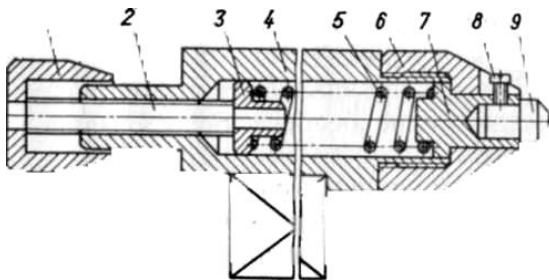


Рис. 4.4.3. Вигладжувач для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь

Відомі конструкції пристосувань, у яких зусилля вигладжування створюється електромагнітами, постійними магнітами, гідравлічними циліндрами тощо. При вигладжуванні в умовах схильності технологічної системи до вібрацій, рекомендується вводити в конструкції пристосувань механічні або гідравлічні елементи демпфування.

Для підвищення продуктивності вигладжування, поліпшення якості, рівномірного розподілу зусилля вигладжування застосовуються пристрої із двома, трьома й навіть чотирма вигладжувачами. В умовах крупносерійного і масового виробництва застосовуються верстати-автомати, що здійснюють безцентрове алмазне вигладжування.

Ефективність зміцнення алмазним вигладжуванням багато в чому залежить від правильного вибору основних його параметрів. Радіус сфери вигладжувача вибирається в залежності від твердості поверхні обробки. При вигладжуванні сталевих загартованих деталей цей радіус не повинен перевищувати 1,5 мм. Для деталей, твердість яких менше й лежить у межах 35...50HRC, радіус R вигладжувача повинен становити 1,5...2,5 мм.

Для інших сталей і кольорових сплавів радіус може бути збільшений до 2,5...3 мм.

Вигладжування здійснюється за рахунок пластичної деформації оброблюваної поверхні вигладжувачем під дією певного зусилля. Це зусилля повинне бути оптимальним, тому що при недостатньому зусиллі не будуть згладжені гребінці від попередньої операції, а при надмірно великому зусиллі знижується стійкість інструмента й погіршується якість вигладжування. Зусилля вигладжування можна визначати за формулою

$$P=K \cdot HV[D \cdot R / (D+R)]^2,$$

де K – коефіцієнт, який дорівнює 0,013 для загартованих сталей, і 0,008 – для матеріалів середньої й невисокої твердості; HV – поверхнева твердість оброблюваної поверхні; D – діаметр оброблюваної поверхні; R – радіус робочої поверхні вигладжувача.

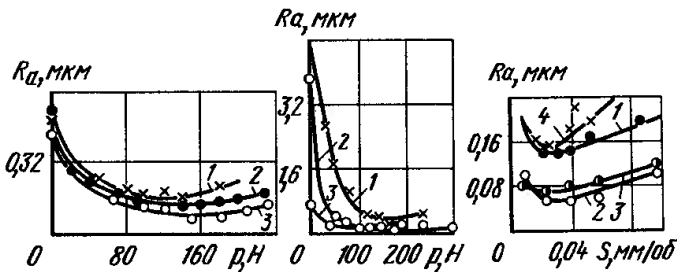


Рис. 4.4.4. Залежність шорсткості обробки від зусилля вигладжування та подачі на оберт для різних матеріалів

Елементом режиму вигладжування є також швидкість обертання оброблюваної деталі або (рідше) вигладжувача. Якщо немає загрози вібрації, її можна призначати до 3...5 м/с. Обмеженнями тут є вібростійкість технологічної системи і температура вигладжування. При високій температурі різко знижується стійкість вигладжувача й тому варто працювати із застосуванням МОТС. Температура впливає й на ступінь зміцнення, із цього погляду оптимальна температура складає 80...120 °С. Режими вигладжування дані в табл. 4.4.1. Для підвищення продуктивності при обробці великогабаритних штоків, шпинделів запірних арматур та інших подібних деталей рекомендується застосовувати вигладжувачі з робочою поверхнею у вигляді бічної поверхні циліндра радіусом Ra . Вісь цього циліндра повинна бути нахилена під кутом до площини, перпендикулярної до осі деталі, тобто осі вигладжувача й заготовки схрещені.

У спеціальних пристроях навколо поверхні, що вигладжується, варто закріплювати рівномірно по 2 або 3 вигладжувача. Так, застосування двох

вигладжувачів забезпечує ріст продуктивності в 2,5...2,7 рази й зниження собівартості обробки в 2,5...2,6 рази в порівнянні з обробкою тієї ж поверхні одним циліндричним вигладжувачем. Режими вигладжування одночасно двома циліндричними вигладжувачами дані в табл. 4.4.2. Ці режими допускають поворот осі циліндра R щодо осі заготовки під кутом 45° і забезпечують шорсткість $Ra = 0,08...0,16$ мкм.

Таблиця 4.4.1

Рекомендовані режими алмазного вигладжування

| Оброблюваний матеріал | Твердість HV | Шорсткість Rz , мкм | | Режими вигладжування | | |
|-----------------------|----------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------|-----------|
| | | вихідна | після вигладжування | R , мм | s , мм/об | p , Н |
| Сталь 45 | 180 | 3,5 | 0,5 | 3,4 | 0,08 | 100 |
| 12Х18Н9Т | 180 | 15,2 | 0,5 | 3,4 | 0,08 | 150...200 |
| Сталь 20 | 301 | 9 | 2,75 | 3,25 | 0,057 | 250 |
| 2Х13 | 471 | 1,7 | 0,3 | 1,4 | 0,057 | 150 |
| ЗОХГСА | 485 | 0,4 | 0,08 | 2,0 | 0,05 | 220 |
| В12 | 498 | 2,45 | 0,8 | 1,4 | 0,057 | 250 |
| ЭИ643 | 513 | 0,26 | 0,11 | 2,0 | 0,05 | 200 |
| Сталь 45 | 580 | 2,4 | 0,65 | 1,2 | 0,03 | 140 |
| ХВГ | 598 | 1,65 | 0,55 | 1,00 | 0,035 | 240 |
| Р6М3 | 695 | 1,55 | 0,3 | 1,0 | 0,035 | 240 |
| 20Х3МВФА | 850 | 1,6...0,8 | 0,5...0,4 | 1,5 | 0,04 | 200 |

Таблиця 4.4.2

Режими вигладжування подвійними циліндричними вигладжувачами

| Матеріал | P , Н | s , мм/об | R , мм | V , м/с |
|------------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 14Х17Н2 | 170...200 | 0,4...0,45 | 2,8...3,0 | 1,3...1,7 |
| 08Х18Н10Т | 200...220 | 0,35...0,64 | 2,5...2,8 | 1,2...1,5 |
| 25Х2М1Ф | 180...200 | 0,4...0,45 | 2,7...2,9 | 1...1,5 |
| 38ХМЮА | 190...210 | 0,4...0,45 | 2,7...3,0 | 1,3...1,7 |
| ЗОХГСА | 200...230 | 0,4...0,45 | 2,8...3,0 | 1...1,5 |
| ЗОХГСА | 250...300 | 0,45...0,5 | 2,5...2,7 | 1,3...1,7 |
| Хромові покриття | 250...300 | 0,45...0,5 | 2,5...2,7 | 1,3...1,7 |

При оптимальному режимі вигладжування результат досягається за один прохід. Якщо зусилля вигладжування занижене, то 2–3 наступні повторні ходи можуть поліпшити якість поверхні. Щоб уникнути зниження продуктивності від застосування повторних ходів, а також з метою більш тонкого керування ступенем зміцнення, рекомендується одночасне застосування двох алмазних вигладжувачів. Найбільше зміцнення й найменша шорсткість поверхні досягається тоді, коли перший вигладжувач має $R_1 = 1...1,5$ мм і притискається із зусиллям $P_2 = 200...300$ Н, а другий – $R_2 = 1...4$ мм і $P_2 = 100...200$ Н. При цьому $s = 0,05...0,075$ мм/об і $v = 0,9...1,5$ м/с, МОТС – індустріальне масло I-20А. Перший вигладжувач забезпечує формування найбільшого зміцнення поверхневого шару, тобто він працює на «твердих» режимах, а другий працює в режимі згладжування вже зміцненої поверхні.

Звичайно вигладжувач заглиблюється в поверхневий шар оброблюваної деталі не більш, ніж на 5 мкм. Для найпоширеніших у машинобудуванні деталей, точність яких відповідає 7...9 квалітету, таке заглиблення становить лише незначну частину від поля допуску й тому не позначається на зміні квалітету точності.

Алмазне вигладжування істотно не впливає на зміни розмірів обробки, і не дозволяє суттєво знизити похибки геометричної форми оброблюваних деталей. Так, при алмазному вигладжуванні бігових доріжок роликових підшипників овальність зменшується на 0,4...1 мкм, а при вигладжуванні роликів – на 0,15...0,25 мкм. Майже на стільки ж знижується огранка роликів. Залежно від висоти вихідної шорсткості й зусиль вигладжування знижується висота хвилястості поверхні від 2...5 мкм до 1...3 мкм. Якщо на зміну точності алмазне вигладжування практично не позначається, то його вплив на зменшення шорсткості поверхні досить істотне. На величину й форму шорсткості вигладженої поверхні впливають радіус робочої поверхні вигладжувача, зусилля вигладжування, подача, кількість проходів, вихідна шорсткість і властивості оброблюваного матеріалу (рис. 4.4.5).

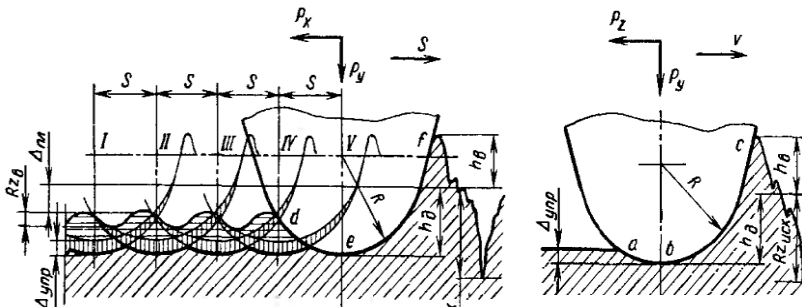


Рис. 4.4.5. Процес вигладжування поверхні

З перерахованих факторів найбільше впливає на ступінь шорсткості вигладженої поверхні зусилля вигладжування. При невеликих зусиллях вигладжування на поверхні можуть частково залишатися сліди шорсткості, при надмірно великих – залишаються помітні сліди пластичних деформацій, виникає перезміцнення, що супроводжується появою мікротріщин та погіршенням показників шорсткості.

Другим за значенням фактором, що впливає на шорсткість, є подача. З її збільшенням від 0,02 до 0,1 мм/об шорсткість вигладженої поверхні зростає. Найменша шорсткість досягається, при подачах від 0,02 до 0,06 мм/об. Подальше зниження подачі може привести до росту шорсткості. Шорсткість знижується зі збільшенням радіуса вигладжувача при відповідному збільшенні зусилля вигладжування.

На результати вигладжування також впливає вихідна шорсткість поверхні заготовки, що для пластичних матеріалів заготовки становить $Rz = 20...10$ мкм, а для загартованих сталей – $Rz = 6,3...3,2$ мкм. Варто враховувати, що чим нижче вихідна шорсткість, тим легше досягти меншої шорсткості поверхні в ході вигладжування. Швидкості вигладжування й марка МОТС на шорсткість впливають незначно.

При алмазному вигладжуванні зниження висотних параметрів шорсткості супроводжується збільшенням відносної опорної довжини профілю t_p , відносної опорної частини площі t і радіуса округлення мікронерівностей.

Дислокації утрудняють переміщення окремих частин кристалів по площинах ковзань і є причиною зміцнення матеріалу. При вигладжуванні збільшується питомий обсяг деформованого металу, розширенню якого перешкоджають нижчі шари металу, і виникають стискаючі залишкові напруги (табл. 4.4.3).

Ступінь зміцнення залежить від тиску, що виникає в зоні вигладжування, і пластичних характеристик матеріалу деталі. У м'яких матеріалів приріст твердості більше інтенсивний і він припиняється при тисках, менших у порівнянні з тисками для загартованих сталей. Так, найбільше підвищення поверхневої твердості, а отже, і зміцнення сталі 12Х2Н4А досягається при зусиллі вигладжування, рівному 200 Н. При незмінному зусиллі вигладжування спостерігається збільшення приросту твердості зі зменшенням радіуса вигладжувача. Дво-, трикратні проходи дещо підвищують твердість, а зміна подачі в межах 0,05...0,09 мм/об й швидкості від 0,7 до 3,7 м/с практично на неї не впливають.

Тому що зусилля вигладжування невеликі, то глибина максимально зміцненого шару є незначною – він віддалений від поверхні на 0,01...0,05 мм, причому товщина його не перевищує 0,3...0,5 мм. Твердість загартованих сталей при вигладжуванні збільшується в 1,1...1,35, а

високопластичних і інших м'яких сплавів – в 1,5...1,6. Твердість відпалених алюмінієвих зразків після вигладжування зростає з 41HRC до 61, а в мідних з 59HV до 148.

Таблиця 4.4.3

Характеристика мікрогеометрії поверхні деталі

| Метод обробки | Ra , мкм | Радіус скруглення мікронерівностей, мкм | t_p , % | t_f , % |
|-----------------------|------------|---|-----------|-----------|
| Тонке шліфування | 0,16 | 70 | 4 | 1,5 |
| | 0,04 | 100 | 7 | 2,0 |
| Полірування | 0,16 | 200 | 18 | 5 |
| | 0,08 | 300 | 22 | 8 |
| | 0,04 | 400 | 30 | 15 |
| Суперфінішування | 0,08 | 350 | 25 | 8 |
| | 0,04 | 450 | 35 | 14 |
| Алмазне вигладжування | 0,16 | 1000 | 30 | 15 |
| | 0,08 | 1500 | 45 | 20 |
| | 0,04 | 2500 | 70 | 40 |
| | 0,02 | 3500 | 87 | 50 |

Алмазне вигладжування може бути застосоване для підвищення твердості хромованих деталей.

Зі збільшенням зусилля вигладжування від 100 до 200 Н твердість підвищується приблизно на 1000 МН/м². При цьому встановлене зниження приросту твердості в міру збільшення товщини хромованого шару. Для товщини покриттів 25, 60, 80 і 200 мкм збільшення твердості при вигладжуванні із зусиллям 200 Н становить відповідно 1000, 600 і 500 МН/м². Вигладжування хромованого шару забезпечує перекриття мікропористості й пов'язаних з нею наскрізних мікроканалів, чим усувається негерметичність з'єднання, що дуже важливо для ряду деталей гідравлічних систем високого тиску.

Зі збільшенням сили вигладжування від 75 до 230 Н збільшується як величина, так і глибина залягання стискаючих залишкових напруг. При вигладжуванні досягається плавний розподіл залишкових напруг, зміна яких незначна для подач 0,02...0,07 мм/об. При інших значеннях подач, а також високих швидкостях обробки спостерігається зниження стискаючих напруг і можливий перехід залишкових стискаючих напруг у напруги розтягу. Використання повторних проходів (не більше 2–3-х) викликає багаторазовість виникнення пластичної деформації і підвищує рівень залишкових напруг. Величина залишкових напруг стиску при

вигладжуванні різних металів залежить від схильності металу до пластичного деформування. Граничні значення залишкових напруг при алмазному вигладжуванні загартованих сталей складають 900...1200 МПа, сирих сталей – 200...300 МПа.

Пластична деформація в ході вигладжування викликає зміну фазового складу поверхневого шару. Відбувається інтенсивний розпад залишкового аустеніту. Алмазне вигладжування дозволяє усунути дефекти поверхневого шару, що виникли на попередніх операціях, а також збільшити твердість у місцях припиків, що виникли при шліфуванні. Ступінь відновлення твердості й максимальна величина залишкових напруг стиску залежать від глибини припиків і зусилля вигладжування. У припіках глибиною 90 мкм, які можуть виникати при чорновому шліфуванні, наприклад, сталі 20ХЗМВФ при вигладжуванні із зусиллями 200...300 Н твердість поверхні помітно підвищується, відбувається не тільки її відновлення, але й зміцнення підповерхневого шару.

Зміцнюючий ефект алмазного вигладжування проявляється в підвищенні границі витривалості. Найбільше він відчутний при обробці високопластичних матеріалів. Так, границя витривалості деталей зі сталі Х18Н10Т, вигладжених після точіння, підвищується на 25%, після шліфування – на 58%. При однаковій шорсткості порядку $Ra = 0,16$ мкм поліровані деталі зі сплаву Д1 мають границю витривалості 133 МПа, а вигладжені алмазним інструментом – 195 МПа. Алмазне вигладжування підвищує стійку міцність деталей з концентраторами напруг. Установлено, що концентратор сам по собі різко знижує границю витривалості. Однак міцність вигладжених зразків з напівкруглим надрізом наближається до міцності гладких полірованих зразків і значно нижче міцності гладких вигладжених зразків. Довговічність вигладжених зразків з надрізом вище в порівнянні з такими ж полірованими зразками більш ніж в 10 разів. Вигладжування зразків з концентраторами напруг у вигляді уступу й поперечного отвору підвищує межу їхньої витривалості відповідно на 29 і 15%.

Деталі багатьох сучасних машин піддаються впливу високих температур. Випробування зразків зі сталі 12Х18Н9Т показали, що при температурах 250 і 450 °С границя витривалості вигладжених зразків у порівнянні з полірованими зросла відповідно в 1,5...1,8 і 1,3...1,7 рази. При випробуванні з температурою 600°С зразки як поліровані, так і вигладжені мали практично однакові границі витривалості. При більш високих температурах вигладжування неефективне.

Границя витривалості деталей, які оброблюються операціями точіння й шліфування, у сполученні із хромуванням і вигладжуванням зростає в 2,1...3,4 рази. Високий ефект від поєднання хромування з вигладжуванням підтверджується й при випробуванні деталей складної

конструкції, таких як тонкостінні гідравлічні циліндри. Випробування цих гідроциліндрів на витривалість при змінному внутрішньому тиску показали, що довговічність зміцнених алмазним вигладжуванням циліндрів збільшується в межах від 2 до 10 разів залежно від рівнів тиску. Вигладжування змінює й картину руйнування циліндра. Якщо джерело руйнування в незміцнених циліндрах перебуває на внутрішній хромованій поверхні, то в зміцнених – на зовнішній загартованій і обточеній поверхні.

Багато деталей машин піддаються циклічним навантаженням в умовах корозійного впливу. Вигладжування помітно знижує інтенсивність утворення тріщин, при цьому границя витривалості сталі 35ХН1М у корозійному середовищу зростає приблизно в 3 рази, а довговічність в 30...40 разів.

Корозійні випробування протягом 5 місяців ненавантажених зразків з нержавіючої аустенітної сталі 12Х18Н9Т у морській воді виявили сприятливий вплив алмазного вигладжування, тому що втрати вигладжених зразків виявилися майже в 3 рази нижчими, ніж шліфованих. Сталь У10 у морській воді менше реагувала на спосіб обробки, однак в умовах атмосферної корозії показала після алмазного вигладжування підвищену стійкість.

Вигладжування робочих радіусних доріжок шарикопідшипників вигладжувачами з $R = 0.5...1$ мм при $P = 25...90$ Н, $s = 0,015$ мм/об при $v = 0,2...0,5$ м/с дозволило знизити шорсткість із $Ra = 0,32...0,08$ мкм до $Ra = 0,04...0,01$ мкм і зменшити хвилястість в 1,6...2 рази. Установлено також, що при контактних напругах $\sigma_{max} = 5500$ МПа довговічність вигладжених кілець підшипників склала 24,3 млн. циклів, а для зразків, виготовлених за звичайною технологією, – 6,6 млн. циклів, тобто вигладжування здатне істотно збільшити довговічність роботи підшипників кочення.

Впровадження вигладжування шийок турбокомпресора забезпечило зниження шорсткості до $Ra = 0,16...0,25$ мкм і ріст зносостійкості цих шийок на 40...60%. Витрати алмазів при цьому невеликі і становлять 0,1 карата на 1000 вигладжених роторів. Зниження зношування до 60...93% спостерігається у поршневих пальців і колінчатих валів з вигладженою шийкою.

При вигладжуванні робочої поверхні штоків і шпинделів запірних арматур її ерозійна стійкість в 2...2,5 раза вище, ніж при абразивній обробці, в 2 рази нижче коефіцієнт тертя в ущільнювальній парі, а зносостійкість деталей вище в 2,3...3,5 раза. При вигладжуванні поверхні деталей силових гідроциліндрів помітно знижується зношування гумових ущільнювальних кілець, що збільшує термін служби в 1,4...2 рази, а безвідмовність гідроциліндрів амортизаторів і гідроаккумуляторів у цілому підвищується більш ніж в 2 рази. Вигладжування виключає шаржування поверхні абразивними зернами, що характерно для фінішних

шліфувальних операцій. Крім того, при вигладжуванні на поверхні утвориться сприятливий мікрорельєф типу «шнек».

Алмазне вигладжування застосовується для підвищення зносостійкості складних різальних інструментів, що працюють із невеликими швидкостями різання, наприклад, протяжок, фасонних різців і розверток.

4.5. Процеси обкочування та розкочування

Обкочуванням і розкочуванням обробляються циліндричні зовнішні й внутрішні, наскрізні або глухі, плоскі поверхні, колінчасті і шліцьові вали, бічні поверхні черв'яків, зубчастих коліс різьбові й інші фасонні поверхні.

Обкочуються деталі машин, які виготовлені із сирих і загартованих сталей, чавунів і кольорових сплавів. Операція виконується за допомогою роликів, кульок або інших деформуючих інструментів, закріплених у відповідних пристроях на токарних, свердильних, зубообробних та інших універсальних або спеціальних верстатах.

Обкочування може здійснюватись кульковим інструментом або роликами (рис. 4.5.1).

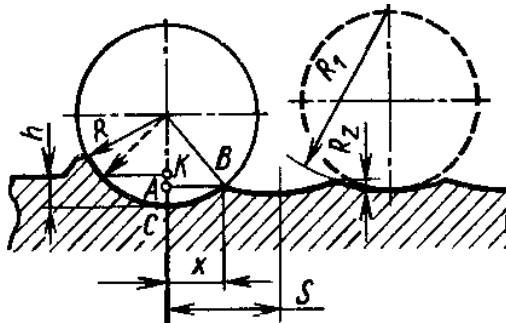


Рис. 4.5.1. Обкочування поверхні кульковим інструментом

Обкочування застосовується у всіх видах виробництва і різних галузях народного господарства від приладобудування до важкого машинобудування. У наш час є значна кількість як універсальних, так і спеціальних конструкцій обкочувального й розкочувального інструмента й пристроїв, при виборі яких віддається перевага більш продуктивним інструментам і пристроям з робочим елементом у вигляді ролика.

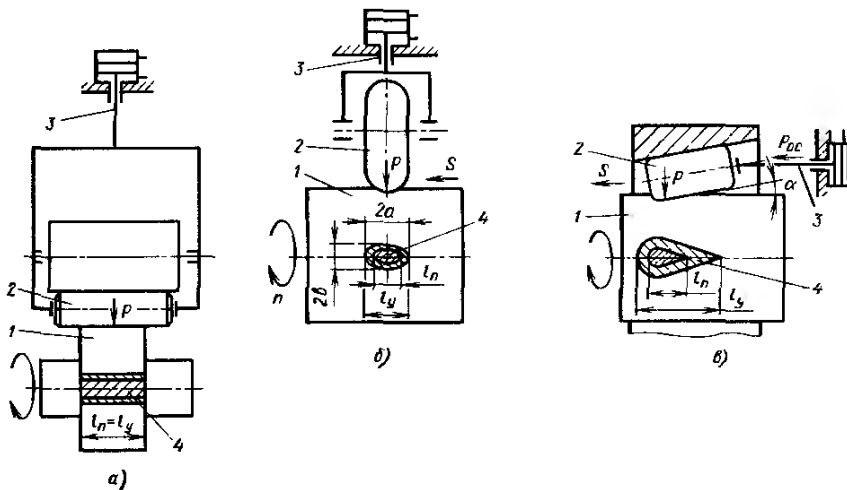


Рис. 4.5.2. Обкочування циліндричних поверхонь:
 а) циліндричним роликом; б) тороїдальним роликом;
 в) конічним роликом

Ролики контактують із оброблюваним виробом на більшій площі, ніж кульки, і тому обкочування ведеться з більшою подачею. Пристрої з кульками дозволяють створювати більш інтенсивну пластичну деформацію при менших зусиллях обкочування. У зв'язку із цим кулькові розкатники й обкатники можна рекомендувати для умов обробки при малій твердості оброблюваної деталі або при обробці твердих матеріалів. Пристрої з обкатними кульками рекомендуються також для обробки малогабаритних поверхонь і отворів малого діаметра.

Все різноманіття розкочувального та обкочувального інструмента, й пристроїв можна підрозділити на три основні групи: для накатування й обкочування прямолінійних і фасонних плоских поверхонь, для обкочування зовнішніх циліндричних і фасонних поверхонь тіл обертання й для розкочування циліндричних і фасонних отворів.

Прикладом найбільш технологічної конструкції пристрою для обкочування зовнішніх циліндричних поверхонь може служити обкочувальний роликовий пристрій, показаний на рис. 4.5.3.

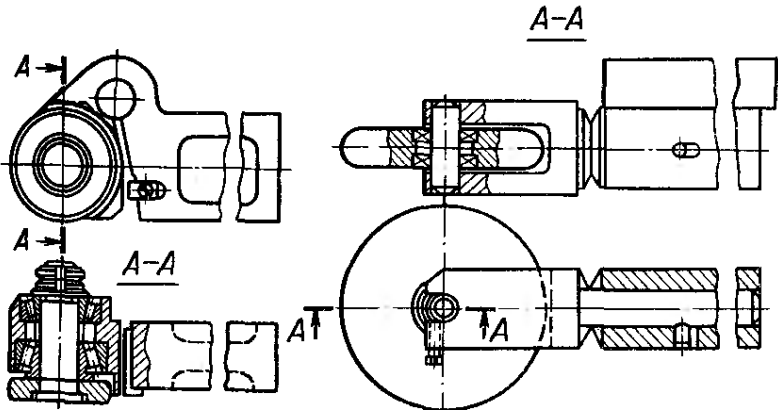


Рис. 4.5.3. Інструмент для обкочування зовнішніх циліндричних поверхонь

Кільцевий обкочувальний ролик установлений на осі на голчастих роликах, які забезпечують гарне центрування й довговічність роботи. Від переміщення в осьовому напрямку ролик утримують два упорних шарикопідшипники. Ролик кріпиться в пружній державці. Це поліпшує процес обкочування, знижує шкідливі впливи на нього биття заготовки, неточностей верстата й мінливості жорсткості технологічної системи по довжині обробки. Зусилля обкочування встановлюються на підставі показань індикатора. Упор служить для обмеження надмірного прогину державки й запобігання її поломки. Робочий профіль ролика може бути тороїдальним, циліндричним і конічним. Тороїдальний ролик у перетині окреслений дугою, радіус якої дорівнює 5...100 мм залежно від умови обкочування. Тороїдальний профіль має невелику площу контакту з поверхнею й це дозволяє створювати в оброблюваній деталі більш пластичні деформації при відносно невеликих зусиллях вигладжування й високій продуктивності обробки. Робочу поверхню ролика можна виконати також у вигляді бічної поверхні циліндра, конуса або інших більш складних за формою поверхонь.

Довжина твірної ролика циліндричної форми вибирається від 2...5 для обробки невеликих деталей, до 12...15 мм і навіть до 24 мм – для великих деталей і при високій жорсткості технологічної системи, але в кожному разі ця довжина не повинна перевищувати величину подачі. Циліндричний ролик з двох сторін має забірні конусні перехідні частини. Кут забірного конуса звичайно приймається 5°. Конус необхідно плавно з'єднати із циліндричною робочою частиною. При обкочуванні нешироких поверхонь і кільцевих канавок циліндричні ролики можуть працювати тільки з радіальною подачею. Їх осі повинні розташовуватися під кутом

порядку $0,5^\circ$ відносно заготовки. При такому повороті виникає контакт ролика із заготовкою каплевидної форми, що полегшує процес пластичної деформації й виключає утворення хвилястості за роликками. Циліндричні ролики звичайно вимагають більших зусиль обкочування і їх рекомендується застосовувати при обробці великих жорстких заготовок.

Ролики з конічною поверхнею по своїй ефективності займають проміжне положення між тороїдальними й циліндричними. При невеликих кутах конуса, що лежать у межах від $1,5$ до $2,5^\circ$, досягається найбільша продуктивність, але зусилля вигладжування потрібні менші, ніж при такій же продуктивності у циліндричних роликів. Збільшення кута конуса понад 5° зменшує ефект згладжування, вимагає зниження подачі, але при цьому досягається збільшення ступеня й глибини зміцнення поверхонь.

Для забезпечення високої якості обкочування необхідна ретельна обробка робочої поверхні ролика, а також забірних поверхонь конічних і циліндричних роликів. Шорсткість цих поверхонь повинна бути не вище $Ra = 0,32 \dots 0,08$ мкм. Твердість роликів повинна бути не нижче $62 \dots 65\text{HRC}$. Вони виготовляються зі сталей ШХ15, Х12, ХВГ, 9Х і наплавляються твердими сплавами або можуть виготовлятися цільними твердосплавними.

Одним з важливих параметрів будь-якої форми ролика є його діаметр. Звичайно цей діаметр, а також загальну ширину ролика вибирають із технологічних і конструктивних міркувань. Можна приймати діаметр ролика виходячи з відношення діаметра деталі до діаметра ролика $1,5 \dots 2$. При обробці деталей діаметром до 75 мм це відношення можна збільшити до 4 . Щоб уникнути появи мікросліду на обкоченій поверхні це відношення не повинне бути цілим числом.

Зусилля обкочування практично може досягати величин $50 \dots 100$ кН. Його можна досягти за допомогою гідрофікованих пристроїв. Гідравлічні або пневмогідравлічні пристрої зручні ще й тим, що ними можна обкочувати конічні поверхні.

Для обкочування маложорстких деталей застосовуються обкочувальні пристрої із двома-чотирма рівномірно розміщеними навколо деталі роликками. Такі пристрої встановлюють на місце різцетримача верстата або на спеціальних напрямних.

Для розкочування наскрізних отворів типу гідроциліндрів широко застосовуються розкочувальні головки.

Розкочувальними головками можуть оброблятися як короткі отвори з радіальною подачею роликів, так і глибокі отвори довжиною до 500 мм.

При розкочуванні співвісно розташованих по довжині двох отворів застосовуються дворядні розкочувальні головки. Якщо попередня обробка виконана не дуже якісно, то доцільне застосування

розточувальних головок з розміщенням роликів на пружному елементі. Наявність пружного елемента дозволяє одержати більш рівномірне зміцнення отвору. В одиничних і дрібносерійних виробництвах використовують більш прості однороликові пристрої, які встановлюються в розточувальну державку й ними виконують розточування відразу після розточування отвору. Відомий досвід закріплення осей роликів на спеціальній підставці, прикріпленій до кулачків трьохкулачкового патрона. Цей патрон закріплюється на борштанзі розточувального верстата і, таким чином, розточування може здійснюватися з великим діапазоном регулювання.

Останнім часом одержують поширення комбіновані розточувальні інструменти для обробки звичайних і глибоких отворів, що включають у собі різальний і розточувальний інструмент. Ефективність обточування й розточування залежить від режиму й характеру деформації, стану й властивостей матеріалу оброблюваної деталі, форми й розмірів деформуючої поверхні, ступеня нагрівання. З перерахованих факторів найбільше впливають зусилля й кількість циклів деформування.

На виробництві зусилля обточування й розточування в ряді випадків підбирають виробничим шляхом, для чого робиться кілька проходів зі східчастим збільшенням навантаження на ролик. Спочатку виконується обробка деталі з невеликим навантаженням, потім збільшується навантаження до величини, при якій відбувається перезміцнення – поверхня лушиться, руйнується. Зменшивши на 10...15% це навантаження, одержують необхідну величину зусилля обточування для даних умов (рис. 4.5.4).

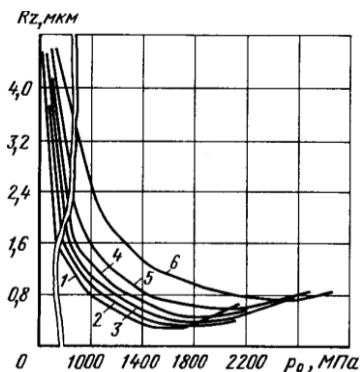


Рис.4.5.4. Залежність шорсткості обробки R_z від тиску p_0 кулькового інструменту:

1 – сталь 20; 2 – ШХ15; 3 – сталь 45; 4 – 20ХН3А; 5 – У8; 6 – 18ХГТ

Другим за ступенем важливості параметром обкочування й розкочування, що визначає кількість циклів деформування, є подача (рис. 4.5.5). Чисельні значення величин подач для тороїдальних роликів залежать від профільного радіуса ролика, необхідної й вихідної шорсткості поверхні й кількості роликів у розкочувальному або обкочувальному пристроях.

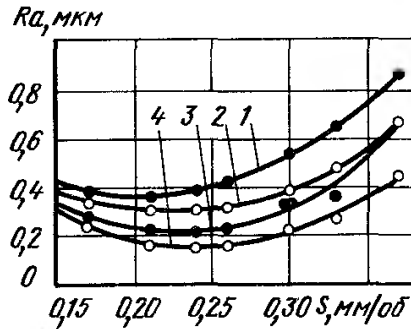


Рис. 4.5.5. Залежність шорсткості обробки R_a від подачі на оберт S (діаметр ролика $D_p = 40$ мм, діаметр деталі $D = 130$ мм, сила обкочування $P = 1000$ Н, радіус ролика $r = 20$ мм, 1 – сталь 45; 2 – сталь 35; 3 – сталь 15; 4 – сталь 45Г2)

Для одержання шорсткості поверхні $R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм при обробці циліндричними роликами подачі приймаються рівними $0,3 \cdot B$, де B – ширина циліндричної ділянки ролика.

Зі збільшенням швидкості обкочування скорочується час впливу деформуючих напруг. Це прискорює утворення більш зміцненої структури поверхневих шарів матеріалу, але разом з тим зменшує глибину зміцнення, а у зв'язку з ростом температури в зонах контакту понад $180 \dots 200$ °С інтенсифікуються процеси зменшення міцності. Швидкість обкочування приймається від 0,2 до 2,5 м/с. Вона лімітується умовами безвібраційної обробки, необхідної продуктивності, а для комбінованого інструмента – швидкістю обробки різальним інструментом.

Рекомендується виконувати обробку за один прохід, однак при підвищених вимогах до шорсткості обкоченої поверхні, а також зниженої жорсткості технологічної системи обробку виконують в 2–3 проходи.

Важливим параметром при розкочуванні є натяг, тобто величина перевищення діаметра розкочування над діаметром отвору заготовки (рис. 4.5.6).

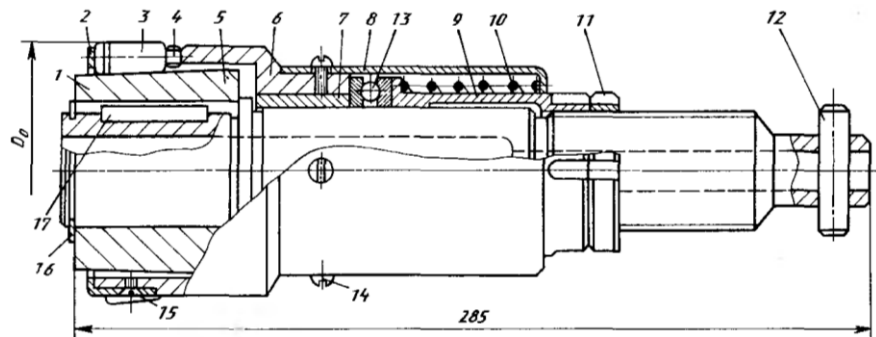


Рис. 4.5.6. Конструкція розкочувального інструмента

Практично величина натягу встановлюється дослідним шляхом і повинна перебувати в діапазоні 0,005...0,1 мм для розкочування отворів діаметром 10...160 мм, причому чисельне значення натягу звичайно вище для більш пластичних матеріалів. Наприклад, якщо для пластичних сталей рекомендується натяг 0,025...0,05 мм при діаметрах розкочування 25...50 мм, то для більш твердих він повинен бути нижче – 0,02...0,03 мм. Величина подачі роликів розкочувальних головок призначається з розрахунку 0,1...0,5 мм/об для одного ролика. Швидкість розкочування вибирається так само, як і при обкочуванні.

Обкочування поверхонь всіх матеріалів, крім чавуну й міді, рекомендується вести із ЗОТС. Для обкочування сталей у якості ЗОТС використовується машинне масло І-20, у яке іноді додається 2–3% олеїнової кислоти, або суміш 50% гасу із сульфофрезолом, а при обкочуванні сплавів алюмінію – гас.

Одержала велике поширення обробка плоских поверхонь накатуванням. Точність площин після накатування визначається в основному точністю попередньої обробки. Обробка площин кульковим і роликівим деформуючим інструментом може виконуватися на будь-яких стругальних і фрезерних верстатах (рис. 4.5.7). Однороликові й однокулькові оправки затискаються в супортах або головках і їх подача здійснюється рухом стола уздовж або поперек оброблюваної площини. Багатокулькові головки закріплюються в шпинделях фрезерних верстатів і приводяться в обертання при русі стола із закріпленою оброблюваною деталлю.

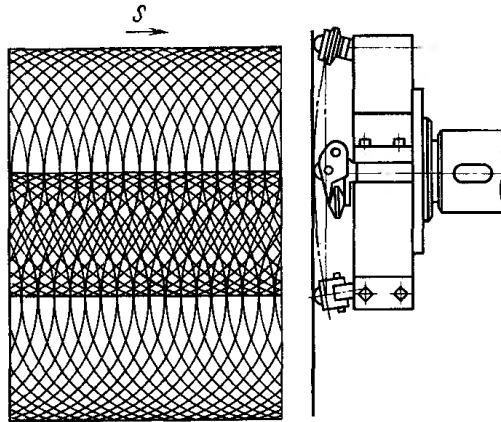


Рис. 4.5.7. Процес накатування плоских поверхонь

Під накатування поверхні обробляються фрезеруванням або струганням до шорсткості $R_z = 20 \dots 6,3$ мкм. Після накатування однороликівими або однокульковими інструментами шорсткість поверхні знижується до $R_a = 0,63 \dots 0,08$ мкм, а багаткульковими головками – до $R_a = 1,25 \dots 0,16$ мкм.

Діаметри кульок залежно від вимог точності й шорсткості, а також матеріалу деталей беруться в діапазоні 12...32 мм, діаметри роликів і радіуси округлення їх робочих частин приймаються відповідно 60...240 і 50...200 мм.

Для одержання мінімально можливої шорсткості поверхні обробка ведеться з подачею 0,05...0,2 мм при діаметрі кульок 17...18 мм. При збільшенні діаметра кульок подача трохи збільшується. Швидкість кочення кульок при цьому повинна бути для чавуну не вище 2,5 м/с, а для сталі – 3,5 м/с. Тиск кульки або ролика на чавунну поверхню не повинен перевищувати межі міцності чавуну (600...650 МПа). При обробці сталевій поверхні цей тиск повинний перевищувати межу міцності оброблюваної сталі на 12...16%.

Якість поверхні й фізико-механічні властивості поверхневих шарів при обкочуванні, розкочуванні залежать від фізико-механічних властивостей матеріалу деталі, вихідної шорсткості поверхні, подачі, зусилля деформування, розмірів і радіуса деформуючого елемента, числа робочих ходів. Звичайно розмір при обкочуванні валів зменшується, а при обробці отворів збільшується. Зміна розміру обробки визначається величиною залишкової пластичної деформації й висотою шорсткості R_z , що утвориться в ході обкочування.

Величина залишкової пластичної деформації позначається на точності обробки. Якщо обкатуються точні вали невеликих розмірів, то пластична деформація охоплює майже весь їхній обсяг і величина h може бути порівнянна з точністю 6 квалітету. При виготовленні деталей діаметром до 250 мм 8–9 квалітетів і деталей всіх діаметрів 6–7 квалітетів необхідно залишати при попередній обробці припуск під обкочування. Припуски, що рекомендують, наведені в табл. 4.5.1, де представлені дані про зміну розмірів сирих сталевих деталей залежно від вихідної шорсткості й способу її одержання.

Таблиця 4.5.1

Зміна розміру оброблюваної деталі при обкочуванні та розкочуванні залежно від шорсткості вихідної поверхні

| Спосіб попередньої обробки | Шорсткість вихідної поверхні, мкм | Зміна розміру після обробки, мкм |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Точіння | 10...5 | 0,03...0,06 |
| | 5...2,5 | 0,02...0,04 |
| | 2,5...1,25 | 0,01...0,02 |
| Точіння широким різцем | 5...2,5 | 0,01...0,02 |
| | 2,5...1,25 | до 0,01 |
| Шліфування | 5...1,25 | 0,01...0,03 |
| | 2,5...1,25 | 0,005...0,015 |

Деталі 8–9 квалітету діаметром більше 250 мм, деталі 10–11 квалітету й інші менш точні деталі можна піддавати обкочуванню після виготовлення їх по остаточних розмірах обробки. Збільшенням зусилля обкочування можна впливати на величину залишкової пластичної деформації й, отже, на точність обробки.

Варто враховувати, що з ростом зусилля обкочування й розкочування похибка наприкінці обробки збільшується за рахунок більш інтенсивного переміщення металу уздовж осі обробки й для зниження цього явища варто зменшити зусилля обкочування або збільшити профільний радіус ролика або радіус кульки.

Обкочування й розкочування дозволяє частково зменшити похибки геометричної форми деталі. Зниження хвилястості й овальності може досягати 10...30%. Воно дозволяє частково або повністю зняти з поверхні ряд дефектів, отриманих у процесі виконання попередніх операцій. Обкочуванням можна досягти шорсткості поверхні $Ra = 1,25...0,04$ мкм, а в окремих випадках – одержати плоскі й сферичні дзеркальні поверхні з високим коефіцієнтом відображення (наприклад, на дзеркалах з

алюмінієвих сплавів). У виробництві обкочування звичайно використовується як один з високопродуктивних способів зниження шорсткості. Всі параметри режиму й умов обкочування роблять істотно впливають на шорсткість поверхні.

Чим вище вихідна шорсткість, тим більше потрібне зусилля обкочування. Підвищення зусилля обкочування ефективно лише до певної величини. Подальше збільшення пластичних деформацій приводить до підвищення шорсткості в результаті руйнування поверхні й перекошування мікропрофілю. Для одержання заданої шорсткості поверхні потрібно забезпечити оптимальне зусилля обкочування.

При розкочуванні величину радіального зусилля визначає натяг. Так, при розкочуванні отворів у деталях зі сталі 20 найменша шорсткість забезпечується натягом 0,2 мм. При натягах 0,3 мм з'являється хвилястість поверхні, а при 0,4 – шелушіння. Для більш твердої сталі 40X гранично припустимий натяг 0,3 мм, дуралюміній же варто розгортати при натягу в межах 0,1...0,15 мм.

Сам профіль шорсткості й мікрорельєф поверхні, утворені обкочуванням, з погляду експлуатаційних властивостей поверхні, значно краще, ніж профіль і мікрорельєф утворені методами різання. В 1,5 рази можна підвищити твердість деталей із силуміну й латуні, титанових сплавів – до 20%. Підвищення твердості різних сталей і сплавів визначається властивостями оброблюваного матеріалу і умовами обкочування. З останніх найбільше впливає зусилля обкочування, а точніше, створюване їм напружений стан у ході пластичної деформації. Для кожного випадку існує оптимальна величина зусилля обкочування, що забезпечує максимальний приріст поверхневої твердості.

Найбільше значення мікротвердості в обкатаних зразків спостерігається на невеликому видаленні від поверхні, порядку 0,3...0,4 мм. Далі, углиб деталі, воно плавно знижується й досягає твердості основної маси металу. Глибина зміцнення визначається зусиллям обкочування. Так, при обкочуванні кулькою діаметром 10 мм деталі зі сталі У8А с зусиллями 0,5; 1; 2 і 3 кН глибини зміцнення відповідно дорівнювала 0,83; 1,15; 1,7 і 2 мм.

Обкочування поверхні роликками або кульками викликає багаторазове деформування кожної ділянки поверхневого шару й супроводжується значним ростом щільності дислокацій, що підвищує питомий обсяг деформованого поверхневого шару. Взаємодія поверхневих шарів з нижче лежачими шарами основного матеріалу приводить до зростання залишкових поверхневих напруг. Знак і величина залишкових напруг визначаються сполученням параметрів деформації, інтенсивно породжуваних цією деформацією теплових процесів і величиною залишкових напруг від попередньої обробки. Режим обкочування й умови

деформування повинні бути такими, щоб у поверхневому шарі створювалися залишкові напруги стиску. Їхній максимум може розташовуватися або на поверхні деталі, або на деякій відстані від її. Зрушення максимуму залишкових напруг углиб найбільш імовірний при обкочуванні деталей великого діаметра, а також при обкочуванні з підвищеними швидкостями. Високий градієнт термічних напруг викликає зниження залишкових напруг у поверхні деталі.

Характер розподілу й величини залишкових напруг у поверхневому шарі багато в чому визначають надійність роботи деталей машин в експлуатації. Установлено, що стискаючі залишкові напруги зростають при обкочуванні більше міцних і твердих сталей. Так, у міру підвищення твердості HRC сталі 45ХН2МФА від 37...39 до 42...43 і 52...54, тобто при переході від структури сорбіту до трооститу й мартенситу, залишкові напруги стиску від обкочування збільшуються відповідно від 1550 до 1800 і 2300 МПа. Для незагартованих сталей залежно від умов обкочування ці напруги менше й можуть досягати значень від 20 до 80 МПа. Загальна глибина їхнього залягання коливається від декількох десятків часток міліметра до 3...5, а при обробці великих деталей – до 20...30 мм.

Крім властивостей і структурного стану матеріалів, що оброблюються, на величину залишкових напруг впливають параметри режиму обробки. Так, при високих тисках, коли має місце перенапруга, повторні робочі ходи знижують величину залишкових напруг. Якщо тиски за своїм значенням близькі до оптимальних, то після 2–3 робочих ходів максимальне значення й градієнт напруг зростають. При більш низьких тисках число ходів, при якому спостерігається ріст напруг, збільшується тим більше, чим нижче тиск. Однак після досягнення певної межі наступні робочі ходи знижують напруги.

Напруги стиску, створювані процесами обкочування, розкочування й накатування в поверхневих шарах можуть довгостроково зберігатися в умовах нормальної експлуатації машин. Релаксація залишкових напруг починається в той момент, коли сумарні, залишкові напруги перевищать межу пружного опору матеріалу. При циклічних напругах, що перевищують більш ніж на 70% границю витривалості обкатаних зразків, наступає релаксація залишкових напруг.

Стійкість залишкових напруг зберігається при нагріванні до певних критичних температур як вуглецевих, так і жароміцних сталей і сплавів. Однак є поріг нагрівання, після якого починається релаксація залишкових напруг, зниження поверхневої твердості. Величина цього порога визначається ступенем жароміцності матеріалу. Так, для звичайних вуглецевих сталей при нагріванні до 150 °С залишкові напруги знижуються на 15...20%, а при більш високих температурах взагалі зникають. Для сплаву ХХ77ТЮ повне зняття зміцнення не спостерігається навіть при

900 °С. Зміцнюючи деталі, призначені для роботи при підвищених температурах, варто враховувати температурний поріг їхнього матеріалу. Якщо робочі температури вище порога релаксації залишкових напруг, то застосовувати зміцнення деталей обкочуванням недоцільно.

Після обкочування загартованих сталей 18Х2НВА, 38ХС, 45ХН2МФА границя витривалості зростає на 18...55%. При цьому твердість цих сталей збільшується на 8...19% і з'являються залишкові стискаючі напруги в діапазоні 1500...2300 МПа.

Обкочуванням підвищується границя витривалості й довговічності хромованих, борованих, азотованих або цементованих деталей машин. Значне усунення обкочуванням поверхневих дефектів деталі зменшує шкідливий вплив середовища на втомну міцність, утруднюючи доступ рідкому й газовому активному середовищам углуб металу.

Підвищення обкочуванням, розкочуванням і накатуванням втомної міцності пояснюється сприятливим впливом зміцнення, залишкових напруг стиску, зменшенням у поверхневому шарі локальних мікронапруг.

При обкочуванні підвищуються контактні витривалість і твердість у з'єднаннях деталей машин. Обкатані поверхні більш зносостійкі, чим поверхні, які утворені лезовим або абразивним інструментами. Так, при дослідженні впливу обкочування на зношування зразків зі сталі 14Х2Н3МА в глинистому розчині отримане зниження зношування на 50...57% обкатаних зразків у порівнянні зі шліфованими.

Плавний округлений рельєф поверхні, підвищена твердість і контактна твердість поверхневого шару істотно знижують період припрацювання пар тертя. На інтенсивність же сталого процесу зношування обкочування може впливати по-різному. Інтенсивність зношування залежить від сумісності пари тертя, тобто від здатності поверхонь пари тертя пристосовуватися один до одного. Практикою встановлено, що для зниження інтенсивності зношування необхідно обкатувати тільки одну з поверхонь тертя. Це особливо ефективно, коли зношування протікає в агресивному середовищі.

Висока ефективність обкочування спостерігається тоді, коли зношування супроводжується циклічними навантаженнями, коли потрібно від поверхонь тертя відсутність поверхневих дефектів, плавний мікрорельєф, висока твердість. Так, в умовах роботи зубчастих передач при значних циклічних навантаженнях, обкочування підвищило зносостійкість в 1,8...2 рази в порівнянні із зубошліфуванням і в 3 рази в порівнянні із зубодовбанням.

Велике зношування в період припрацювання, властиве поверхням, отриманим різанням з гострими вершинами мікронерівностей, при контактуванні обкатаних поверхонь практично відсутній. Обкочування, згладжуючи мікрорельєф, усуне цей вид руйнування поверхонь.

Обкочуванням можна не тільки згладити, але й створити регулярний мікрорельєф, що накатується інструментом у вигляді роликів з рельєфними деформуючими інденторами на робочій поверхні. Такі рельєфні ролики застосовують для обробки деталей типу тіл обертання – на токарних, а плоских деталей – на стругальних верстатах. Занурювання індентора в поверхню оброблюваної деталі супроводжується зміцненням шарів металу, що перебувають у контакті з ним. При відповідному підборі геометричної форми інденторів, глибини їхнього занурення, а також розмірів рельєфного накатного ролика й розміщення на ньому системи інденторів, кожний отриманий таким шляхом виступ рельєфної поверхні охоплюється шаром деформаційно-зміцненого металу, що зберігає в обсязі виступу залишкові напруги стиску, сформовані при деформації. Підвищення навантажувальної здатності виступу за рахунок зміцнення й виникнення напруг стиску в обсязі цього виступу пропорційно різниці залишкових дотичних напружень зміцненої й вихідної поверхні.

Так, після накатування рельєфними роликами чавунних напрямних повністю відсутнє схоплювання й значно знизилася інтенсивність зношування. Оптимальним по зносостійкості виявився рельєф із площадками довжиною 4 мм і каналами шириною й глибиною 0,3...0,4 мм. Накатуванням рельєфними роликами контактних поверхонь замків компресорних лопаток газотурбінних двигунів було досягнуто істотне зниження інтенсивності фретинг-корозії й підвищення міцності лопаток при циклічному навантаженні. Розглянутий спосіб утворення регулярного мікрорельєфу поверхонь використаний для підготовки титанових деталей під металеві й тверді покриття. При цьому покращився зв'язок покриттів з матеріалом деталей, що підвищило опір покриття зрушенню. Шарніри з торованими рельєфними роликами поверхнями втулок на шасі літака АН-28 при літних випробуваннях показали ресурс в 4 рази вище ресурсу шарнірів з безперервними гладкими поверхнями втулок. Статистичні дані ремонтних підприємств по зносостійкості зміцнених поверхонь шарнірів шасі літака ТУ-134 свідчать про можливість подвоєння їхнього міжремонтного ресурсу.

У нерухомих з'єднаннях деталей з титанових сплавів, підданих фретинг-корозії, цей спосіб зміцнення доцільно сполучати з нанесенням металевих або твердомастильних покриттів, а на поверхнях з конструкційних сталей – з хіміко-термічною обробкою.

Інструмент для рельєфного накатування поверхонь тертя виготовляється у вигляді однорядних або багаторядних роликів зі сталі ШХ15 методом холодного накатування. Кут загострення інденторів становить 55...60°, радіус округлення – 0,1 мм. Термічна обробка проводиться по загальноприйнятій для даної сталі технології.

Навантажувальна здатність поверхонь деталей із чавуну, бронзи, титана й сталі зростає в результаті рельєфного накатування на 30...80%. Ефект підвищення навантажувальної здатності такого регулярного мікрорельєфу поверхні, утвореної різанням або електричним травленням, менше в порівнянні з пластичним деформуванням відповідно на 50 і 70%. Раціональне сполучення матеріалу деталі, способу й режимів обкочування з умовами експлуатації деталі забезпечує крім зниження зношування також і скорочення циклу виробництва. Так, впровадження обкочування золотника сервомеханізма муфти зчеплення тракторів дозволяє виключити з технологічного процесу нітроцементацию. При цьому зносостійкість не поступається нітроцементованим золотникам.

Обкочування впливає також на магнітні, електричні властивості деталей приладів і машин. В останнім часом обкочування й розкочування одержує поширення при обробці поверхонь різей і зубчастих коліс. Нерухомі й рухомі нарізні сполучення знаходять саме широке застосування в сучасних машинах і механізмах. Якщо одержання різьбових поверхонь невисоких ступенів точності не викликає особливих технологічних труднощів, то високопродуктивне виготовлення різей 4–5 ступенів точності із шорсткістю поверхонь витків $R_z = 6,3...3,2$ мкм пов'язано зі значними технологічними труднощами.

При нарізуванні різей можна одержувати високі ступені точності поверхонь. Шорсткість поверхонь витків $R_z = 20...6,3$ мкм залежить від геометрії інструмента й режимів роботи. Фізико-механічні властивості поверхонь витків при їхньому утворенні різальним інструментом характеризуються перерізанням шарів основного металу, деяким зміцненням западин і зменшенням міцності виступів витків під впливом високих температур у зоні різання, а також виникненням напруг розтягу. Це визначає й відповідні експлуатаційні якості таких різей, що характеризуються зниженою міцністю на зріз, швидким згладжуванням мікронерівностей поверхні витків під дією циклічних і знакозмінних навантажень, що приводить до порушення натягів нерухомих з'єднань, швидкого зношування рухомих нарізних сполучень, низької втомної міцності.

Застосування одно- або багатониткового шліфування дозволяє значно підвищити точність виготовлення різей і зменшити шорсткість поверхні витків до $R_z = 1,6...0,8$ мкм, однак практично не поліпшує фізико-механічні властивості поверхневих шарів. Накатування є прогресивним способом одержання гвинтових різьбових поверхонь за допомогою пластичного деформування поверхні металу деталі роликми, плоскими плашками або сегментами, профіль витків яких являє собою негативне відображення профілю різі. Накатування різей в 3...10 разів більш продуктивно, ніж нарізання. Його відрізняє економічність, надійність

нарізних з'єднань, низька шорсткість, плавний мікрорельєф поверхні витків і висока стійкість накатного інструмента. При накатуванні різьей метал витками не перерізується, а пластично деформується й має волокнисту текстуру, що різко збільшує міцність нарізного з'єднання. Волокна, особливо в западинах витків, не розірвані, а деформовані й вигинаються по профілю різі. Мікрорельєф поверхні при цьому характеризується шорсткістю $R_z = 3,2...0,4$ мкм із великою опорною поверхнею, більшими радіусами заокруглень, виступів і западин мікронерівностей і малих кутів нахилу їхніх бічних сторін. Межа міцності при розтягу накатаних різьей вище на 10...20%, чим нарізаних, а міцність на зріз і стиск – на 18...23%, що практично виключає випадки зриву витків різьей в експлуатації. Циклічна міцність накатаних різьей вище, ніж нарізаних, на 40% для вуглецевих сталей типу сталь 45 і на 60...100% для високолегованих сталей типу 40ХНМА. Поверхнева твердість витків різьей збільшується на 30...50%, а в ряді випадків на 100%, що приблизно на 30% підвищує їхній опір зношуванню в порівнянні з нарізаними, що особливо важливо для ходових гвинтів. Ступінь деформації досягає в області западини накатаних різьей 60...65%. Глибина зміцненого шару для сталей перлітного класу становить близько 0,5 мм і залежить від закритого або відкритого профілю роликів і режимів накатування.

Особливий вплив на точність накатаної різі має точність діаметра й шорсткість поверхні заготовки під накатування, особливо при накатуванні роликками закритого профілю. Зміна шорсткості поверхні заготовки з $R_z = 40...20$ мкм до $R_z = 6,3...3,2$ мкм спричиняє зміну зовнішнього діаметра накатаної різі у межах 0,02...0,04 мм. Для одержання різьей 4...6 ступеня точності допуск на зовнішній діаметр заготовки повинен перебувати в межах 0,2...0,5 величини допуску на середній діаметр різі.

На точність накатаної різі впливає розсіювання твердості заготовок. Так, при накатуванні різьей 8-го ступеня точності коливання твердості не повинне перевищувати 30НВ, 6-го ступеня точності – 20НВ, 4-го ступеня точності – 10НВ. На практиці важко забезпечити високу стабільність геометричних і міцнісних параметрів заготовок, тому накатування різьей 4–6-го ступенів точності важко виконати й неекономічно.

Можливість стабільного одержання різанням високого ступеня точності різьей й зміцнення її наступним обкочуванням роликками, дозволило з успіхом застосувати процеси обкочування й розкочування для одержання точних зовнішніх і внутрішніх поверхонь. Обкочування роликками попередньо нарізаних різьей забезпечує значне підвищення сталостної міцності й зносостійкості різевих поверхонь, а також збільшує міцність витків на зріз і зминання, що в значній мірі підвищує надійність і довговічність нарізних з'єднань.

При обкочуванні різей, для створення найбільшого зміцнення в западинах, що є концентраторами напруг, кут профілю витків роликів приймається на $2...5^\circ$ менше кута профілю різі. Величина зміцнення поверхні й глибина його поширення при обкочуванні різей залежить від припуску під обкочування, тиску, числа обертів деталі або інструмента, протягом яких відбувається остаточне формування різевої поверхні, способу виготовлення різей під обкочування й ряду інших факторів. Так, при обкочуванні на накатному верстаті западин попередньо нарізаної різі M12x1,5 роликami із зусиллям 7 кН на довжині 27 мм, із припуском на обкочування 30...90 мкм при двох обертах деталі твердість западин витків підвищилася із HB 312 до HB 342 для сталі 40ХНМА й із HB 220 до HB 262 для сталі 45.

Обкочування доцільно використовувати не тільки для поліпшення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів витків різей, але й для підвищення точності й зниження шорсткості поверхонь витків нарізаних різей.

Обкочування різей може бути здійснено такими способами:

- обкочуванням тільки зі змінанням мікронерівностей без помітної пластичної деформації поверхневих шарів металу самих витків;
- з переміщенням припуску в зону вершин витків;
- обкочування попередньо нарізаних різьблень із кутом профілю при вершині більшим 60° .

Обкочування різей другим способом призводить до збільшення на 30...40% поля розсіювання середнього діаметра попередньо нарізаної різі, що практично не викликає істотної зміни точності різі. При цьому крутні моменти потрібні в три рази менші, чим при накатуванні тих же різей, а вихідна шорсткість поверхні витків значно знижується й лежить у межах $Rz = 1,6...0,4$ мкм.

Обкочування зубчастих коліс твердістю до 40HRC здійснюється із застосуванням ЗОТС еталонними зубчастими колесами 5–6-й ступеня точності із шорсткістю поверхні зубів $Ra = 0,32...0,04$ мкм. Шорсткість попередньо обробленої поверхні зубів $Ra = 0,63...0,08$ мкм. При обкочуванні помітно поліпшуються параметри контакту й плавність ходу передачі, завдяки чому досягається 7–8-а ступінь точності. Обкочування однак не виправляє похибки кроку зубів, що виникають на попередніх зуборізних операціях. Для зубчастих коліс, що піддаються наступному загартуванню, обкочування не виконується, тому що після термічної обробки зміцнення поверхні зникає. При виготовленні цементованих загартованих зубчастих коліс обкочування шкідливо й неприпустимо, тому що, що в процесі пластичного деформування в поверхневих шарах утворюються мікротріщини і відшаровування поверхнево деформованого цементованого й загартованого шару.

Обкочування здійснюється на обкатних або горизонтально-фрезерних верстатах у спеціальних пристосуваннях. У процесі обкочування для рівномірної обробки обох сторін зубів здійснюється періодичне реверсування зі зміною напрямку обертання обкочування деталей. У процесі обкочування залежно від твердості деталі і необхідної шорсткості кількість реверсів може змінюватися від 3 до 25, а час обкочування – від 10 до 40 с.

Недоліком процесу обкочування є деяке викривлення профілю зубів, а також нерівномірність зміцнення за рахунок різниці в ковзанні бічних поверхонь зубів евольвентного профілю накатника й оброблюваного колеса, причому біля ніжок і вершин зубів швидкості ковзання найбільші. При тривалому обкочуванні профіль зубів погіршується й може виникнути перезміцнення поверхневих шарів у результаті багаторазового їхнього деформування, при цьому шорсткість поверхні трохи збільшиться. Обкочуванням з додержанням режиму обробки й застосуванням якісних еталонних колес-обкатників точність зубчастих коліс може бути стабільно забезпечена в межах 7–8-го ступеня, а в ряді випадків і 6-го, а шорсткість поверхні $Ra = 0,63...0,08$ мкм.

Для незагартованих зубчастих коліс застосовується процес шевінг-обкатки, що об'єднує в собі різання поверхні зубців круглим шевером і зміцнення їх способом поверхневого пластичного деформування зубчастими обкатниками. Для обробки обох сторін зуба виконується реверсування обертання шевера, що перебуває у кінематичному зв'язку через оброблюване колесо із двома зубчастими обкатниками. Залежно від модуля й числа зубів оброблюваного колеса кількість обертів у ту чи іншу сторону складає декілька десятків при тривалості обробки 6...10 с на один зуб.

Для обробки прямозубих циліндричних зубчастих коліс застосовується прямозубий шевер зі спіральними канавками, а для косозубих коліс – косозубий шевер з канавками, перпендикулярними до осі колеса. Зміцнюючим інструментом є два загартованих еталонних зубчастих колеса-обкатника зі шліфованими й полірованими зубами. Припуск на шевінг-обкатку залишається не більше 0,1 мм на сторону зуба. Шевінг-обкаткою можна виправити окремі дефекти нарізаних коліс, при цьому перекручування профілю, властиве процесу звичайного обкочування, буде меншим, і можна стабільно одержувати зубчасті колеса 6–7-го ступенів точності.

Обробка зубчастих коліс модулем понад 2,5 мм, що мають широкі вінці, здійснюється на спеціальних установках одночасно двома роликками. Спеціальний механізм забезпечує необхідне притиснення роликів до оброблюваного колеса і їхню подачу для обкочування уздовж осі колеса на ширину вінця. Після обкочування двох западин колесо

повертається на один крок. Ролики мають профіль, що строго відповідає профілю западини. Таким методом зберігається точність, досягнута процесами попереднього нарізування, а шорсткість витків знижується до $Ra = 0,63 \dots 0,32$ мкм і забезпечується зміцнення бічних поверхонь зубів зі створенням у поверхневих шарах незначної волокнистої текстури й напруж стиску. На 35...40% підвищується межа витривалості крупномодульних зубчастих коліс із термообробленої сталі 34ХН1М. Результатом зміцнення цих коліс є збільшення їхньої довговічності в 2–4 рази.

4.6. Вібраційні способи вигладжування, обкочування, розкочування й накатування

Подальше поліпшення експлуатаційних характеристик пар тертя може бути досягнуто застосуванням алмазного вібровигладжування. При вібровигладжуванні інструменту, крім подачі, надається коливальний рух. Існує кілька конструкцій для створення цього коливального руху на базі механічних, пневматичних, електромагнітних приводів. Такий складний рух інструмента дозволяє створити на поверхні деталі регулярний рельєф у вигляді сітки плавно округлених каналів. Сполучення подачі, обертання, коливань приводить до створення нового мікрорельєфу: утвориться система видавлених алмазним наконечником синусоїдальних каналів.

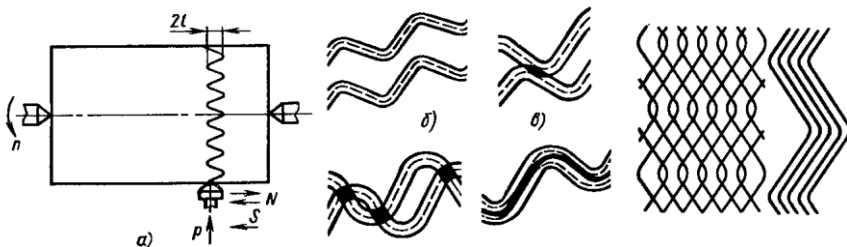


Рис. 4.6.1. Схема процесу вібровигладжування та профіль утворених каналів

Такі канали можуть розташовуватися без взаємних перетинань, із частковим або повним перетинанням, сліди їх можуть накладатися. Для більшої довговічності каналів необхідно забезпечити їхню відносну площу в межах 35...70% і глибину каналів у межах 5...20 мкм для твердих сталей і 30...50 мкм для матеріалів середньої твердості. Для сирих сталей і

кольорових сплавів глибина каналів обмежується припустимою величиною й характером напливів.

Вібровигладжування не тільки збільшує маслоємність поверхні, але й підвищує в 1,3...1,7 рази залишкові напруги в порівнянні з вигладжуванням на тих же режимах без коливального руху. Ці переваги забезпечують ріст довговічності деталей машин. Так, зношування вібровигладженої поверхні вкладишів підшипника кулачкового вала двотактного двигуна внутрішнього згоряння за ресурс його роботи склало 4...5 мкм, що в 1,5...1,6 рази менше звичайних підшипників. Вібровигладжування ефективне при обробці деталей золотникових пар, поршневих пар радіально-поршневого насоса, розподільника гідроагрегатів. Після вібровигладжування цих деталей знижується коефіцієнт тертя, виключається схоплювання й заклинювання з'єднаних пар, що, значно підвищує зносостійкість.

Значні можливості поліпшення експлуатаційних якостей розкриває новий прогресивний процес вібровигладжування з наступним тонким обкочуванням. Застосування наступного тонкого обкочування кульковим деформуємим інструментом, згладжує напливи металу, отримані в процесі вібровигладжування, а також згладжуються гострі вершини мікронерівностей між канавками дозволяє додатково підвищити зносостійкість поверхонь на 10...11%, збільшити опорну поверхню без зниження маслоємності канавок і знизити шорсткість до $Rz = 2,9$ і $1,8$ відповідно, при цьому час припрацювання знижується в 2...2,5 рази, що значно збільшує тривалість нормального зношування.

Оптимальними процесами при цьому для сталі 20Х є: шліфування до $Ra = 1,25$ мкм із наступним вібровигладжуванням (на режимах $s = 0,43$ мм/об; амплітуда вібрації $2l = 1,6$ мм; частота обертання заготовки 30 хв^{-1} ; i – відношення числа подвійних ходів вигладжувача до n_3 , рівне 25; зусилля $P = 300$ Н; радіус вигладжувача $R = 2$ мм) і тонким обкочуванням ($s = 0,21$ мм/об, $v = 0,5$ м/с, $D = 5$ мм, $P = 600$ Н). Обробка сталі 45 ведеться з тими ж режимами, тільки шорсткість після шліфування $Ra = 0,8$ мкм, крім того, повинні змінитися зусилля вигладжування до 200 Н и обкочування до 350 Н.

Стійкість алмазних вигладжувачів виміряється десятками годин, площадка зношування для сферичних вигладжувачів не повинна перевищувати 0,3 мм.

Широкі технологічні можливості поліпшення експлуатаційних якостей деталей і підвищення їхньої довговічності за рахунок регулювання параметрів мікрорельєфу поверхні й фізико-механічних властивостей поверхневих шарів має спосіб вібраційного поверхневого пластичного деформування. Суть його в тім, що в результаті складного відносного переміщення деформуємого елемента інструмента щодо оброблюваної

поверхні на ній видавлюються по певному заданому малюнку й формі канавки, між якими зберігається первинний мікрорельєф поверхні або створюється повністю новий мікрорельєф. Цей спосіб дозволяє досить точно й у великих межах регулювати розмірні параметри мікрорельєфу, взаєморозташування його нерівностей, а також змінювати в потрібну для експлуатації сторону фізико-механічні властивості поверхневого шару.

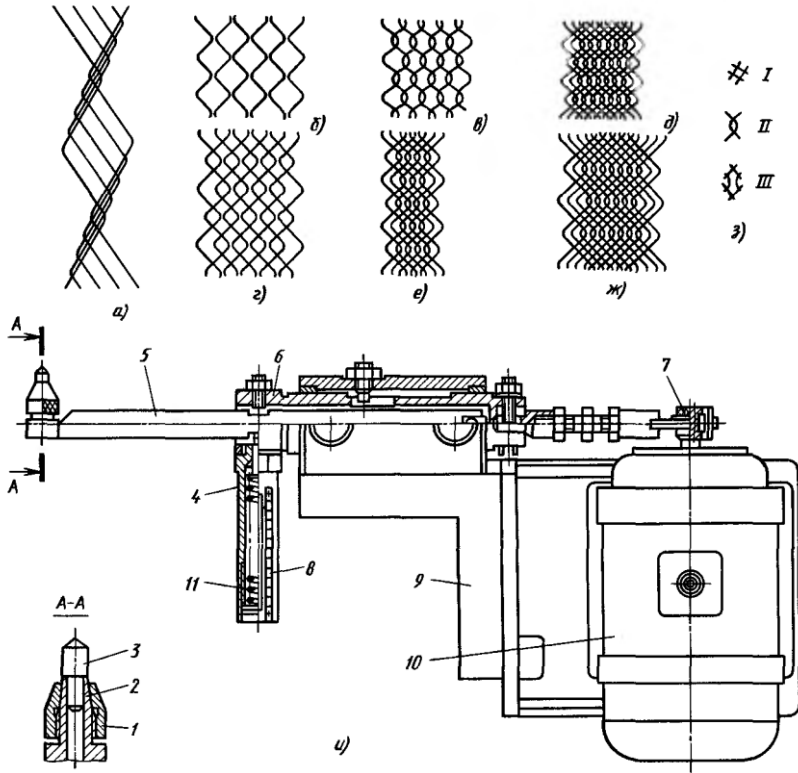
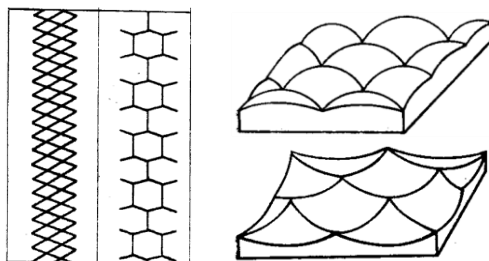


Рис. 4.6.2. Схеми розташування каналів і пристрої

Параметрами режиму віброобробчування й розкочування тіл обертання й вібронакатування площин, що визначають характер отриманого мікрорельєфу поверхні, є частота обертання заготовки при обробці тіл обертання n_3 або величина поздовжньої подачі $s_{пр}$ при вібронакатуванні; число подвійних ходів деформуючого елемента $n_{дв.х}$, амплітуда $2l$, яка дорівнює довжині ходу деформуючого елемента; подача на оберт s_0 , або поперечна s , на хід стола; діаметр деформуючої кулі D_K або радіус деформуючого алмазного або твердосплавного елемента. У результаті

взаємодії зазначених параметрів режиму за один оберт деталі або хід стола на оброблюваній поверхні деформуючим елементом видавлюються канавки, що мають синусоїдальну траєкторію, амплітуда якої дорівнює довжині ходу деформуючого елемента $2l$, а довжина хвилі залежить від співвідношення числа подвійних ходів і частоти обертання заготовки або поздовжньої подачі стола s_p . Вібронакаткування плоских поверхонь може бути здійснене за кілька проходів, за один прохід при одночасному обертанні інструмента із закріпленою у ньому деформуючою кулею, за один прохід при русі осциляції деформуючої кулі, за один прохід або кілька проходів із прямолінійним рухом деформуючої кулі. На поверхні деталі можна одержувати різноманітний і складний профіль мікрорельєфу, що залежно від співвідношення параметрів режиму може бути розділений на два основних класи, регламентованих ГОСТом 24773-81. На поверхні деталі можна одержувати повністю регулярний мікрорельєф поверхні (шестикутний, чотирикутний і т.д.). До другого класу відносяться поверхні із частково регулярним мікрорельєфом.

Відповідно до цього ГОСТ, до першого класу відносяться поверхні із ПРМР, що складаються з однакових нерівностей (елементів), форма, розмір і регулярне розташування яких обумовлює експлуатаційні властивості поверхні. Ці поверхні (рис. 4.6.3) характеризуються типом елемента поверхні.



4.6.3. Повністю регулярний мікрорельєф (тип і форма)

ЧРМР, що складаються не тільки з елементів регулярного мікрорельєфу, але й з ділянок з вихідною шорсткістю, розташованих між регулярними елементами. Поверхні зі ЧРМР (рис. 4.6.4) можуть бути з дискретно й безперервно розташованими регулярними нерівностями (системами канавок) з відсутністю перетинання, неповним перетинанням (торканням) і повним перетинанням. Дискретні нерівності можуть бути кільцевими або шаховими.

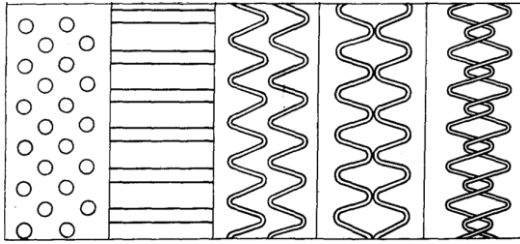


Рис. 4.6.4. Частково регулярний мікрорельєф

Всі введені в ГОСТ параметри визначають абсолютні геометричні розміри регулярних мікронерівностей, причому висота й глибина елемента регулярного мікрорельєфу не перевищують розміри мікронерівностей, установлених ГОСТ 2789-73.

Між параметрами регулярних мікронерівностей і режимами віброобробки є певні аналітичні зв'язки, що дозволяють установлювати в кожному конкретному випадку режими обробки для одержання необхідного класу й параметрів мікрорельєфу регулярної поверхні, що забезпечують необхідні експлуатаційні показники поверхневих шарів деталі.

У процесі віброобробки на поверхні утвориться система мастильних канавок і кишень, що дозволяє оптимізувати як площу контакту, так і маслоємність поверхні. Це знижує коефіцієнт тертя в 1,6...2,2 рази, підвищує зносостійкість в 1,5...1,7 рази, підвищує плавність роботи механізму. При сухому терті канавки працюють як пастки, що затримують у собі продукти зношування, пил і абразивні частки, завдяки чому локалізується їхня абразивна дія, істотно поліпшуються всі фізико-механічні характеристики поверхневого шару. Значне зміцнення поверхневого шару при вібронакатуванні досягається в результаті багаторазового навантаження і складного відносного руху деформуючого інструмента й оброблюваної деталі.

Віброобробкування й вібророзкочування (рис. 4.6.5) здійснюються на токарних верстатах, оснащених установленими на супорті спеціальними пристроями – віброголовками.

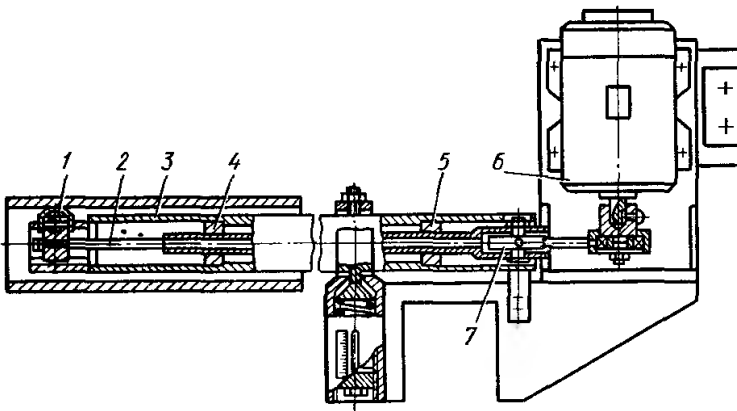


Рис.4.6.5. Віброголовка для розкочування отворів

Обертання заготовки й поступальне переміщення віброголовки з деформуючим елементом уздовж оброблюваної поверхні деталі виконується за допомогою шпинделя й супорта верстата, а рух деформуючого елемента й зусилля для пластичного деформування оброблюваної поверхні забезпечуються конструкцією самої віброголовки.

Вібронакатування площин звичайно виконується на фрезерних або повздовжньо-стругальних верстатах (рис. 4.6.6), при цьому подача деталі відносно деформуючої віброголовки здійснюється верстатом, а коливальний рух деформуючого елемента забезпечуються конструкцією самої віброголовки і її привода.

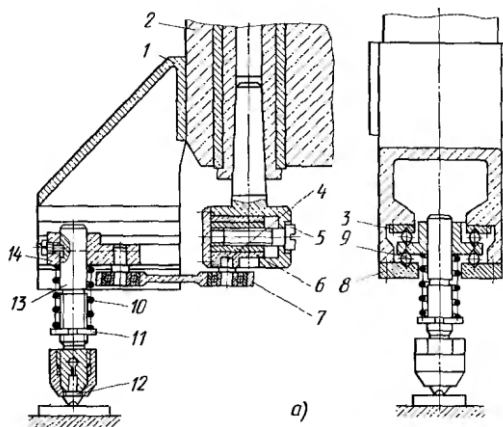


Рис. 4.6.6. Конструкція віброголовки для обробки плоских поверхонь

Коливальний рух може здійснюватися за допомогою механічного, електромагнітного або пневматичного пристроїв. Найбільше поширення одержав електромеханічний привод.

Як деформуючий елемент застосовуються сталеві загартовані кульки, алмазні або твердосплавні індентори, які закріплюються в оправках. Для забезпечення незначного тертя катання кулька опирається на зовнішню обойму кулькового або роликowego підшипника, встановленого на осі в обоймі державки. У ряді конструкцій замість підшипників застосовуються фторопластові підкладки. Найбільше часто застосовують кулькові оправки з опорою деформуючого елемента на обойму підшипника з латунним або бронзовим сепаратором.

При віброобточуванні валів діаметрами 80...200 мм і довжиною більше 0,5 м застосовуються пристрої, що мають синхронно працюючі віброголовки, що приводяться у рух від шпинделя токарного верстата. У цьому випадку рух осциляції передається на систему з'єднаних між собою декількох віброголовок, встановлюваних на супорті верстата. Вібророзкочування отворів може здійснюватися як головками з одним деформуючим елементом, так і одночасно декількома деформуючими елементами, що набирають у регульовані вібророзкочувальні багатоінструментні головки. Як деформуючий елемент у таких головках застосовуються сталеві загартовані кульки або алмазні й твердосплавні індентори, встановлювані в оправках. Вібророзкочування отворів у нежорстких деталях може здійснюватись багатокуюлковою головкою з діаметрами кульок 2...3 мм.

Для вібророзкочування отворів у твердих деталях застосовується віброголовка аналогічної конструкції, але в ній необхідне зусилля деформування створюється набором тарілчастих пружин. Щоб уникнути ушкодження зміцненої поверхні при виході головки з отвору в конструкції передбачене робоче й холосте положення деформуючих куль.

Для тонкого вібровигладжування отворів деталей, що мають малу радіальну жорсткість, застосовуються деформуючі алмазні або твердосплавні індентори. Залежно від режимів обробки головка дає можливість стабільно одержувати шорсткість поверхні в межах $Ra = 0,025...0,063$ мкм і підвищувати міцність поверхневого шару в 1,5...2 рази. При необхідності цією головкою можна наносити бажаний малюнок синусоїдального типу, підвищуючи при цьому маслоємність і контактну твердість поверхонь.

Звичайне вібраційне обточування й розкочування виконують кульками діаметром не менш 3...4 мм. При обробці нежорстких деталей із в'язких матеріалів для створення системи масляних канавок застосовують кульки діаметром 1...2 мм при незначних зусиллях деформування. Для вібраційного обточування тонкостінних поршневих кілець зі сталі X12M,

32...38 HRC застосовується головка з кулькою діаметром 2 мм. Вона складається із бронзового корпусу, оправки зі сталі ХВГ, гвинта, що притискає бронзовий корпус до оправки, і сталеві вільно обертової кульки, що виступає на 0,25...0,3 мм. Вібраційне обкочування хромованого поршневого кільця не порушує цілісність хромованого покриття.

Створення регулярного мікрорельєфу не на одній, а на обох поверхнях пари тертя (гільза – поршень або гільза – поршневе кільце), як правило, підвищує зносостійкість. Для вібророзкочування внутрішньої поверхні гільз двигуна створений спеціальний верстат, що має чотири позиції, у кожній з яких є привод обертання заготовки й розкатної віброголовки. У головці кріпляться три тримачі деформуючого інструмента, які розташовані під кутом 120°, кульки діаметром 4 мм зміщені по висоті одна відносно одної на 2,5 мм. Головка працює за циклами: швидке підведення, робоча подача, швидкий відвід. Затискач заготовки й притиск деформуючих елементів – кульок до оброблюваної поверхні виконується за допомогою гідравлічного пристрою. Для скорочення часу на заміну зношених кульок застосований сепаратор, у якому установлені вісім кульок і заміна зношених кульок на нові здійснюється за рахунок повороту сепаратора. При вібророзкочуванні внутрішньої поверхні на ній утвориться мікрорельєф у вигляді недотичних безперервних канавок у формі синусоїд. Площа канавок становить 28...30% від робочої поверхні гільзи.

Широке поширення одержало вібронакатування плоских пар тертя. Застосування вібронакатування поверхонь плоских і корпусних деталей дозволяє відмовитися від таких несприятливих відносно технологічної спадковості процесів, як шліфування, при якому виникає шаржування поверхонь, особливо чавунних деталей, що погіршує експлуатаційні якості деталей.

Застосування вібронакатування відкритих поверхонь типу напрямних дозволяє відмовитися від малопродуктивних процесів шабрування, а в ряді випадків і від поверхневої термічної обробки сталевих деталей, що значно скорочує трудомісткість і собівартість їхнього виготовлення.

Вібраційне накатування площин здійснюється на фрезерних верстатах спеціальними вібронакатними головками, що мають один або три одночасно працюючих деформуючих елементів – кульок, алмазних або твердосплавних. Схеми роботи головок з декількома деформуючими елементами можуть бути різні. Звичайно така головка вставляється конічним хвостовиком у шпindel фрезерного верстата. Коливальний механізм розміщується в корпусі головки. Його привод може бути від окремого двигуна через вал, пропущений в отворі шпинделя, або від самого шпинделя.

Обробка плоских поверхонь здійснюється по двох основних схемах:

1) з перекриттям оброблюваної поверхні по всій її ширині за один прохід;

2) з дискретною поперечною подачею деформуючого елемента по ширині заготовки.

Промислова практика останнього років виявила більшу ефективність вібронакаткування плоских поверхонь по першій схемі. При вібронакатванні широких поверхонь за кілька проходів поздовжня й поперечна подачі здійснюються столом фрезерного або стругального верстатів.

Для вібронакаткування площин на вертикально-фрезерних верстатах застосовуються необерткові головки з поворотною багатокувковою оправкою.

З метою створення заданого мікрорельєфу постійної глибини канавок при вібронакатванні складних поверхонь трикутного, трапецієподібного, конусного й іншого типів, створений вібронакатний пристрій зі стабілізацією зусилля на деформуючому інструменті.

Стабілізація досягається тим, що пристрій для створення мікрорельєфу оснащений гідроциліндром зі штоком, на якому розміщений деформуючий інструмент, гідроциліндр і шток зв'язані з важелем, запобіжним клапаном, переливним золотником і джерелом живлення.

Для тонкої обробки особливо точних і відповідальних плоских поверхонь тертя застосовуються вібровигладжуючі алмазні головки із приводом від шпинделя вертикально-фрезерного верстата. У цьому випадку привод для одержання руху осциляції алмазного деформуючого індентора, установленого в шпинделі-оправці головки ексцентрично відносно її осі, здійснюється за рахунок кулісного механізму, зв'язаного з однієї сторони з копіром, установленим на шпинделі верстата, а з іншої сторони з рейкою, у зачепленні з якої перебуває шестірня редуктора. Зворотньо-поступальні рухи рейки в редукторі перетворюються в обертові рухи шпинделя оправки головки, що створює рухи осциляції алмазного індентора. Корпус головки кріпиться на гільзі шпинделя верстата. подача деталі здійснюється столом верстата.

Параметри режиму віброобробки впливають на основні показники якості поверхні й фізико-механічні властивості поверхневих шарів, а, отже, на довговічність деталей машин. Так, у процесі віброобробкування циліндричних деталей у результаті контакту кулі із заготовкою форма останньої практично залишається незмінною, а зменшення розміру за рахунок пластичного деформування відбувається рівномірно по всій оброблюваній поверхні.

Деформуюче зусилля є основним динамічним параметром, що впливає як на висоту нерівностей, що формуються, так і на фізико-

механічні властивості поверхні. Деформуюча куля робить незрівнянно більш складний рух відносно оброблюваної поверхні, чим при звичайному обкочуванні, вона контактує з кожним виступом мікронерівностей вихідної поверхні з різних сторін, розгортаючи метал у різних напрямках. У результаті опір деформуванню зменшується, а інтенсивність деформації збільшується. Це дозволяє при обробці нежорстких і нерівножорстких деталей утворювати оптимальний рельєф і одержувати значне зміцнення поверхні без значної загальної деформації заготовки.

На відміну від обкочування при віброобкочуванні залежність ступеня згладжування від зусилля вдавнення деформуючого елемента в оброблювану поверхню нелінійна.

Якщо при малих зусиллях вдавнення кулі відбувається деяке згладжування мікронерівностей вихідної поверхні за рахунок деформації вершин виступів, то зі збільшенням зусилля утвориться новий мікрорельєф спочатку зі слідами невідгладжених вихідних мікронерівностей і потім при подальшому збільшенні зусилля відбувається їхнє повне вигладжування й утворення нового мікрорельєфу, висота, форма й розташування мікронерівностей якого будуть визначатися не тільки величиною зусилля, але й діаметром кулі, швидкістю, подачею, числом осциляцій й амплітудою коливання кулі. При подальшому збільшенні зусилля відбувається зростання шорсткості. Ця особливість процесу віброобкочування відкриває можливості «керування» утворенням мікрорельєфу поверхонь деталей машин і технологічним забезпеченням необхідних характеристик якості поверхні.

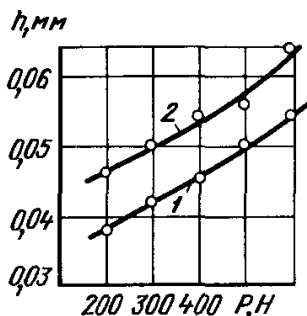


Рис. 4.6.7. Залежність глибини каналів від зусилля обкочування:
1 – вібровигладжування; 2 – віброобкочування

Можна встановити, що величина шорсткості Rz буде мінімальною при певних співвідношеннях зусилля деформування й діаметра кулі. Зі збільшенням зусилля до певного для кожного діаметра кулі значення

шорсткість поверхні буде зменшуватися, після чого починає рости, при цьому зменшення шорсткості буде тим більше, чим більше діаметр кулі. Це пояснюється зменшенням контактного тиску зі збільшенням діаметра кулі. Підвищення шорсткості після досягнення певних критичних значень зусиль пояснюється ростом контактних тисків, які вже не тільки згладжують мікронерівності, але й деформують сам метал поверхневого шару, що викликає видавлювання його й у ряді випадків перезміцнення.

Радіус вершин мікронерівностей збільшується зі збільшенням діаметра кулі, однак при всіх діаметрах він росте до певної межі зусиль вібронакаткування, після чого він трохи зменшується. Кут нахилу бічних поверхонь мікронерівностей у всіх випадках зменшується зі збільшенням зусилля й діаметра кулі. Опорна площа F_{op} (%) зі збільшенням зусиль до певних для кожного матеріалу меж збільшується, що пов'язане зі зменшенням шорсткості кута нахилу і зі збільшенням радіуса вершин. Подальше збільшення зусилля викликає деяке зниження опорної площі у зв'язку зі збільшенням шорсткості й кутів нахилу бічних сторін мікронерівностей. Збільшення діаметра кулі при одночасному підвищенні зусилля P і за умови збереження сталості в певних межах тиску є способом зменшення шорсткості.

З ростом параметра i до певного значення при збільшенні кратності й навантаження поліпшується якість поверхні. Перевищення цього значення різко погіршує якість поверхневого шару внаслідок перенапруги й руйнування мікронерівностей. Однак збільшення параметра i призводить до значного збільшення швидкості руху кулі, що зменшує ступінь і глибину деформуючого впливу.

З ростом подачі знижується кратність прикладеного навантаження. Найбільш помітно це проявляється при обробці сталі 40Х внаслідок її більшої твердості й необхідності збільшення деформуючого впливу. Аналогічні зміни відбуваються в сталі 45, тільки R_z міняється з меншою інтенсивністю. Сталь 12Х18Н9Т, через специфічні особливості її деформації, реагує на збільшення s у меншому ступені. Подача в межах від 0,07 до 0,3 мм забезпечує одержання всіх видів ЧРМР і ПРМР.

Збільшення $2l$ та i однаково впливають на деформацію поверхневого шару. Вплив $2l$ на шорсткість поверхні аналогічно впливу P та i , тільки в значно меншому ступені. Рекомендується приймати $2l = 2...2,5$ мм. Збільшення амплітуди $2l$ більше 3,5 мм викличе помітний ріст інерційних сил і прискорить зношування механізмів віброголовок.

Дослідження показали, що існує залежність радіуса закруглень мікронерівностей від їхньої висоти. Так, зі зменшенням висоти мікронерівностей R_z радіус закруглення їхніх вершин у віброобкатаних поверхнях значно вище, ніж при інших видах обробки. Зміна зусиль віброобкочування дозволяє не тільки в значних межах змінювати форму

мікронерівностей, що утворюються на поверхні, але й збільшувати радіуси закруглення їхніх вершин (табл. 4.6.1).

Форма мікронерівностей істотно впливає на такі експлуатаційні якості, як зносостійкість, темп і характер приробляння, корозійну стійкість і особливий опір схоплюванню.

Комплексна оцінка форми мікронерівностей r_B/Rz_{max} , що характеризує експлуатаційні якості поверхні, для віброобкатаних поверхонь на кілька порядків вища, ніж для поверхонь, оброблених іншим способом.

Кут нахилу утворюючих мікронерівностей β так само, як і радіус закруглення їхніх вершин, визначає несучу здатність, темп припрацювання, маслоємність поверхонь тертя, величину коефіцієнта тертя. Величина кута β залежить від чистової й фінішної обробки, причому при обробці способами пластичного деформування роликками або кульками кут β істотно зменшується. Найбільше зменшення кутів (до $1^\circ \dots 6^\circ$) досягається віброобкочуванням, при цьому створюються пологі, обтічні мікронерівності.

Таблиця 4.6.1

Характеристики шорсткості поверхні при різних способах обробки

| Вид обробки | Шорсткість поверхні Rz , мкм | Радіус закруглення вершин нерівностей r_B , мкм | Відношення r_B/Rz_{max} | Кут нахилу бічних сторін нерівностей β | Однорідність шорсткості поверхні σ |
|----------------------|--------------------------------|---|---------------------------|--|---|
| Точіння | 20...1,5 | 20...120 | 1...40 | 36...8 | 1,47...1,29 |
| Розгортання | 10...0,8 | 10...500 | 1...85 | ... | ... |
| Кругле шліфування | 6,3...0,4 | 16...40 | 2,6...40 | 6...10 | 0,69...0,6 |
| Внутрішнє шліфування | 10...0,8 | 3,5...15 | 0,3...330 | ... | ... |
| Хонінгування | 3,2...0,2 | 4...30 | 1,2...25 | ... | ... |
| Доведення | 0,8...0,05 | 5...125 | 30...600 | 1...3 | ... |
| Обкочування кулею | 6,3...0,8 | 800...1000 | 130...300 | 8...2 | 0,68...0,4 |
| Вібронакатування | 10...0,8 | 1400...12200 | 140...8 000 | 5...1 | 0,43...0,12 |

Характер розташування мікронерівностей і їхній напрямок впливає не тільки на величину коефіцієнта тертя, але й на такі характеристики, як зносостійкість і опір схоплюванню практично при всіх видах тертя. При

точінні, шліфуванні, обкочуванні, алмазному вигладжуванні сліди обробки на циліндричній поверхні являють собою кільцеві або гвинтові лінії з кутом нахилу, регульованим у межах від 10 до 2°, для всіх використовуваних у практиці режимів обробки. При віброобкочуванні сліди обробки мають форму сітки з кутами від 10 до 88°. Це забезпечує можливість одержання оптимального для різних умов експлуатації деталей малюнка мікрорельєфу робочих поверхонь.

Віброобкочуванням створюються поверхні з ЧРМР або ПРМР мікрорельєфом, висота мікронерівностей якого залежно від режимів обробки перебуває в межах 0,7...40 мкм, а середній крок $S = 0,07...2,7$ мм.

На параметри мікропрофілю, крім зусилля P і діаметра деформуючого елемента, впливають величини i , s і $2l$. Так, при збільшенні i від 10 до 50 для сталі 45, до 70 для сталі 40X і до 40 для сталі 12X18H9T радіус закруглення росте від 1500 мкм до 9000 мкм. Наступне підвищення i викликає зниження радіусів виступів і западин. Збільшення подачі s від 0,07 до 0,3 мм викликає зменшення r_B із 9000 до 7000...8000 мкм. На величину радіусів закруглення r_B зміна амплітуди $2l$ практично не впливає.

Для сталі 45 кут β досягає мінімуму при $i = 65...70$, для сталі 40X – при $i = 90...95$, для сталі 12X18H9T – при $i = 45...50$. Збільшення i понад ці значення викликає збільшення кута β . При збільшенні подачі s від 0,07 до 0,3 мкм кут β збільшується (для сталі 45 і 40X – від 1,5 до 2,5°, для сталі 12X18H9T – від 1 до 1,5°). Різний ступінь збільшення кута β пояснюється різницею в механічних властивостях цих сталей.

Із всіх способів деформаційного зміцнення вібронакатування забезпечує найбільший деформуючий вплив. У результаті викликаної їм деформації поверхневого шару відбувається не тільки механічне дроблення наявних структурних елементів, але й створення нових складних структурних утворень. Поверхневе вібраційне пластичне деформування супроводжується зміцненням поверхневих шарів, що підвищує опір металу наступній деформації, при цьому знижується його пластичність і збільшується поверхнева твердість. Найбільше підвищення мікротвердості спостерігається в сталях зі структурою аустеніту, фериту, мартенситу, найменше – перліту й сорбіту.

Найбільше впливає на поверхневу мікротвердість тиск деформуючого елемента й кратність дії цього тиску. При зменшенні діаметра кулі зменшується контактна площа між інструментом і деталлю, збільшується контактний тиск, що викликає підвищення деформуючого впливу інструмента на метал, і різко збільшується зміцнення поверхні. У той же час видавлювання більших за обсягом хвиль пластично деформованого металу значно погіршує мікрорельєф поверхні. Незначне збільшення мікротвердості сталі 40X (на 24,2%) пояснюється попереднім

перетворюванням кристалічних ґрат у результаті легування сталі хромом. Збільшення мікротвердості сталі 45 (на 40...47%) пояснюється її більшою здатністю піддаватися пластичним деформуванням у порівнянні зі сталлю 40X; найбільше збільшення мікротвердості сталі 12X18H9T (на 70%) – структурним перетворенням аустеніту в мартенсит.

За інших рівних умов ступінь і глибина зміцнення при вібраційному обкочуванні більше, ніж при звичайному обкочуванні. При цьому глибина поширення зміцнення (20...25 мкм) залежить від параметрів режиму віброобкочування й виду металу.

З параметрів режиму вібронакатування на глибину зміцнення найбільше впливає зусилля вібронакатування P . Залежність глибини зміцнення від зусилля P і твердості HV прямо пропорційна. Для сталі 45 збільшення зусилля з 150 до 900 Н приводить до збільшення глибини зміцнення з 5 до 40 мкм; для 40X – з 5 до 30 мкм; для сталі 12X18H9T – з 10 до 20...25 мкм. При рівних зусиллях найбільша глибина зміцнення досягається у сталі 45, трохи менша – в сталі 40X і найменша – у сталі 12X18H9T. Сталь 40X більш тверда, менш пластична, що визначає меншу глибину зміцнення. Мала глибина зміцнення в сталі 12X18H9T пояснюється тим, що внаслідок структурного перетворення аустеніту в мартенсит сильно підвищується твердість поверхневого шару й це перешкоджає поширенню деформації углиб зразка.

Як обкочування, так і віброобкочування створює в поверхневому шарі залишкові напруги. Звичайно при пластичному деформуванні у поверхневих шарах виникають напруги стиску. З підвищенням зусилля обкочування залишкові напруги в поверхневих шарах зростають. Однак при $P \gg 1000$ Н їхній ріст різко знижується. Особливо інтенсивне зростання залишкових напруг і глибина їхнього поширення спостерігаються при віброзміцненні незагартованої сталі зусиллями 300...400 Н. Вплив діаметра кулі пов'язаний зі зміною тисків у зоні контакту. Якщо при зменшенні діаметра кулі тангенціальні напруги помітно не змінюються, то осьові пропорційно зростають, при цьому глибина поширення залишкових напруг знижується. Збільшення кратності дії зусилля при віброобкочуванні сприяє збільшенню глибини зміцненого шару. Ступінь впливу подачі на залишкові напруги при віброобкочуванні при режимах, що забезпечують оптимальну шорсткість поверхні, незначна. Однак надмірне збільшення подачі може призвести до зменшення залишкових напруг. При віброобкочуванні виникають значні стискаючі напруги на поверхні, що поширюються на глибину до 0,6 мм. Більший ефект зміцнення, створюваного віброобкочуванням, у порівнянні з іншими способами чистової обробки тиском і різанням пояснюється більшою кратністю дії навантажень і складним рухом деформуючого елемента відносно поверхні оброблюваної деталі. При збільшенні зусилля

віброобкочування з 100 до 600 Н максимум залишкових напруг розташованих на глибині до 0,25 мм, а чисельне значення досягає 600...800 МПа.

При вібронакатуванні й віброобкочуванні підвищується міцність металу. Істотний впливає на неї мікрорельєф поверхні, причому визначальним є радіус закруглення западин мікрорельєфу, що грають роль концентраторів напруги. Так, вібраційне обкочування деталей підвищує межу їхньої міцності у порівнянні зі шліфуванням для сталі 45 на 36%; для сталей 40Х і 12Х18Н9Т відповідно на 20 і 38%. При обробці деталей з титанового сплаву 48-Т4 шліфуванням з наступним обкочуванням і віброобкочуванням межа міцності з 260 МПа в результаті обкочування підвищується до 300 МПа, а віброобкочування – до 340 МПа.

Контактна твердість впливає на точність і стабільність роботи механізмів, а також на точність установки деталей у пристосуваннях, на верстатах і точність самої обробки й зборки деталей. Застосування процесів віброобкочування і вібронакатування деталей із чавуну СЧ15 істотно підвищує контактну твердість стиків. При віброобкочуванні деталей із чавуну кулею ($D_w = 15$ мм) з тиском 150...200 МПа й поздовжньою подачею багатокулькової головки 160...235 мм/хв, при числі проходів два, досягається зниження шорсткості з $Ra = 2,5...5$ мкм до $Ra = 0,63...1,25$ мкм. Відносна опорна довжина профілю на відстані в 1 мкм від лінії виступів після вібронакатування в 2,6 рази більша, ніж після шліфування. Контактна жорсткість обох сторін стику вібронакатаних поверхонь збільшується на 42% у порівнянні зі шліфованими поверхнями, тоді як заміна тільки однієї шліфованої поверхні на вібронакатану дає збільшення жорсткості на 35%. Заміна шліфованої поверхні на вібронакатану в стику із шабреною дозволяє збільшити контактну жорсткість на 34%. Відносна опорна довжина профілю шорсткості на відстані в 1 мкм від лінії виступів після вібронакатування в 9,5 разів більше, ніж після шабрування. Контактна жорсткість стику вібронакатаних поверхонь збільшилася на 27% у порівнянні із шабреними стиками, тоді як заміна шабреної поверхні на вібронакатану в стику зі шліфованою поверхнею дає підвищення контактної жорсткості на 160%.

Таким чином, сполучення різних методів і способів обробки площин дозволяє регулювати жорсткість утворених ними стиків. Якщо прийняти за 100% жорсткість стику, що складається з обох шліфованих з $Ra = 0,6...1,2$ мм поверхонь, то жорсткість шліфованих і потім вібронакатаних до $Ra = 0,2...0,3$ мкм підвищується на 264%.

Вібронакатування звичайно виконується пружним інструментом при цьому значно підвищується показник площинності. Після вібронакатування є можливість одержувати 35...46 плям на площадці 25 x 25 мм. Найменше зношування спостерігається в деталей, оброблених

вібраційним обкочуванням з оптимізацією геометричних характеристик, що дозволяє значно підвищити довговічність верстатів. Вібронакатування спеціальною багатокульковою віброголовкою напрямних верстатів-автоматів збільшує маслоємність, зменшує момент рушення, підвищує плавність ходу, при цьому зносостійкість вібронакатаних поверхонь зростає у 2...2,2 рази. Особливо високі результати дає вібророзбкочування внутрішньої робочої поверхні кілець крутильних і прядильних машин. Маслоємність пари кільце-бігунок після нанесення системи канавок підвищується у 5 разів у порівнянні з маслоємністю пари з полірованим кільцем, що значно підвищує зносостійкість. Щоб уникнути розбризкування мастила із зони контакту глибину канавок 20...25 мкм (на напрямних верстатів, гільзах двигунів і підшипниках) зменшують до 4...5 мкм. Незважаючи на малу глибину, канавки практично зберігаються протягом 2...5 років роботи. Варто сказати, що видавлювання при вібронакатуванні канавок мікропрофілю не повинне бути надмірно глибоким. При глибоких канавках мають місце більші напливи видавленого металу. Ці збільшені напливи можуть бути причиною підвищеного зношування поверхонь тертя деталей у початковий період.

У ряді випадків застосування віброобкочування поршневих кілець дозволяє знижувати коефіцієнт тертя в парах у 2 рази, у результаті чого зношування зменшується у 2...2,5 рази, а температура в зоні тертя знижується з 105 до 37 °С.

Оптимізація мікрорельєфу поверхонь тертя особливо важливе для запобігання такого небезпечного явища, як схоплювання. У цьому випадку оптимальна форма нерівностей (радіус скруглення вершин і кут нахилу утворюючих), їхнє розташування щодо напрямку руху й однорідність за висотою мають вирішальне значення.

При обробці штоків гідроциліндрів землерійних машин, які працюють у тяжких умовах абразивного й корозійного зношування, виготовлених зі сталей 45, 40X и 12X18H9T з вихідною шорсткістю $Ra=0,5...0,32$ мкм, вібронакатуванням стабільно забезпечується шорсткість поверхні $Ra=0,32...0,04$ мкм. Одночасно збільшується мікротвердість поверхневого шару на 40...65% у порівнянні із твердістю основного металу. Гідроцильність з'єднань з гумовими ущільнювачами зростає на 45...70% у порівнянні з гідроцильністю, яку одержуємо після шліфування. Сила тертя в з'єднанні знижується на 40...55%, а міцність збільшується на 30...40%. Значно зростає корозійна стійкість. Тривалість періоду нормального зношування вібронакатаних штоків на 40...50% вища, ніж тривалість цього періоду для шліфованих штоків. Зносостійкість підвищується у 2...3,5 рази. У зв'язку з тим, що виступи мікрорельєфу поверхні при віброобкочуванні мають значні радіуси закруглень (сотні мікрометрів), а їхні бічні сторони мають малі кути, різко знизилася зношування гумових ущільнювачів і

сальників, а їхня довговічність наблизилася до довговічності роботи самих штоків.

Вібронакатування кулькою й вібровигладжування алмазним індентором з радіусом 2 мм поверхонь валів верстатів, виготовлених із цементованої і поверхнево загартованої до твердості 58...62HRC сталі 20X при режимах обробки $i = 25$, $s = 0,43$ мм/об; $n_3 = 30$ об/хв і тиск $P = 300$ Н за рахунок створення оптимального мікрорельєфу, збільшення маслоємності поверхні й збільшення її мікротвердості, підвищило у 2...2,2 рази їхню зносостійкість у порівнянні зі шліфуванням.

Останнім часом прогресивні процеси вібраційної оздоблювальної обробки одержали поширення при фінішній обробці таких складних по геометрії поверхонь, як зубчасті. Так, застосування вібронакатування поверхонь черв'ячних і зубчастих передач підвищує їхню зносостійкість в 1,5 рази, а для важко навантажених черв'яків каменерізних машин, а також ділильних механізмів координатно-розточувальних верстатів забезпечується підвищення їхньої довговічності у 2,5...3 рази. Вібронакатування зубчастих поверхонь точних і швидкохідних зубчастих коліс значно поліпшує їхні експлуатаційні якості й знижує шум передач. Використання вібронакатування точних циліндричних зубчастих коліс середніх модулів забезпечує регуляризацію мікрогеометрії поверхні зубів і деяке зміцнення їхніх поверхневих шарів (рис. 4.6.8).

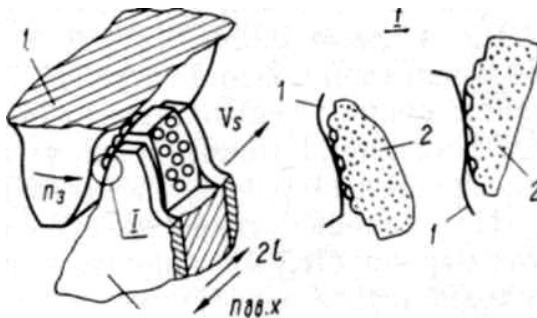


Рис. 4.6.8. Вібронакатування бокових поверхонь зубчастих передач

Вібронакатування здійснюється при обертанні оброблюваного колеса із частотою n_3 у зачепленні з інструментом, який здійснює повздовжні переміщення зі швидкістю V та коливальні рухи із частотою й амплітудою $2l$ уздовж утворюючих зубів коліс. Робоче зусилля деформування створюється гальмуванням зачеплення. Інструмент має вигляд зубчастого колеса з деформуючими елементами, розташованими на поверхні зубів. Ці елементи мають евольвентний профіль або сферичну форму і виконані

із твердого сплаву. У ході обкочування інструментом 2 вінці оброблюваного зубчастого колеса 1 характер і умови деформування поверхні зубів у значній мірі визначаються швидкістю ковзання деформуючих елементів відносно поверхні зубів оброблюваного колеса. Утворення повністю регулярного або частково регулярного мікрорельєфів на поверхні зубів оброблюваного колеса здійснюється деформуючими елементами зубів колеса-інструмента. Вібронакатування зубів забезпечує виправлення похибок евольвентного профілю, зменшення шорсткості поверхні й зміцнення поверхневого шару зубів.

Дослідженнями й практикою встановлені оптимальні значення параметрів режиму вібронакатування зубів: момент гальмування веденої ланки зачеплення до 100 Нм, частота осциляції інструмента впавши $n_{под.х} = 20...50$ Гц, $n_3 = 10...150$ хв⁻¹, $s = 0,05...0,3$ мм/об.

Висота мікронерівностей поверхні зубів після вібронакатування зменшується у 5...6 разів у порівнянні із зубошліфуванням, а мікротвердість поверхонь зубів при цьому підвищується в середньому на 15...20%.

При вібронакатуванні зубів коліс однорідність по висоті нерівностей мікрорельєфу поверхні у 3...7 разів вища вихідної. Для загартованих зубчастих коліс після їх вібронакатування оптимальна одержувана шорсткість за умови утворення необхідних масляних каналів становить $Ra < 1,25$ мкм, при цьому похибка евольвентного профілю зменшується у порівнянні з вихідною на 55...45%. Відносна площа канавок становить $F = 30...33\%$. Вібронакатування забезпечує виготовлення зубчастих коліс 7...8-го ступенів точності, ресурс роботи яких підвищується в 1,2...1,5 рази.

Вібророзкочування застосовується для розвальцювання труб. У порівнянні з механічною обробкою різанням розвальцювання труб колекторів підвищує щільність з'єднань завдяки багаторазовій деформації. Підвищення поверхневої мікротвердості на 30...35% у порівнянні з вихідною й розташування мікронерівностей у шаховому порядку у вигляді сітки, а не по гвинтовій лінії як при розгортанні, також сприяють підвищенню щільності вальцювальних з'єднань.

У прокатному виробництві оптимізація мікрорельєфу за допомогою вібронакатування в сполученні зі зміцненням поверхневого шару металу дозволяє підвищити на 20...30% міцність при вигині й на 20...25% міцність (у цьому випадку виступи висотою 20...25 мкм відіграють роль мікроребер). Запропоновано спосіб комбінованої обробки поверхонь у вузлах тертя з високими навантаженнями, що полягає в тім, що на металеву поверхню тертя із шорсткістю $Ra = 1...2$ мкм наносять антифрикційне покриття й після цього здійснюють вібронакатування. Під дією створюваних накатним інструментом високих тисків у покритті й тонкому шарі металу основи відбуваються пластичні деформації.

Матеріал покриття, вдавляючись у мікрозападини поверхні основи й проникаючи в найтонший шар металу, сприяє формуванню антифрикційного поверхневого шару, що відрізняється від вихідного шорсткістю, структурою, мікротвердістю, величиною й знаком залишкових напруг, а також характеризується кращою адгезією до металу деталі. Такі зміни поверхневого шару деталей забезпечують підвищення зносостійкості. Так, деталі зі сталі 30ХГСН2А, титанових сплавів ВТ3-1 і ВТ-16 покриті кадмієм, нікелем, хромом або іншими покриттями на основі дисульфиду молібдену й піддані вібровигладжуванню кулею діаметром 4 мм, зусиллям $P = 400...700$ Н, з $s = 0,05...0,1$ мм/об; $2l = 1,5$ мм мають у поверхневому шарі залишкові стискаючі напруги відповідно 250, 350 і 550 МПа, при цьому мікротвердість поверхні зростає в середньому на 20...30%. При даній обробці зносостійкість поверхонь істотно залежить від виду створюваного мікрорельєфу й від сполучення технологічних операцій покриття й вібронакаткування.

Пари тертя з титанових сплавів без покриття непрацездатні через швидке схоплювання. Нанесення покриттів на поверхні тертя в цьому випадку усуває явище схоплювання, однак зношування залишається високим. Вібронакаткування сталевих і титанових зразків з покриттями значно підвищує зносостійкість тертьових пар. Так, вібронакаткування з утворенням системи непересічних і пересічних канавок площею 35...50% підвищує зносостійкість пар тертя на 12...30% залежно від матеріалу зразків і виду покриття. Застосування цього способу у виробництві високонавантажених болтів шарнірних з'єднань підвищило їхню довговічність в 2...4 рази.

Вібронакаткування знаходить застосування для поліпшення виду деталей. Так, для заміни дорогого полірування корпусів і кришок виробів широкого вжитку впроваджений комплекс технологічного оснащення, що забезпечує одержання вібронакаткуванням різних видів декоративних рельєфів на фігурних поверхнях виробів.

Активне управління процесами вібраційного накатування й обкочування створює необхідні умови для керування параметрами шорсткості й фізико-механічних якостей поверхні й поверхневих шарів, тобто створює практичні можливості покращання експлуатаційних якостей поверхонь деталей.

УДАРНО-ВІБРАЦІЙНІ СПОСОБИ ЗМІЦНЕННЯ

5.1. Дробоструминне зміцнення

У сучасному машинобудуванні широко застосовуються пневмодробоструминні (ПДУ) або дробометальні (ДМУ) установки для очищення й зміцнення поверхонь деталей та інструмента.

За допомогою пневмодробоструминних і дробометальних процесів можна очищати й зміцнювати деталі практично будь-якої геометричної форми, жорсткі, і при цьому не потрібна їх орієнтація в просторі. Введення в дробоударне зміцнення МОР і розробка методу гідродробоударного (ГДУ) зміцнення дозволяє зробити процес більш тонкорегульованим і стабільним. Дробоструминне зміцнення легко піддається автоматизації.

В промисловості із дробометальних установок найбільш відома установка ДУ-1.

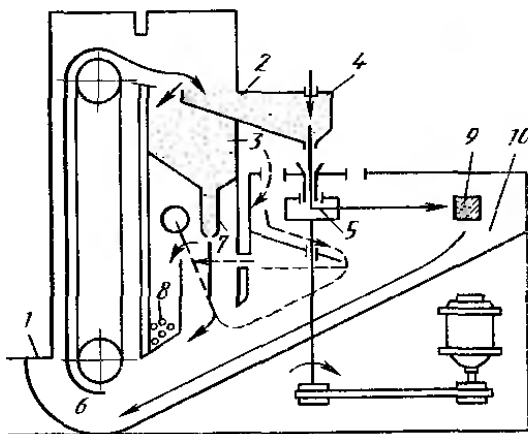


Рис. 5.1.1. Схема дробометальної установки

Ця установка використовується для зміцнення наклепом багатьох деталей, у тому числі спіральних пружин, півосей заднього моста тролейбуса, насосів, нафтових штанг, прошивних пуансонів гарячого штампування. В основу установки ДУ-1 покладений механічний принцип розкиду дробу ротором з вертикальним розташуванням осі його обертання. Подача дробу й очищення його від осколків автоматизовані.

Установка ДУ-1 складається із трьох основних частин: робочої камери, сепаратора й елеватора. Дріб засипається в завантажувальний бункер елеватора, потім піднімається елеватором у бункер живильного пристрою ротора, з якого він попадає через дросель на лопатки ротора, які надають дробу швидкість до 70 м/с. Деталі, що поміщають у потік дробу, зміцнюються. Відпрацьований дріб падає в нижній збірник елеватора. У процесі вільного падіння дріб зустрічається з потоком повітря і частки дробу малої маси попадають в бункер відходів.

Недоліками цього методу зміцнення є нагрівання поверхні деталі через удари твердого дробу, який переміщується із великою швидкістю. Невисока щільність і рівномірність потоку дробу відбивається на однорідності зміцнення. Деякою мірою ці недоліки усунуті в нових установках дробометального типу, що здійснюють зміцнення мікрокульками (УМК) діаметром 0,1–0,2 мм. Мікрокульки подаються зверху у внутрішню порожнину вала роторного колеса й розкидаються щільним потоком через радіальні отвори або щілини зі швидкістю 40–100 м/с. Застосування мікрокульок замість дробу дозволяє більш тонко регулювати ступінь зміцнення у важкодоступних місцях, наприклад у западинах зубів.

Для обробки складних і внутрішніх поверхонь використовується пневмодробоструминна установка. Стиснене повітря під тиском 0,4–0,6 МПа проходить через регулюючу апаратуру до форсунки. При такому русі повітря в трубопроводі створюється розрідження, завдяки якому дробинки з конусного бункера по трубопроводу затягаються в струмінь стисненого повітря, і, розганяючись цим струменем через форсунку вилітають у зону розміщення оброблюваної деталі. Внутрішня порожнина камери і всі деталі, на які попадає дріб для продовження строку їхньої служби, обклеюють або гумують гумою. Дана установка, як і інші установки, що працюють на сухому дробі, вимагає надійної вентиляції.

Очищення й зміцнення великих і важких деталей в умовах важкого машинобудування виконуються в дробоструминних камерах форсункою, якою управляє оператор або спеціальний пристрій.

Деформуючим елементом на пневмодробоструминних дробометальних установках є звичайно дріб. Його класифікують за типом матеріалу – чавунний, сталевий, скляний; за методом виготовлення – литий, рубаний із дроту, кульки від підшипників; за діаметром – від 0,025 до 4–5 мм; за точністю – допуск від 0,4 (для дробу) до 0,02 мм (для кульок від підшипників); за геометрією – довільна для литого дробу і правильної форми для кульок. Для зміцнення кольорових сплавів рекомендується застосовувати алюмінієвий або скляний дріб.

Чим вище динамічна міцність, однорідність за розмірами і твердість дробу, тим кращі його технологічні властивості. Якість дробу звичайно

характеризується його динамічною міцністю, тобто здатністю витримувати удари об оброблювану поверхню не руйнуючись.

Практика роботи показує, що витрата сталевого дробу в 30–60 разів менша, ніж чавунного, і незважаючи на те, що сталевий дріб дорожче чавунного у 4–5 разів, витрати на сталевий дріб в 8–10 разів менше, ніж на чавунний. Максимальна швидкість чавунного дробу лімітується його міцністю й звичайно не перевищує 90 м/с. Застосування сталевого дробу дозволяє збільшувати швидкість в 1,5–2 рази в порівнянні зі швидкістю чавунного.

У практиці застосовують дріб діаметром 0,4–2,0 мм. Чим менше діаметр дробу, тим нижче шорсткість обробленої поверхні.

При зміцненні деталей з концентраторами напруг на робочій поверхні кращі результати виходять при обробці дробом, радіус якого відмінний від радіуса концентраторів напруг типу проточок або канавок. При невеликих концентраторах напруг застосовують дріб з радіусом більше радіуса концентратора напруг. У цьому випадку зона впливу концентратора напруг не виходить за межі глибини зміцненого шару. Якщо концентратор напруг глибокий, варто застосовувати дрібний дріб з радіусом менше радіуса концентратора напруг.

Сталевий й чавунний дріб мають значне розсіювання розмірів форми й твердості, що значно впливає на якість поверхні. Цих недоліків позбавлений спосіб гідродробоударного зміцнення: у робочу суспензію входять стандартні сталеві кульки зі стабільними параметрами (рис. 5.1.2).

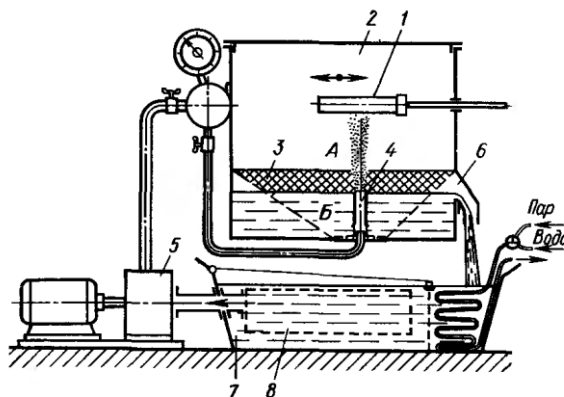


Рис. 5.1.2. Установа гідродробоударного зміцнення

У якості МОР рекомендується мінеральне трансформаторне масло, що нетоксичне, незначно змінює свої характеристики при зміні температури, порівняно дешево. Крім нього можна також застосовувати мастило «Індустріальне-12».

Гідродрободарне зміцнення виконується на гідравлічних дрободарних установках ежекторного типу з одно- або багатоканальними форсунками. Установка складається з робочої камери із двома порожнинами А і Б, розділеними сіткою 3, сопел-ежекторів 4. Мастило із порожнини Б подається насосом до кожної форсунки через колектор. Потік мастила з кульками зміцнює деталь 1.

Параметри насоса і його привода – силового агрегату – визначаються продуктивністю установки та її призначенням.

Розділова сітка 3 створює порожнину для розміщення кульок, є елементом сепаратора, що забезпечує видалення часток менше мінімального діаметра кульок з порожнини камери в бак за рахунок протікання через неї рідини й постійного переміщення дробу.

Висока стабільність режиму зміцнення забезпечується за рахунок підтримки постійного тиску рідини ($\pm 0,005$ МПа), розсіювання розмірів кульок до 5% і часу зміцнення. Стійкість кульок підшипників при роботі із трансформаторним мастилом у тисячі разів вища, ніж у звичайного дробу при пневмодробоструминній обробці.

Для будь-яких способів дробоструминної обробки на ступінь зміцнення впливають швидкість дробу при зустрічі з оброблюваною поверхнею; розмір, якість і витрати дробу; тривалість обробки; напрямок потоку дробу – кут атаки; щільність потоку дробу, відстань оброблюваної поверхні від місця вильоту дробу й фізико-механічних властивостей металу оброблюваної деталі. Шорсткість поверхні до обробки дробом майже не впливає на ефективність зміцнення й звичайно не контролюється. Від перерахованих технологічних факторів залежать шорсткість поверхні, глибина зміцнення й залишкові напруги.

Дробоструминне зміцнення дуже зручне для обробки деталей і інструмента складної конфігурації. Практично при цій обробці розміри деталей не змінюються й залишаються в межах поля допуску.

При пневмодробоструминній обробці шорсткість поверхні залежить від режимів обробки, якості дробу й вихідного стану поверхні. Топографія зміцненої поверхні характеризується сполученням слідів механічної обробки й численних дрібних лунок, що утворюються від ударів дробинок, а також окремих рисок, викликаних впливом на поверхню розколотих дробинок з гострими кромками. При цьому профіль мікронерівностей, що утворюється, стає більш пологим з відносно великим радіусом виступів і западин, він краще втримує масло, однак наявні ризики можуть бути концентраторами напруг.

Погіршення мікрогеометрії через утворення лунок найбільш помітне при низькій вихідній шорсткості, $Ra=0,16\dots 0,30$ мкм, і часу наклепу елемента поверхні 1–2 хвилини. При більш тривалому деформуванні ПДУ шорсткість поверхні трохи зменшується, але не досягає вихідного

значення. При підвищеній вихідній шорсткості ($Ra=0,42...0,85$ мкм) обробка дробом трохи знижує шорсткість. Обробка ДМУ, як правило, підвищує шорсткість поверхні й стає помітним її окислювання, викликане розігрівом.

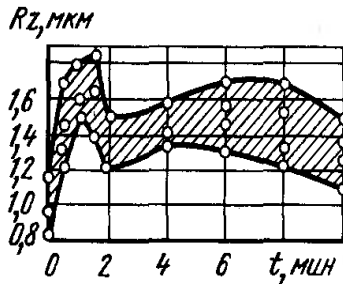


Рис. 5.1.3. Залежність шорсткості Rz поверхні від часу t

На відміну від всіх способів зміцнення сухим дробом, спосіб ГДУ дозволяє для ряду сталей одержати зниження вихідної шорсткості. Це пояснюється використанням більш якісного деформуючого тіла – полірованих куль однакового діаметра, що летять із високою швидкістю в середовищі мінерального мастила. Однак установлено, що на установках ГДУ на зразках, що мають малу шорсткість вихідної поверхні при часі зміцнення менше 2 хв, збільшуються мікронерівності. Це пояснюється тим, що спочатку кульки, ударяючи поверхню, накладають на неї свої розрізнені відбитки. Зі збільшенням часу зміцнення відбитки накладаються, що призводить до зниження глибини кожного з них і, отже, до зниження висоти нерівностей. У деталей з великою вихідною шорсткістю зниження висоти нерівностей спостерігається на самому початку зміцнення. Пояснюється це тим, що зменшується висота нерівностей, і енергія удару повністю йде на деформування, не поширюючись углиб металу. Надалі поява окремих лунок на поверхні із уже деформованими нерівностями призводить до деякого підвищення шорсткості. Найбільш доцільний час зміцнення з метою одержання мінімальної висоти нерівностей перебуває в межах 3–6 хв. Подальше збільшення часу зміцнення не знижує висоту нерівностей.

Всі способи дробоструминного зміцнення на оптимальних режимах підвищують мікротвердість поверхні й створюють у поверхневому шарі стискаючі залишкові напруги.

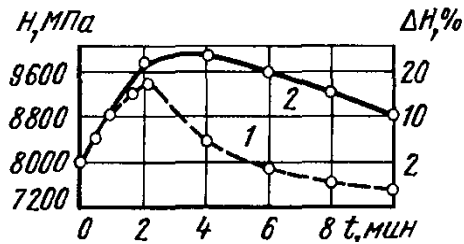


Рис. 5.1.4. Вплив часу обробки t на мікротвердість H і ступінь зміцнення ΔH :

1 – твердість поверхні; 2 – твердість зміцненого шару

Після шліфування в поверхневому шарі спостерігаються залишкові напруги розтягу, максимальна величина яких +320 МПа, розташована на глибині залягання 0,05 мм. ДМУ й ГДУ обробки створюють у поверхневому шарі близькі за величиною й глибиною залягання стискаючі залишкові напруги. Однак слід зазначити, що ГДУ дозволяє одержати більш високі значення залишкових напруг на поверхні. При відповідному підборі режимів зміцнення способом ГДУ можна домогтися зсуву максимуму залишкових напруг на поверхню деталі.

При ПДУ й ГДУ зі збільшенням розміру дробу й зниженням швидкості деформування зростає глибина проникнення максимальних залишкових напруг і їхнє зменшення у поверхні металу.

Максимальний ступінь зміцнення визначається не стільки способом дробоструминного зміцнення, скільки властивостями оброблюваного матеріалу. Спосіб зміцнення переважно впливає на глибину розповсюдження максимальних залишкових напруг і їх величину в поверхні. Значно впливає на характер розподілу залишкових напруг (глибину й ступінь зміцнення) діаметр дробу й швидкість його польоту.

При пневмодробоструминній і гідродробоударній обробках діаметр і швидкість дробу й створювані ним сили удару, а також максимальні напруги в зоні контакту приблизно однакові, що обумовлює практично ідентичний характер зміни твердості в зміцненому шарі. Твердість поверхні збільшується приблизно на 12% і спостерігається у шарі глибиною 0,15–0,17 мм. При зміцненні мікрокульками, діаметр яких у кілька разів менше, ніж дробу, глибина зміцнення мала. Глибина підвищеної твердості становить 0,02–0,03 мм і має високий градієнт зміни. Високі напруги у зоні контакту, у кілька разів перевищуючи границю текучості цементованого шару, створюють можливість перенапруги тонких приповерхніх шарів.

Величина питомої кінетичної енергії дробу впливає на час, необхідний для досягнення найбільшої твердості на поверхні.

Кінетична енергія дробу, при якій забезпечується найбільший приріст твердості на поверхні, приблизно однакова для різних способів і становить 80 кДж/м^2 .

Для того самого способу зміцнення, наприклад ПДУ, характер зміни твердості по глибині поверхневого шару залежить від часу обробки. При збільшенні часу зміцнення елемента поверхні від 1 до 4 хв (E від 20 до 80 кДж/м^2) твердість підвищується і є максимальною на поверхні. Обробка понад 4 хвилин знижує рівень зміцнення.

Найбільшу твердість поверхні й практично граничну глибину зміцнення забезпечує обробка дробом поверхні протягом 4 хвилин при $E=80 \text{ кДж/м}^2$. Більш тривалий час пластичного деформування викликає незначне збільшення глибини зміцненого шару. Деформаційне зміцнення супроводжується також зміною всього комплексу механічних властивостей, підвищенням характеристик міцності при зниженні показників пластичності.

Створення стискаючих залишкових напруг дробоструминним методом можливе й у твердих сплавах. Залишкові напруги першого роду, що виникають у результаті обробки твердих сплавів поверхневим пластичним деформуванням, впливають на їхню міцність. Дослідження на контрольних пластинках зі сплаву Т15К6 показали, що в результаті обробки дробом у поверхневому шарі твердого сплаву з'являються значні стискаючі залишкові напруги, які поширюються на глибину близько 0,1 мм.

Більш точні рентгенографічні дослідження тонких поверхневих структур твердих сплавів ВК8 і ВК20, оброблених чавунним колотим дробом діаметром 0,5 мм протягом 2 хв, показали, що глибина шару зі зміненими мікронапругами становить приблизно 0,25 мм. У кобальті напруги розтягу, які виникають при спіканні твердого сплаву, поступають місцем стискаючим напругам порядку 400 МПа. У карбіді вольфраму величина вихідних стискаючих напруг різко збільшується й досягає приблизно 1200 МПа. У результаті обробки відбувається дроблення блоків і збільшення мікронапруг як у кобальті, так і в карбіді вольфраму. Дроблення блоків поширюється на глибину 0,18 мм, а мікронапруги – на глибину 0,22 мм.

При різанні металу твердосплавним інструментом руйнування різальної частини інструмента починається на передній поверхні під дією напруг розтягу. Тріщина зароджується в кобальті, де з'являються залишкові напруги розтягу. При обробці дробом напруги розтягу у кобальті замінюються стискаючими, що перешкоджає виникненню тріщини; збільшення стискаючих напруг у карбідах утрудняє подальше поширення тріщини. У ході зміцнення потоком дробу твердий сплав не тільки деформується, але й стирається. Знімання твердого сплаву

відбувається головним чином на ділянках різальних кромки. Протягом перших 0,5 хвилин обробки радіус округлення різального клина збільшується з 10 до 30 мкм, а через 2 і 6 хв він збільшується відповідно до 43 і 53 мкм. Радіус округлення збільшується з ростом тиску повітря й зменшенням відстані від сопла інструмента. Після дробоструминної обробки на поверхні твердого сплаву з'являються дрібні западини – кратери, ці кратери – результати вдавнення дробу у твердий сплав і частково виривання й відламування окремих зерен. Однак при інтенсифікації процесу обробки, особливо при збільшенні розміру дробу, з'являються кратери значної величини, які можуть бути результатом тільки виривання окремих часток твердого сплаву, макровикривування в першу чергу. Для запобігання цих явищ розмір дробинки не повинен перевищувати 0,6 мм. У міру збільшення вмісту титана у твердому сплаві варто застосовувати менш інтенсивні режими зміцнення або зменшувати час зміцнення. Зміцнювати двофазні сплави типу Т30К4 не рекомендується. Зі зменшенням кількості кобальту у твердих сплавах, так само як зі збільшенням титана, зменшується можливість їхнього пластичного деформування, росте чутливість твердого сплаву до концентрації напруг. Тому при зміцненні повинні застосовуватися більш м'які режими.

При виготовленні деталей із високоміцних сталей можуть з'являтися припіки. Глибина шару із припіками при глибині шліфування 0,03; 0,06 і 0,09 мм становила відповідно 20–40; 50–80 і 120–180 мкм. Верхні значення відносяться до сталі 12Х2Н4А, нижні – до теплостійких сталей 12Х2НВФА й 20Х3МВФ-Ш.

Зменшення міцності поверхневого шару відбувається у шарі металу глибиною 60–80 мкм, що характерно для чорного шліфування. Для відновлення твердості поверхневого шару необхідна обробка дробом протягом 3 хв. При обробці дробом протягом 4 хв підвищена твердість створюється на всій глибині відпущеного шару. Для припіків глибиною 120 мкм і більше, зміцнення дробом малоефективне. Збільшувати час обробки понад 4 хв недоцільно, тому що це викликає зменшення міцності ділянок поверхні з нешкодливою при шліфуванні структурою.

У результаті зміцнення поверхневого шару й поліпшення форми мікрорельєфу після всіх способів дробоструминної обробки, і особливо після гідродробоструминної, знижується інтенсивність зношування деталей машин.

Установлено, що після ДМУ деталей з високоміцного чавуну з кулястим графітом твердість поверхні збільшилася на 36%, границя витривалості – на 15% , глибина зміцнення 0,6 мм. Приблизно така ж величина зміцнення при зміцненні дробом литої сталі, а також середньоміцних сталей. Значно підвищується міцність деталей, які мають

концентратори напруг. Так, міцність деталей зі зміцненим шаром 0,6 мм і концентраторами напруг у вигляді надрізу глибиною 0,8 мм у результаті дробоструминного зміцнення підвищилася на 50%. Це пояснюється дією залишкових напруг стиску, що концентруються по дну надрізу. Зона руйнувань для гладких зміцнених зразків звичайно розташовується під зміцненим шаром.

Способи ДМУ й ГДУ істотно впливають на підвищення малоциклової ударної міцності високоміцної загартованої сталі 35ХН2МФА-Ш. Ці способи дробоударного зміцнення значно підвищують довговічність високоміцної сталі 35ХН2МФА-Ш, причому ГДУ ефективніше ДМУ у всьому діапазоні циклічних напруг у зв'язку з тим, що на деталях, оброблених цим способом відбувається більш пізнє утворення початкової макротріщини ніж на деталях, оброблених ДМУ. Границя витривалості зразків з різних сталей і кольорових сплавів, зміцнених методом ГДУ, підвищується на 20–90%, а довговічність – на 450–900%.

Контактна витривалість цементованих сталей 12Х2Н4А і 12Х2НВФА підвищується тільки при одному раціональному режимі ГДУ: $t = 2$ хв, $E = 40$ кДж/м². Мікротвердість і величина залишкових напруг зростають у міру збільшення часу обробки дробом і кінетичної енергії дробу й досягають найбільших значень при $t = 4$ хв, $E = 80$ кДж/м². Однак при цьому контактна витривалість знижується в порівнянні з недеформованим станом у 1,5–2 рази. Таким чином, якщо буде потреба підвищення контактної витривалості при деформаційному зміцненні не слід прагнути до одержання найбільшої поверхневої твердості й максимальних залишкових напруг.

Всі способи дробоструминної обробки тією чи іншою мірою поліпшують міцнісні характеристики деталей і збільшують довговічність їхньої роботи в експлуатації. За рахунок дробоструминної обробки азотованих колінчатих валів швидкохідних двигунів межа їхньої витривалості зростає на 60%.

Дробоструминна обробка знижує експлуатаційні поломки виробів із твердого сплаву. Так, у зміцнених різцях у 1,8–2 рази зменшилося число руйнувань і дрібних викришувань. При цьому стійкість збільшилася в 1,13–1,83 рази. Така нестабільність у підвищенні стійкості пояснюється нестабільністю властивостей самих твердосплавних платівок після їхньої напайки на державки інструмента й виникаючими при напайці значними внутрішніми напруженнями у твердому сплаві. Дробоструминну обробку можна рекомендувати тільки для нового інструмента, тобто робити її один раз.

Дробоструминна обробка знаходить застосування для багаторазового підвищення довговічності й надійності зварених вузлів різних машин, які працюють в умовах вібрації. Таке зміцнення рекомендується також для

деталей з кольорових сплавів. Воно попереджає їх розтріскування, що дозволяє у десятки разів підвищити довговічність їх роботи в корозійних середовищах. Обробка кольорових сплавів методом ГДУ виключає перенос на їхню поверхню часточок матеріалу дробу, як це буває у випадку зміцнення сухим дробом.

5.2. Об'ємне віброударне зміцнення

Об'ємне віброударне зміцнення є одним зі способів об'ємної вібраційної обробки (ОВО). Суть останньої у тому, що оброблювані деталі завантажуються разом з робочим наповнювачем у камеру вібраційної машини. Залежно від властивостей наповнювача, що входить до складу робочого середовища, і режимів ОВО можуть виконуватися наступні операції: очищення литих заготовок від формувальних матеріалів; очищення від окалини й корозії; видалення облою на литих і штампованих заготовках з кольорових сплавів, пластмас, гуми; зняття задилок; округлення й полірування гострих кромки; шліфування й полірування з метою зниження шорсткості оброблюваної поверхні; очищення й обробка з метою одержання поверхні під гальванічні і лакофарбові покриття; декоративна обробка; зміцнення поверхневих шарів деталей і різальних інструментів; нанесення на поверхню тонких плівок із захисними властивостями; мийка деталей від забруднень; обробка деталей після певного періоду експлуатації для очищення від нагару й накипу.

Кожна з перерахованих операцій виконується на вібраційних установках. Робочі камери цих машин можуть мати прямокутну, тороїдну або гвинтову форму. Установки з камерою прямокутної форми можуть бути періодичної або безперервної дії зі спрямованим рухом маси від місця завантаження до видачі оброблених деталей. У гвинтових камерах робоче середовище разом з деталями переміщається по гвинтовій лінії. Обсяг робочої камери може досягати 350 л.

Одна із конструкцій віброустановок періодичної дії показана на рис. 5.2.2. Робоча камера 3 прямокутні форми із прикріпленим до неї вібратором 2 установлюється за допомогою чотирьох циліндричних пружин 6 на звареному каркасі.

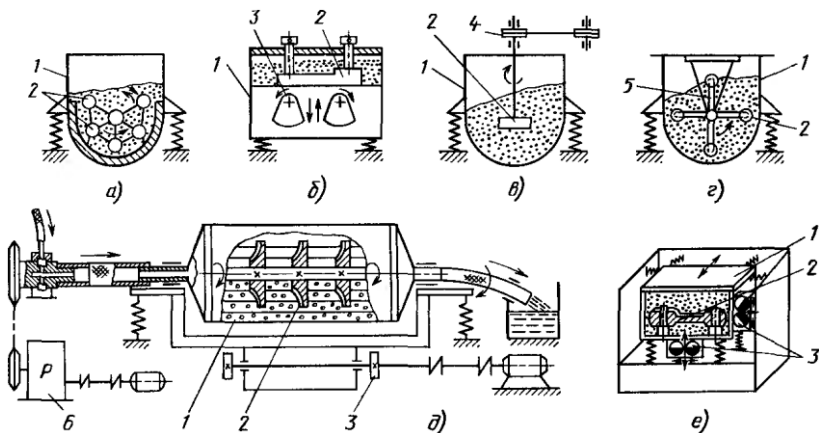


Рис. 5.2.1. Схема обробки деталей:

1 – контейнер; 2 – оброблювані деталі; 3 – вібратор; 4 – привід обертання; 5 – пристрій обертання деталі; 6 – привід обертання контейнера

В установці застосований вібратор з модернізованими дисбалансними вузлами, що дало можливість швидко змінювати амплітуду коливань робочої камери. Для циркуляції робочої рідини установка оснащена баком-відстійником 8 і електронасосом 7. У комплект електроапаратури 5 входить реле часу з діапазоном регулювання 5–180 хв. Установка закрита звукоізоляційним кожухом 4. Ємність робочої камери установки 40 л.

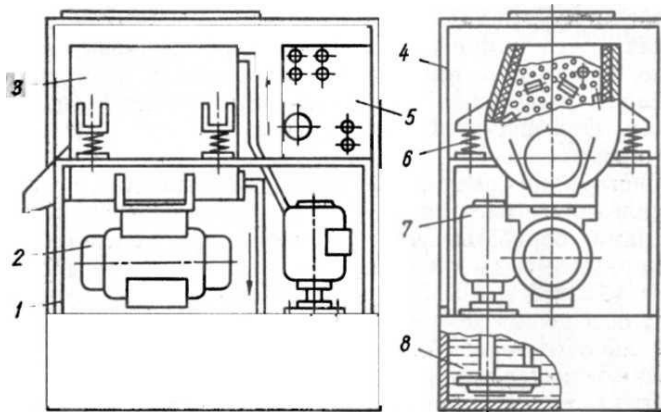


Рис. 5.2.2. Вібраційна установка для об'ємної віброударної обробки

Робоча камера залежно від виду виконуваних робіт, конфігурації й твердості оброблюваних деталей заповнюється за обсягом на 80–85% сумішшю наповнювача з оброблюваними деталями у співвідношенні 2:1 (по масі). Це співвідношення збільшується до 5:1, якщо потрібна висока чистота поверхні або деталь має дуже складну форму і малу жорсткість. При обробці деталей досить малої жорсткості й з великою площею поверхні це співвідношення збільшується до 20:1 і більше.

У робочу камеру оброблювані деталі вагою до 3–5 кг завантажуються навалом. Вони вільно перемішуються з наповнювачем. У тих випадках, коли конструкція деталей не допускає такого завантаження, деталі можуть розташовуватися у камерах або інших спеціальних пристосуваннях. Касети й спеціальні пристосування при цьому кріпляться або в робочій камері, або до станини вібромашини. При обробці внутрішніх порожнин великих корпусних деталей їх устанавлюють прямо на платформі вібромашини. В цьому випадку сама деталь виконує роль робочої камери, і її внутрішня порожнина на 70–80% обсягу заповнюється наповнювачем. При наявності в деталі отворів вони закриваються заглушками.

Конструкції спеціальних пристосувань для устанавки й кріплення деталей різноманітні й визначаються формою, розмірами оброблюваних деталей.

У процесі об'ємної віброударної обробки у будь-якому робочому середовищі здійснюється комплексний вплив на оброблювані деталі мікроударів, мікрорізання, стирання, процесу поверхневого пластичного деформування, а також хімічного впливу на поверхню робочого середовища. Ці впливи відбуваються в умовах інтенсивно спрямованого перемішування робочого середовища й оброблюваних деталей, що забезпечує їх різну орієнтацію відносно напрямку нанесення мікроударів і змінних прискорень. Динамічний характер протікання процесу супроводжується виникненням у деталях змінних напруг і деформацій та створює умови для зміни напруженого стану матеріалу деталі шляхом зняття, вирівнювання або створення оптимальних залишкових напруг поверхневого шару.

Відсутність твердого зв'язку з робочим середовищем забезпечує рівномірну обробку всієї поверхні та обробку різних деталей простої і складної форми, а перемішування й «плинність» робочого середовища створюють умови для ефективного застосування процесу при обробці кромки, задирки і облою. Сполучення послідовного нанесення безлічі мікроударів та інтенсивного перемішування робочого середовища й оброблюваних деталей при різній їх взаємній орієнтації, залежно від характеристики й складу робочого середовища й режимів коливальних створює умови для виконання очисних, фінішних і операцій зміцнення.

При роботі з будь-якими наповнювачами в результаті комплексного впливу об'ємної вібраційної обробки на оброблювані деталі поліпшується якість їхніх поверхонь – вони мають меншу шорсткість, згладжуються гострі кромки, підвищуються фізико-механічні характеристики поверхневих шарів. В останні роки розширюється застосування сталевих загартованих куль із метою створення в поверхневих шарах значного зміцнення.

На продуктивність, шорсткість обробленої поверхні, ступінь і глибину зміцнення, величину й характер розподілу залишкових напруг впливає ряд факторів і в першу чергу: амплітуда, частота й траєкторія коливань, об'ємне співвідношення наповнювача й деталей, характеристики й розміри гранул наповнювача, маса й розміри оброблюваних деталей, склад і кількість робочої рідини, спосіб завантаження або установки оброблюваних деталей, характер їхнього руху. При обробці деталей типу тіл обертання з метою підвищення продуктивності їх додатково обертають або створюють умови можливого обертання за рахунок вібрації й енергії часток наповнювача.

На вибір амплітуди й частоти коливань у першу чергу впливають: форма й жорсткість оброблюваних виробів, фізико-механічні властивості матеріалу, технічні вимоги до виробу.

Обробка жорстких деталей з шорсткістю оброблюваних поверхонь $Rz = 6,3$ мкм виконується при амплітуді 3–5 мм із частотою 25–20 с^{-1} .

Операції по шліфуванню й поліруванню деталей із шорсткістю поверхні нижче 6,3 мкм, а також деталей складного профілю й малої жорсткості виконуються при амплітуді 1–3 мм із частотою 40–25 с^{-1} . Амплітуди коливань, які рекомендуються в залежності від вихідної й необхідної шорсткості оброблюваної поверхні й матеріалу наведені у табл. 5.2.1.

Таблиця 5.2.1

Амплітуди коливань

| Шорсткість поверхні Ra , мкм | | Кольоровий сплав | Титановий сплав | Сталь незагартована | Сталь загартована й жароміцний сплав |
|--------------------------------|-----------|------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|
| вихідна | необхідна | Амплітуда, мм | | | |
| 20–5 | 5–1,25 | 2,0–3,0 | 2,5–3,0 | 3,0–4,0 | 4,5–5,5 |
| 5–1,25 | 1,25–0,32 | 1,5–2,0 | 2,0–2,5 | 2,5–3,0 | 3,5–4,5 |
| 1,25–0,32 | до 0,08 | 1,0–2,0 | 1,5–2,0 | 2,0–2,5 | 2,5–3,5 |

Цим способом можна витримувати розміри деталей у межах 6–9 квалітетів точності й одержувати шорсткість поверхні $Ra = 0,16–0,02$ мкм.

Крім того, об'ємна вібраційна обробка дозволяє в 1,5–2 рази підвищити міцність деталей при знакозмінних навантаженнях. Це пояснюється не тільки зменшенням висоти мікронерівностей і створенням на обробленій поверхні ненаправлених рисок, але також частковим або повним зняттям залишкових напруг розтягу. Зняття залишкових напруг розтягу здійснюється при м'яких режимах об'ємної вібраційної обробки, тобто з амплітудою не більше 2 мм абразивними гранулами на м'яких вулканітовій або керамічній зв'язках, а також за рахунок переважно руху ковзання часток робочого наповнювача при куті зустрічі часток з поверхнею до 30°.

Залишкові напруги стиску виникають при нанесенні мікроударів на оброблювану поверхню частотою 30–36 с⁻¹ з амплітудою 3–6 мм, куті зустрічі абразивних часток з поверхнею деталі більше 75°. У момент мікроудару на абразивні гранули передається кінетична енергія великої кількості гранул, що лежать на лінії дії прискорення, за рахунок чого вершини площадок часток наповнювача, що перебувають у контакті з поверхнею деталі, розвивають контактне зусилля, достатнє для занурювання їх у поверхню деталі й пластичне деформування навіть у термічно оброблених деталях. У результаті цього в поверхневих шарах виникають залишкові напруги стиску, величина й глибина залягання яких залежить від режимів обробки, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, складу робочого середовища й інших факторів.

При обробці деталей із загартованої сталі з вихідними напругами розтягу утворення стискаючих напруг відбувається в шарі 5–20 мкм, а величина їх трохи вище, ніж при обробці деталей із незагартованої сталі.

Зі збільшенням тривалості обробки до певного значення спостерігається ріст абсолютної величини виникаючих напруг стиску; при подальшій обробці відбувається їх деякий спад.

Оптимальне значення частоти коливань лежить у межах 15–35 с⁻¹, що забезпечує для даних умов найбільшу зміну залишкових напруг. Зі збільшенням амплітуди коливань, твердості й маси часток робочого середовища відбувається більш інтенсивна зміна залишкових напруг і ріст абсолютної величини стискаючих напруг. Максимальне зміцнення поверхні досягається при куті зустрічі поверхні деталі з напрямком руху куль, рівним 90°.

При вібраційній обробці відбувається вирівнювання мікронапруг другого роду й підвищується мікротвердість поверхневого шару оброблюваних деталей. Зокрема, при обробці відпаленої сталі збільшення мікротвердості досягає 50–70% на глибині 100–150 мкм.

При застосуванні як наповнювач робочого середовища сталевих куль їхня взаємодія з оброблюваними деталями багато в чому визначається властивостями останніх. Так, якщо обробці піддаються незагартовані

сталеві деталі, то на їхній поверхні чітко спостерігаються круглі й овальні відбитки, залишені сталевими кулями робочого середовища, що свідчить про протікання в зоні контакту значної пластичної деформації. У подібних умовах на сталевих, загартованих до твердості більше 60HRC деталях відбитків куль не спостерігається, але наслідки віброударної обробки (ОВУ) позначаються на зміні властивостей поверхневого шару. Ця зміна залежить від вихідної шорсткості поверхні.

Вихідна мікрогеометрія шліфованої поверхні за інших рівних умов визначає кінцеві результати зміцнення. Поверхні з меншою шорсткістю одержують менший приріст мікротвердості, вона залягала на меншій глибині в порівнянні зі зразками, що мають вихідну більшу шорсткість. Це пояснюється тим, що поверхня з більшою вихідною шорсткістю має більше число пластично деформованих виступів, що приводить до рівномірного зміцнення поверхневого шару матеріалу з утворенням суцільних пластично деформованих площадок. У випадку ж поверхні з малою шорсткістю контактування носить переважно пружний характер, що приводить до пластичного деформування лише окремих мікровиступів і обумовлює нерівномірність і незначність зміцнення поверхні в цілому. ОВУ помітно згладжує мікрорельєф оброблених поверхонь. Відбувається збільшення середніх радіусів кривизни нерівностей, середнього кроку нерівностей S_m , зменшення середнього кута нахилу мікронерівностей. Разом з тим встановлено, що твердість поверхні для зразків з вихідним параметром шорсткості $Ra = 0,4$ мкм за 40 хв вібраційного зміцнення збільшилася на 50%, у той час як твердість поверхні з $Ra = 0,16$ мкм за той же час обробки зросла на 10%.

Таким чином, у процесі віброударної обробки відбувається вирівнювання мікрогеометричних і контактних характеристик поверхонь, що мають різну вихідну шорсткість. Однак таке вирівнювання мікрогеометрії поверхонь не означає вирівнювання їхніх фізико-механічних властивостей, тому що рельєф поверхні з більшою вихідною шорсткістю створювався при більшій енергії пластичної деформації, яка привела до зміцнення поверхневого шару. Установлено також, що для матеріалу з вихідною шорсткістю $Ra = 0,16$ мкм збільшення тривалості обробки не приводить до виникнення рівномірного й досить глибокого зміцненого шару й викликає лише перенапругу найбільш гострих і високих виступів шорсткості поверхні. При обробці деталей 60 хв і більше мікрогеометрія й контактні характеристики поверхонь істотно не змінюються у зв'язку з тим, що поверхня матеріалу набуває підвищену твердість і контакт робочого тіла з мікровиступами оброблюваної поверхні носить пружний характер.

Крім вихідної шорсткості на результати обробки ОВУ впливає характер попередньої операції. Так, зубчасті колеса зі сталі 18ХН24ВА, оброблені

шліфуванням і шевінгуванням, піддавалися об'ємному віброударному зміцненню з амплітудою коливань 6 мм. При цьому частки наповнювача виконували рух за об'ємною траєкторією, яка змінюється за часом, чим забезпечувалася рівномірна обробка поверхонь зубів. Наповнювачем була суміш із металевих кульок діаметром 2–3 мм, абразивної пасти й розчинника.

В обох випадках застосування ОВУ знизило вихідну шорсткість. Воно дозволило видалити гострі кромки радіусом до 0,2 мкм як на торцях зубів, так і по ширині вінця. Відхилення кроку зачеплення практично не змінилося в ході ОВУ, межа згинної витривалості підвищилась на 14% для шліфованих і на 20% для шевінгованих коліс.

У ряді випадків для поліпшення якості зубів замість металевих кульок вводиться абразивний порошок. Швидкість обертання шестерень у ванні з гідроабразивом, що складається із суміші електрокорунда з водою з добавкою нітриду натрію, дорівнює 10–12 м/с. Час обробки – по 2 хв в одну й іншу сторони. При обертанні надається додатковий зворотно-поступальний рух зі швидкістю 0,02–0,03 м/с. При цьому геометричні параметри не міняються, однак відбувається фланкування на 15–18 мкм у вершини зуба. Гідроабразивний метод обробки позитивно позначається на плавності зачеплення, він знижує рівень шуму, доцільний після термообробки, при цьому знімається окалина.

Об'ємна віброударна обробка сполучає в собі не тільки процеси механічного впливу на оброблювану поверхню, але й можливість одночасного нанесення на неї зносостійкого або антикорозійного покриття, що додатково поліпшує експлуатаційні якості поверхні. Як наповнювач застосовуються загартовані й поліровані сталеві кульки діаметром 5–9 мм із додаванням порошку MoS_2 із розрахунку 10 г на 1 л обсягу сталевих кульок. Обробка ведеться з амплітудою 1,5–2,5 мм при частоті 25–35 с⁻¹. Тривалість обробки 90–120 хв. Після обробки деталей сушаться при температурі 120–150°C 30–40 хв, що сприяє закріпленню плівки, що утворюється на поверхні. Нанесення плівки дисульфата молібдену на поверхню в процесі об'ємної віброударної обробки дозволяє одержувати стійкі покриття, зносостійкість яких в 5–7 разів вища, ніж плівок, нанесених будь-яким іншим способом.

5.3. Ударно-відцентрові способи обробки

Сутність планетарного ударно-відцентрового способу полягає в тому, що заповнені на 30–50% обсягу загартованими кульками зі сталі ШХ15 барабани відцентрово-планетарної машини з деталями, обертаються

навколо центральної осі планшайби й навколо власних осей. Напрямок цих обертань протилежний. Попередньо знежирені деталі завантажуються в барабани, 3/4 обсягу яких займає наповнювач із загартованих полірованих кульок діаметром 1–2 мм і водяного розчину триетаноламіна й рідкого скла. Час обробки деталей становить 60 хв.

В результаті такої обробки деталей шорсткість знижується з $Rz = 1,9...1,7$ мкм до $Rz = 1,3...1,2$ мкм, твердість підвищується з 320HV до 850HV, стійкість зростає в 1,5–4 рази.

Якщо при об'ємному віброударному зміцненні удар створюється від інтенсивного перемішування куль або інших наповнювачів при вібрації робочої камери, то при відцентровій ударно-зміцнюючій обробці куля завдає удару завдяки відцентровій силі, що виникає при обертанні ротора, у гніздах якого вільно переміщуються кулі або роликів.

Існує кілька конструкцій пристрою для надання кулям великої енергії удару (рис. 5.3.1).

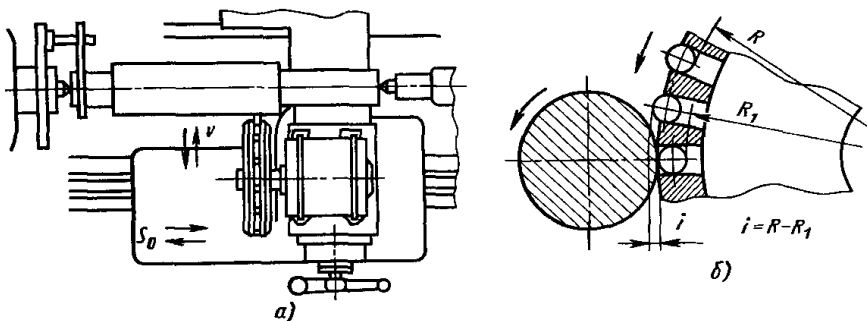


Рис. 5.3.1. Схема відцентрового методу обробки:
а – схема розташування; б – зона обробки

У цій конструкції сепаратор має отвори в роторі, що є гніздами під кулі.

Установка ротора на циліндрі дозволяє сприймати перевантаження, що виникають при випадкових ударах ротора по нерівностям поверхні. Пристрій встановлюють на оброблювану поверхню, включають привід, який через піввісь приводить в обертання ротор.

Пристрої для ударно-відцентрового зміцнення можуть застосовуватися для зміцнення не тільки площини, але й циліндричних зовнішніх і внутрішніх, а також переривчастих поверхонь. Цим способом можна обробляти й фасонні поверхні із застосуванням копіра.

Параметри ударно-відцентрової обробки поверхонь кульками наведені у таблиці 5.3.1.

При виборі режимів необхідно виходити з умови одержання для даного металу максимально можливих мікротвердості, глибини зміцненого шару, залишкових напруг стиску й мінімальної шорсткості. При цьому для зміцнення кольорових металів і їхніх сплавів потрібно приблизно в 2 рази менша сила удару кулі, ніж для зміцнення конструкційних сталей.

Таблиця 5.3.1

Параметри ударно-відцентрової обробки

| Оброблюваний матеріал | Колова швидкість, м/с | | Подача, мм/об | Натяг, мм | Число проходів |
|-----------------------|-----------------------|---------|---------------|-----------|----------------|
| | ротора | деталі | | | |
| Сталь | 15–40 | 0,5–1,5 | 0,04–0,16 | 0,1–0,25 | 2–3 |
| Чавун | 15–20 | 0,5–1,0 | 0,08–0,10 | 0,1–0,2 | 2 |
| Бронза, латунь | 8–15 | 0,5–1,0 | 0,02–0,20 | 0,05–0,1 | 1–2 |
| Дуралюміній | 9–13 | 0,1–0,5 | 0,02–0,15 | 0,01–0,15 | 1–2 |

Перед ударною обробкою поверхні необхідно знежирити, а також видалити з них сліди корозії, інакше на обробленій поверхні будуть помітні темні плями. Після цієї обробки практично не міняється розмір деталі він залишається в межах допуску на виготовлення. Шорсткість вихідної поверхні впливає на ступінь зміцнення. Для одержання максимально твердого поверхневого шару оброблювана поверхня повинна мати можливо меншу шорсткість та похибки форми круглих заготовок, а відхилення від площинності плоских заготовок не повинно перевищувати 0,04 мм. При зміцненні оброблювану поверхню й ротор з кулями необхідно періодично, через 5–10 хв, змазувати веретенним, вазеліновим або машинним маслом у суміші з 50% гасу.

У результаті ударної зміцнюючої обробки твердість зміцненої поверхні відносно твердості основного металу підвищується при обробці силуміну на 50%, сталі 25 – на 45, чавуну – на 30–60, латуні – на 60%. Глибина зміцнення на м'яких матеріалах може бути в межах 0,8–1,5 мм, а на матеріалах середньої твердості – 0,4–0,8 мм. У поверхневому шарі виникають залишкові напруги стиску порядку 400–800 МПа.

Відцентрова обробка може здійснюватися ударними роликowymi розкатками (рис. 5.3.2).

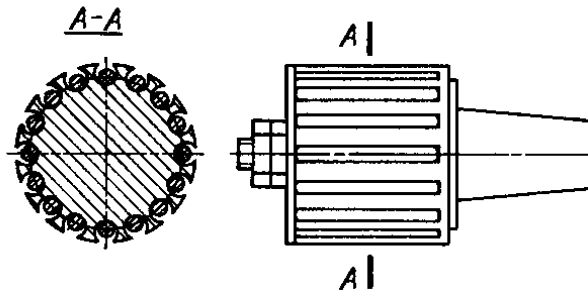


Рис.5.3.2. Роликова розкатка ударної дії

Принцип дії цих розкаток полягає у тому, що деформуючі елементи – циліндричні ролики не перебувають у постійному контакті з оброблюваною поверхнею, а наносять по ній часті удари. При цьому вони працюють зі змінним зусиллям, що змінюється за законом, обумовленим конструктивними параметрами інструмента. У цих розкатках силова дія роликів сполучається з ударною, у результаті чого пластична деформація зростає й вдається досягти низької шорсткості й значного зміцнення поверхневого шару металів навіть при обробці нежорстких деталей. Процес ударного розкатування характеризується високою продуктивністю.

Характер роботи розкатування визначається конструкцією опорної поверхні під ролики. Якщо у звичайних розкатках вона гладка, циліндрична або конічна, то в ударних розкатках опора роликів переривчаста: ролики можуть спиратися на багатогранники або фасонну поверхню типу плавної зубчастої зірочки. Такі переривчасті поверхні утворюються чергуванням западин із циліндричними пасками. У той момент, коли ролик розташований у западині, він не торкається оброблюваної поверхні. При подальшому повороті опори ролик під дією відцентрової сили й скосу западини попадає між циліндричним паском опори й оброблюваною поверхнею отвору й на короткий момент тут заклинюється. Сила удару визначає процес зміцнення. Так, десятироликова розкатка, яка має частоту обертання 1000 хв^{-1} , наносить по заготовці за хвилину 10 000 ударів. Подача таких розкаток при калібруванні отворів у чавунних заготовках дорівнює 20 мм/хв, у сталевих – 30–40 мм/хв.

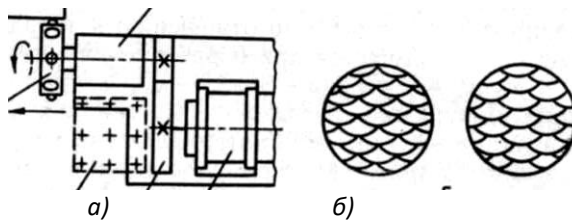


Рис. 5.3.3. Схема установки для утворення регулярного мікрорельєфу ударно-відцентровим способом (а) і типи мікрорельєфів, що утворюються (б)

Для забезпечення шорсткості $Ra = 0,63 \dots 0,15$ мкм попередньою обробкою, наприклад, тонким розточуванням або розгортанням, необхідно створити певну вихідну шорсткість: не вище $Ra = 1,5 \dots 1,75$ мкм на чавуні та $Ra = 2 \dots 2,5$ мкм на сталі. Припуск, що залишають під розкатування отворів у чавунних заготовках, не повинен перевищувати $0,025 \text{--} 0,035$ мм, а в інших – $0,035 \text{--} 0,050$ мм.

Для утворення регулярного мікрорельєфу (РМР) і зміцнення відкритих і порівняно великих по площі поверхонь у ряді випадків застосовується установка, показана на рис. 5.3.3. Як інструмент застосовується багатокульковий накатник, що представляє собою диск, на циліндричній поверхні якого в радіальних гніздах поміщені кулі. Диск установлений на шпинделі, що приводиться в обертання двигуном із частотою обертання до 500 с^{-1} . Вся установка закріплюється в різцетримачі токарного верстату. При обертанні диска кульки, займаючи під дією відцентрових сил радіальне положення найбільше від центра обертання, виступають над циліндричною поверхнею диска. При обробці заготовка й диск одночасно обертаються в одну сторону. Диск переміщається уздовж заготовки. Міжосьова відстань, яка установлюється між диском і заготовкою в робочому положенні, забезпечує перетинання поверхні заготовки траєкторією найбільш виступаючої частини кульок. У такий спосіб створюється «натяг», кульки вдаряють по оброблюваній поверхні, зміцнюючи її й залишаючи сліди у вигляді лунок.

Даний спосіб дозволяє утворити на оброблюваній поверхні регулярний мікрорельєф двох типів: тетрагональний і гексагональний. Одержання того або іншого типу мікрорельєфу визначається ступенем повторюваності нанесення ударів. Змінюючи діаметри кульок і диска накатника, величину «натягу» і частоту обертання накатника, можна регулювати в більш широких межах глибину й ступінь зміцнення. Так, при обробці деталей зі сталі 45, латуні Л59 і міді М2 отримане підвищення мікротвердості сталевих зразків на 50% у порівнянні з вихідною, латунних і мідних – на 60%, що в 1,5–2 рази вище мікротвердості, яку одержуємо

при вібронакатванні. Глибина зміцнення при утворенні регулярного мікрорельєфу ротаційно-ударним способом обробки на поверхнях з однаковими мікрогеометричними параметрами становить 500–1000 мкм, тоді як у вібронакатаних зразках за інших рівних умов вона не перевищує 50 мкм.

Перехід при ротаційно-ударному накатуванні від зворотно-поступального руху до обертального дозволяє в 5–10 разів підвищити продуктивність утворення РМР при однакових параметрах мікрорельєфу.

Перспективним способом зміцнення під дією відцентрових сил є обробка поверхонь механічними щітками (рис. 5.3.4).

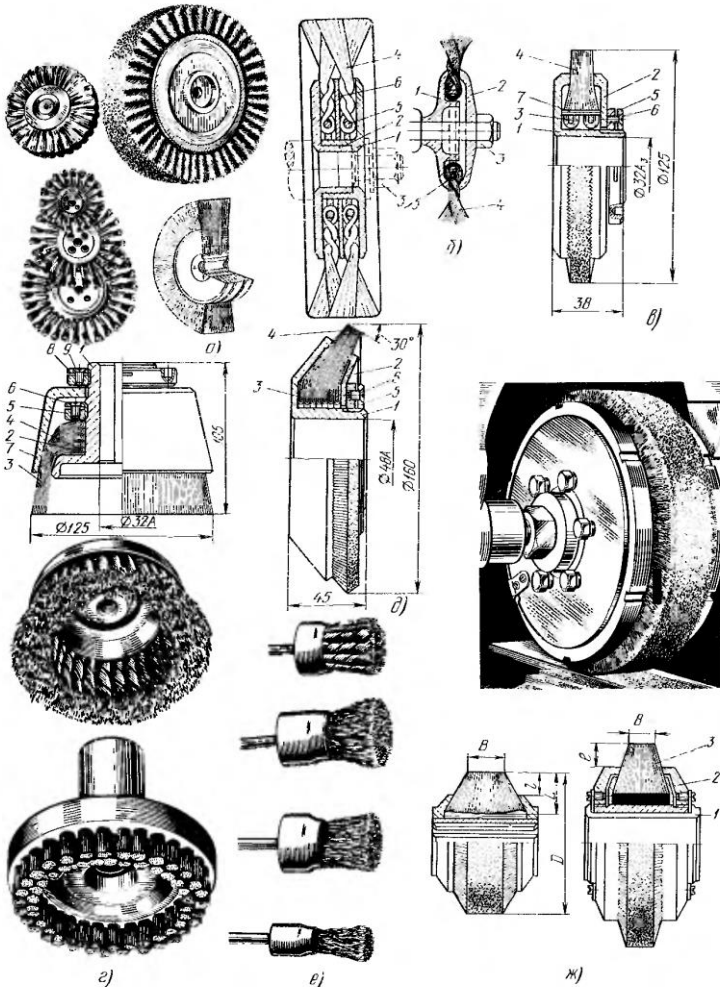


Рис. 5.3.4. Основні типи дротого інструменту

Робочими елементами механічних щіток є гнучкі сталеві дроти діаметром 0,3–0,4 мм і довжиною 50–80 мм. Окружна швидкість щіток діаметром 200–300 мм дорівнює 30–35 м/с, натяг, створюваний гвинтом поперечної подачі токарного верстата, становить 2–4 мм, час обробки при відсутності поздовжньої подачі – 20–30 с. При зміцненні щітками титанових сплавів формуються залишкові стискаючі напруги 400–1000 МПа, глибина їхнього залягання – 0,1–0,3 мм. Застосування щіток з ударними елементами, як показало дослідження зміцнення сплаву ПТ-3В, виявилось значно ефективніше, тому що забезпечувалося формування більш високих залишкових стискаючих напруг з більшою глибиною їхнього залягання. Даний метод впроваджений для зміцнення внутрішньої доріжки швидкохідних кулькових підшипників за допомогою механічних щіток зі швидкістю 35 м/с, натягом 3,5 мм і тривалістю 30 с. Тривалі випробування підшипників кочення в шпинделях жолобошліфувальних верстатів показали, що після зміцнення доріжок кочення кілець зі сталі ШХ15 механічними щітками довговічність підшипників зростає в 1,6–2 рази. Зміцнення механічними щітками шліфованих плоских зразків зі сплаву АТ-3В із концентраторами напруг підвищило границю витривалості з 110 до 250 МПа, а зміцнення зварених швів – з 210 до 315 МПа. Процес впровадження для зміцнення зварених швів апаратів при обертанні щітки зі швидкістю 25 м/с, з натягом 2 мм і подачею уздовж шва 300 мм/хв. Обробка механічними щітками також дозволяє знизити в 1,3–2 рази висоту шорсткості.

5.4. Зміцнення карбуванням

Для обробки великих і важких деталей і особливо галтелей великих валів рекомендується карбування поверхонь. Зміцнення карбуванням здійснюється шляхом спрямованого ударного впливу на оброблювану поверхню спеціального бойка.

Спрямований удар бойка дозволяє застосувати карбування для зміцнення внутрішніх кутів, шпонкових канавок, шліцьових валів, галтелей, канавок, виточок, фасок отворів, різних деталей складної конфігурації, які неможливо піддати зміцненню шляхом обкатування або дробоструминною обробкою. Карбуванням можна призупинити розвиток тріщини, а також усунути експлуатаційні концентратори напруг у вигляді задрів, подряпин, корозійних раковин тощо (рис. 5.4.1).

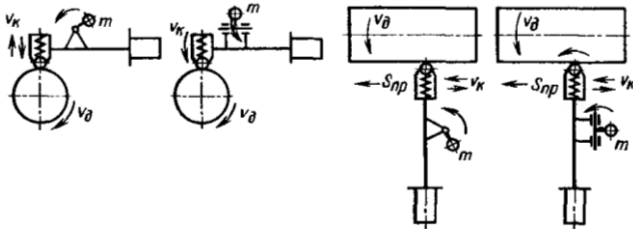


Рис. 5.4.1. Схеми ексцентрикових зміцнювачів

Робоча частина бойка може виконуватися у вигляді сфери або іншої фасонної поверхні відповідно до форми поверхні зміцнення.

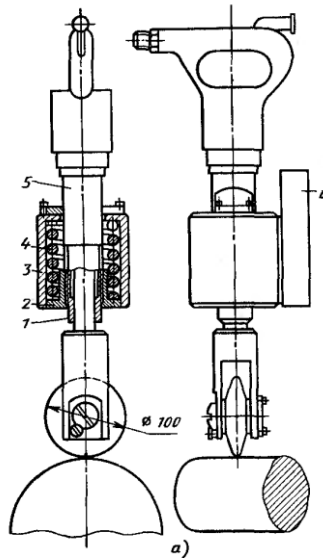


Рис. 5.4.2. Інструмент для карбування

Бойок може бути виконаний збірним, робочою частиною в цьому випадку є куля або ролик. У цьому пристрої енергію удару передає пневмоударник, до якого підведене стиснене повітря (0,4–0,6 МПа). У карбувальних пристроях як джерело енергії найбільш часто використовують пневмоударники у вигляді пневматичних молотків, що випускають серійно, з енергією удару від 12 до 80 Дж при частоті ударів від 20 до 80 с^{-1} . Для більш повного використання енергії удару пневмоударник підискають до оброблюваної поверхні пружиною із силою 300–500 Н. Застосовуються також електромеханічні приводи на

базі пружинно-кулачкового механізму, віброгідрравлічні механізми, ультразвуківі генератори.

Величину зміцнення й глибину зміцненого шару визначають енергія удару, крок карбування (кількість ударів на лінійний міліметр обробки) і число проходів. Енергія удару залежить від необхідних параметрів зміцнення. На крок карбування впливають частота руху бойка, швидкість руху оброблюваної деталі й число проходів. Ці параметри варто поєднувати таким чином, щоб забезпечити крок карбування в межах 0,1–0,12 мм для невеликих і 0,4–1,5 мм для великих деталей. Процес карбування здійснюється при змащенні зони контакту машинним маслом, наприклад, «Індустріальне-30». При карбуванні залишкові напруги можуть становити 600–800 МПа, ступінь зміцнення – 30–50%, глибина – до 1,0–2,0 мм, довговічність деталей збільшується в 1,5 рази й більше.

Застосування карбування рекомендується для збільшення міцності зубів великих шестерень. Зміцнення западин між зубами, підданими в робочій частині загартуванню з нагріванням СВЧ, підвищує межу їхньої витривалості при вигині на 40–50% у порівнянні з незміцненими зубами. Застосування карбування для зміцнення цементованих і загартованих до твердості 58–60 HRC зубів шестерен дозволило збільшити їхню довговічність майже в 6 разів. При цьому карбуванню піддавалися ніжки зубів за допомогою пневматичного молотка. Бойок виготовлявся зі швидкорізальної сталі й мав твердість 62–64 HRC. Карбування використовується для зміцнення западин крупномодульних зубчастих коліс тепловозів. Зубчасті колеса, відлиті зі сталі 40ХНТ, після механічної обробки різанням піддавалися загальній термічній обробці – загартуванню при температурі 850 °С у маслі й відпусканню при температурі 650 °С. Після загальної термічної обробки робоча частина зубів гартувалася з нагріванням СВЧ. Карбування їхніх западин виконувалось при 1200 ударів бойка за хвилину з подачею стола фрезерного верстата 300 мм/хв при двох проходах по радіусах і одному по дну западини. Зусилля пружини складає 400 Н. Бойок робив у напрямку утворення доріжки чотири удари на 1 мм довжини. Порівняльні випробування зубчастих коліс, що не піддавалися карбуванню по западині й карбованих, показали для останніх збільшення границі витривалості на 33%. Твердість у результаті зміцнення карбуванням підвищилася із 260 НВ до 353 НВ, тобто на 35%.

Карбування вібруючим роликом деталей великих колінчатих валів зі сталі значно підвищують їхню витривалість. Обкатування вібруючим роликом чавунних валів діаметром 175 мм підвищує більш ніж у два рази їхню несучу здатність. Установлено, що зміцнення вібруючим роликом значно підвищує міцність різцевих деталей. Пластична деформація в зоні западин різі, що є концентраторами напруг, викликана вібруючим

роликом для різі діаметром 70–215 мм і кроком 8 мм і вище, підвищує несучу здатність деталей, що працюють при змінних навантаженнях, на 80–280%. Для зміцнення різей застосовується пристосування, у якому вібруючий робочий ролик установлений на осі важеля й піднімається до деталі пружиною. Ударне навантаження від пневмоударника передається через бойок на ролик. Обойма із пневмоударником підтискається до ролика із силою близько 300 Н, забезпечуючи стабільну роботу пневматичного механізму й повну віддачу енергії удару. Для карбування різей різних діаметрів і кроків пристосування оснащено змінними пневматичними ударниками різної потужності. Для зміцнення різей застосовуються пневмоударники KE-22 (енергія удару 34 Дж при 1100 ударах за хвилину), і KE-16 (21 Дж – 1800 ударів за хвилину).

Зміцнення виконується при повільному обертанні деталі, що забезпечує кругову подачу 1–1,5 мм на один удар. При зміцненні упорних різей на валах зі сталі 40 з енергією удару 34 Дж і круговою подачею 1,2 мм на один удар внутрішній діаметр різі зменшується на 0,35%. Така деформація відповідає підвищенню межі витривалості поверхонь на 40% і сприяє багаторазовому збільшенню їхньої довговічності.

При експлуатації пристроїв для зміцнення різей вібруючим роликом спостерігаються випадки поломки роликів і бойків, що працюють в умовах твердого удару по матеріалу. Найвищу стійкість мають ролики зі сталей X12M, X12Ф1 і 60С2 з карбідною неоднорідністю не вище 5-го бала. Спосіб зміцнення різі самовстановлюваними роликами придатний для обробки трапецеїдальних і упорних різей із великим кроком, що мають западину шириною більше 15 мм і малі кути підйому. Обробка багатозахідних різей малого діаметра, а також різей із кроком 8–30 мм успішно виконується інструментами, що працюють по методу огинання. Причому для серійного виробництва доцільно використовувати високопродуктивні багатороликові пристрої.

Для деформаційного зміцнення шліцьових валів застосовують обкатування або карбування роликами й пневматичними ударниками. Пристрій для обкатування закріплюють у різцетримачі верстата. Він має два ролики. Пружини пристрою, розраховані на граничну силу 30 кН, знижують жорсткість контакту роликів з деталлю.

Для карбування шліцьових валів запропонований пристрій із двороликовою головкою. Карбування шліцьових валів, як і обкатування роликами, виконується на токарному верстаті при нерухомій деталі й поздовжньому переміщенні супорта. Профіль шліців у результаті деформації трохи спотворюється. При обкочуванні із силою 18 кН шліців півосей екскаваторів, виготовлених з покращеної сталі 34ХН1М, загартованих з нагріванням СВЧ, деформація незначна. Оптимальним є карбування з енергією удару 21 Дж і подачею, яка забезпечує від 10 до 20

ударів на 1 мм довжини зміцненої поверхні. Після зміцнення незагартованих шліців карбуванням або обкатуванням роликками довговічність збільшується з 52 000 до 315 000 циклів.

Поверхнєве загартування з нагріванням СВЧ, застосовується головним чином для підвищення контактної міцності шліців, сприяє й збільшенню їх згинної міцності. Однак шліци після поверхневого загартування нерівномічні по довжині. Після карбування довговічність шліців підвищується в 2–3 рази.

Карбування істотно підвищує міцність зварних з'єднань. Воно виконується за допомогою пневматичних молотків з бойками у вигляді пучка сталевих дротиків діаметром 2–3 мм, при цьому глибина зміцненого шару досягає 0,5 мм. Границя витривалості зварних конструкцій у результаті карбування, яка здійснюється в зоні зварювання, підвищується на 25–30%. Зміцнення карбуванням істотно збільшує міцність зварних з'єднань високоміцного чавуну. При цьому поверхнева твердість різних зон з'єднання підвищується по-різному – основного металу на 7–19% (із HB 420 до 470), наплавлення – на 60% (із HB 200 до 320) і зони заповнення на 70–130%. У ході карбування відбувається згладжування піків твердості й більш рівномірний розподіл твердості між складовими зварного з'єднання. Зміцнення зони шва підвищує границю витривалості в 2,5 рази, що становить майже 75% границі витривалості основного металу.

Карбування відрізняється динамічним характером навантаження при високій щільності питомої витрати енергії. Таке навантаження здатне викликати значні деформації оброблюваних деталей. Ця особливість карбування знайшла своє застосування для утворення нових поверхонь шляхом нанесення рифлень, видавлювання малих галтелей. При карбуванні контактуючих поверхонь удари бойком наносяться таким чином, що на обробленій поверхні виникають рифлення. У результаті зміцнення в поверхневих шарах контактуючих деталей підвищується твердість і виникають сприятливі стискаючі залишкові напруги, що нейтралізує шкідливий вплив контактної корозії й концентрації напруг на опір утомі контактуючих деталей.

ТЕРМОМЕХАНІЧНІ І ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ І НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

6.1. Електромеханічна обробка

Сутність ЕМО полягає в тому, що на оброблювану деформуючим інструментом поверхню одночасно впливає тиск інструмента й тепло, що виникає в результаті проходження струму між інструментом і деталлю. Це викликає зміцнення як за рахунок підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару, так і поліпшення параметрів мікрорельєфу самої поверхні. При цьому інструментом може бути нерухомо закріплена пластина з тороїдальною робочою поверхнею або ролик. Найпоширеніший спосіб електромеханічного зміцнення роликками, тому що їхня стійкість набагато вища, ніж плоских пластин. Деформуючий ролик звичайно виготовляється зі швидкорізальної сталі Р6М6 твердістю 62...64 HRC і шорсткістю $Ra = 0,1...0,4$ мкм.

ЕМО циліндричних деталей здійснюється на токарних верстатах, силовою установкою при цьому є зварювальний трансформатор змінного струму ТСД-1000, що дозволяє плавно змінювати силу струму від 0 до 800 А при робочій напрузі 1,5–2 В. При цьому сила струму й вторинна напруга регулюється залежно від площі контакту, вихідної шорсткості й вимог до якості поверхневого шару. Оброблювана деталь обертається з окружною швидкістю v (м/с), а інструмент здійснює поступальний рух уздовж оброблюваної деталі (s – подача ролика (мм/об); t – число ходів). Тиск згладжування P (Н) настраюється поперечним супортом верстата.

Тепловиділення при ЕМО відбувається внаслідок тертя інструмента об оброблювану деталь, проходження через неї електричного струму й деформації металу в поверхневому шарі. У результаті такого комбінованого впливу структура в поверхневому шарі являє собою подрібнений мартенсит. За рахунок виділення карбідної фази в поверхневому шарі на глибині 0,2–0,25 мм відбувається зменшення кількості вуглецю. Кількість карбідних включень і їхня дисперсність зі збільшенням зусиль обкатування зростає, а максимальна величина ступеня наклепу при цьому не перевищує 15–16%. Міцність поверхневого шару підвищується за рахунок збільшення щільності дислокацій і більш рівномірного їх розподілу, збільшення довжини границь субзерен, створення дислокаційних бар'єрів, утворення вторинних фаз, що зменшує розміри мартенситних голок у загартованій структурі.

Доцільним є зміцнення на глибину не більше 0,75–1,0 мм, тому що деформуючий вплив інструмента на більш глибокі шари змін у структурі металу не викликає й не відрізняється від звичайного загартування СВЧ.

Зміна твердості по глибині поверхневого шару при ЕМО залежить від режимів обробки, тиску, вмісту вуглецю в сталі. Так, зміцнення сталей 45, У10 при $I = 600$ А, $v = 0,05$ м/с, $s = 0,2$ мм/об, $P = 0,7$ кН дозволяє одержати відносне збільшення твердості сталі 45 в 2,7 рази, а У10 – в 3,8 рази, тобто зміцнення сталей з великим вмістом вуглецю більш ефективне.

Таблиця 6.1.1

Вплив параметрів режимів обробки на міцність поверхневого шару

| Основні параметри режиму обробки | | | | Глибина зміцненого шару h , мм |
|----------------------------------|---------|-----------|---------|----------------------------------|
| I , А | U , В | V , м/с | P , Н | |
| 320 | 4,5 | 0,012 | 0,6 | 0,43 |
| 330 | 5,0 | 0,012 | 0,6 | 0,52 |
| 410 | 5,4 | 0,009 | 1,6 | 0,72 |
| 440 | 6,0 | 0,012 | 0,6 | 0,74 |
| 520 | 6,2 | 0,009 | 1,6 | 1,04 |

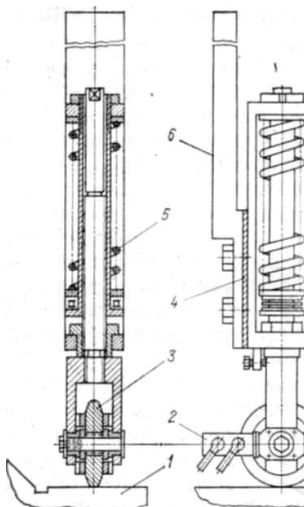


Рис. 6.1.1. Схема електромеханічного накатування

У результаті ЕМО зубчастих коліс зі сталі 40Х з вихідною шорсткістю $Rz=16...30$ мкм на режимах в інтервалах: $I=850...1650$ А; $P=1,6...5,6$ кН; $v=0,003...0,02$ м/с; $s=1,1...1,3$ мм/подв. хід показали, що найбільша

твердість 800–840 *HV* і найменша шорсткість $Ra=0,63\text{--}0,32$ мкм, при ЕМО зубчастих коліс отримані на режимах обробки: $I=1650$ А; $v=0,012$ м/с; $P=3,6$ кН; $s=0,7$ мм/подв. хід, при цьому товщина зубів змінилася не більше 0,04 мм.

ЕМО застосовується для зміцнення напрямних станин, які попередньо оброблені до $Rz=20\text{--}6,3$ мкм. ЕМО рекомендується проводити на поздовжньо-стругальному верстаті з використанням твердосплавного деформуючого ролика. Сполучення теплового впливу із ППД знижує шорсткість до $Ra=0,63\text{--}0,16$ мкм, збільшує радіуси її скруглення до 800–1000 мкм, підвищує фізико-механічні властивості поверхневого шару. Напрямні станин після ЕМО підвищують зносостійкість в 1,7–2,5 раза.

Перспективним є застосування ЕМО для відновлення зношених поверхонь валів і осей машин з одночасним їхнім зміцненням.

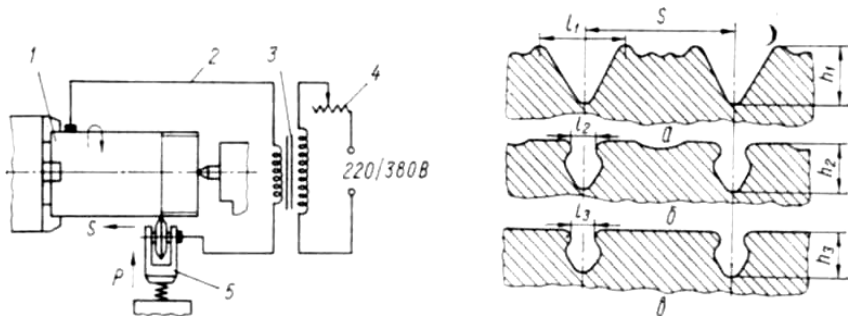


Рис. 6.1.2. Схема установки електромеханічного відновлення й зміцнення зношених деталей:

1 – оброблювана деталь; 2 – електромеханічний ланцюг трансформатор – ролик – деталь; 3 – трансформатор; 4 – реостат; 5 – накатний ролик. Мікрорельєф поверхні після накатування профільним роликом (а), після наступного обкатування циліндричним роликом (б) або вигладжування (в)

Застосування традиційних способів відновлення зношеного шару наплавленням, напилюванням, гальванічним осадженням металів, покриттям зношених поверхонь полімерним матеріалом вимагає трудомісткої попередньої обробки поверхонь і їх остаточної розмірної обробки. Причому міцність і адгезійні здатності відновленого шару при малих його товщинах, як правило, менші, ніж основного металу. Кращі результати забезпечує спосіб ЕМО зношеної поверхні без нанесення на неї стороннього шару і його наступної механічної обробки.

Сутність процесу полягає в тому, що зношена поверхня піддається електромеханічному обкатуванню фасонним твердосплавним роликом зі

створенням на поверхні профільних гвинтових канавок. При цьому метал, що видавлюється роликми, утворює по краях канавок гвинтові виступи, і вони збільшують діаметр зношеної поверхні. Потім виконується електромеханічне обкатування або електромеханічне вигладжування поверхні деформуючим циліндричним твердосплавним роликом або вигладжувачем до необхідного діаметра.

За рахунок деформування виступів бічних сторін гвинтових канавок утворюються гвинтові напівзакриті канали, які позитивно впливають на зносостійкість і довговічність роботи відновленої поверхні.

Електромеханічна обробка зношених у результаті фретинг-корозії поверхонь дозволяє не тільки відновити геометричні розміри й точність деталей, але й зміцнити поверхневий шар, створити умови, що перешкоджають розвитку фретинг-корозії, чим підвищити фретинг-стійкість оброблених даним способом поверхонь у порівнянні з обробленими звичайними способами у 1,5–2 рази. За рахунок наявності залишкового рельєфу у вигляді напівзакритих канавок знижується інтенсивність дії фретинг-корозії у результаті виводу продуктів зношування із зони контакту двох поверхонь. Особливо ефективний залишковий рельєф при наявності в ньому змащення. Залишковий рельєф і поліпшення фізико-механічних властивостей поверхневого шару знижують ефект фретинг-корозії, підвищують міцність, а також зменшують концентрацію напруг від напрусування.

6.2. Електрофізичні способи зміцнення

Лазерне зміцнення поверхонь дозволяє вибірково змінювати властивості різних ділянок деталей машин та інструментів, у результаті чого можна одержувати більш міцні зносо- і корозійностійкі поверхні. Воно має ряд особливостей, які вигідно відрізняються від інших методів і способів зміцнення: локальність процесу зміцнення, можливість обробки важкодоступних місць, одержання заданої шорсткості поверхні, можливість одержання на поверхні деталі шару із заданими властивостями; можливість автоматизації процесу тощо. Крім того, цим способом можна не тільки зміцнювати поверхневий шар, оброблюваних деталей. Використання лазерних установок для зміцнення відсічних кромок плунжерів паливних насосів, роликів і кулачків розподільних валів двигунів внутрішнього згоряння дозволяє значно збільшити зносостійкість і подовжити їхню довговічність.

Продуктивність зміцнення залежить від швидкості протікання процесу $V = lf/n$, де l – довжина оброблюваної ділянки, мм; f – частота

проходження імпульсів, регламентована технологічними параметрами лазера n – кількість імпульсів, необхідна для обробки заданої ділянки.

Щоб уникнути оплавлення дна бічних стінок канавки при зміцненні кромки плунжера він розташовується в зафокальній області лінзи. Обробка лазерним зміцненням виконується в середовищі захисного газу, наприклад, аргону. Оброблювані місця піддаються хімічному травленню.

У зв'язку з тим що цей спосіб зміцнення не змінює шорсткості оброблюваної поверхні, операція лазерного зміцнення звичайно виконується після остаточної механічної обробки деталей. При обробці великих поверхонь, наприклад, при зміцненні контактуючих поверхонь кулачків вала двигунів внутрішнього згорання обробка проводиться на окремих ділянках. Стійкість зміцнення при цьому підвищується на 30–50%.

Лазерному зміцненню піддаються багато деталей, що працюють при значних контактних навантаженнях. Після такого зміцнення значно підвищуються контактна зносостійкість і міцність кромки клапанних тарілок, робочих поверхонь напірних золотників паливної апаратури, головки штоків вихлопних клапанів, робочих поверхонь вимірювального інструмента. Обробка робочої поверхні золотника конусного ущільнення трубопровідних арматур високого тиску на лазерній установці дозволила одержати зміцнені зони по контактному колу золотника. Зміцнена зона є сукупністю плям фокусування лазерного променя із кроком $0,75D$ і шириною 0,6 мм. Таке зміцнення призводить до росту стійкості клапанного з'єднання більш ніж в 3 рази.

Великий ефект від використання цього способу досягається при зміцненні пуансонів і матриць штампів, стійкість яких залежить від твердості й стану поверхні їхніх робочих елементів. Лазерне зміцнення цих елементів здійснюється після їх остаточної механічної обробки, причому щільність потужності лазерного випромінювання не повинна перевищувати критичного значення, коли спостерігається оплавлення поверхневого шару оброблюваного матеріалу.

Лазерне зміцнення з високою ефективною використовується для обробки шийок і галтелей колінчатих валів, бічних сторін кільцевих виточок поршнів двигунів внутрішнього згорання, зубів і торцевих поверхонь зубчастих коліс. Лазерне зміцнення дозволяє одержати стабільно однорідний зміцнений шар, що практично недосяжно при інших методах обробки. При цьому глибина зміцнення, що залежить від матеріалу й режимів обробки, досягає 1–2 мм.

Лазерному зміцненню можна піддавати чавунні напрямні станини верстатів. Таке зміцнення дозволяє довести їхню твердість до 60 HRC.

У ряді випадків при лазерному зміцненні деталей на їхню поверхню наносять легуючі елементи. При цьому необхідно, щоб температура на

поверхні перевищувала температуру плавлення легуючого елемента. У процесі оплавлення металу відбувається його інтенсивне перемішування з легуючими елементами, розміщеними на оброблюваній поверхні. Глибина легування визначається потужністю променя, його діаметром і швидкістю сканування. Наприклад, при легуванні, вуглецевої сталі кобальтом глибина шару досягає 1,2 мм, при цьому зносостійкість деталей збільшується у 3–4 рази.

Для підвищення ефективності лазерної обробки застосовується чорніння оброблюваних поверхонь, наприклад, хімічне травлення, що дозволяє проводити процес при меншій енергії випромінювання. Зниження енергії лазерних імпульсів збільшує частоту їхнього проходження і продуктивність обробки. Для підвищення стабільності параметрів зміцнення, зниження ймовірності зменшення вуглецю в поверхневому шарі й поліпшення зовнішнього вигляду деталей лазерну обробку рекомендується вести в аргоні.

Перспективним є сполучення лазерної обробки із ППД. При цьому підвищуються фізико-механічні параметри й поліпшується мікрорельєф поверхні (рис. 6.2.1).

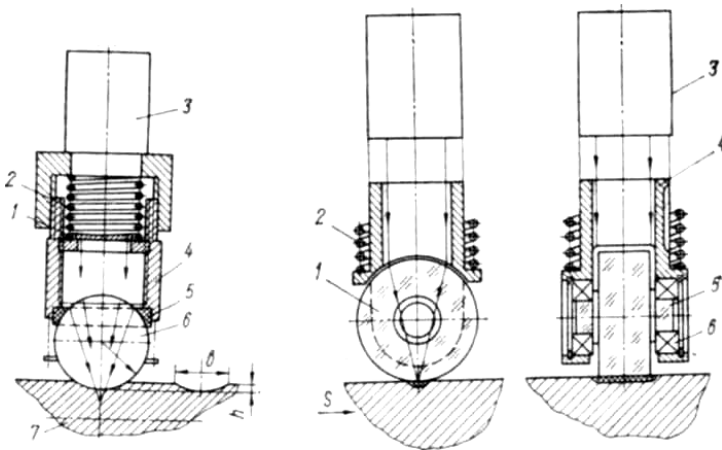


Рис. 6.2.1. Кульова й роликва головка для лазерного зміцнення

Пристрій для такої комбінованої обробки складається із корпусу 4, який закріплюється на супорті верстата, в отворі якого на фторопластовому під'ятнику 5 установлений деформуючий елемент – куля 6, виконана із прозорого для лазерного випромінювання матеріалу. Між кулю 6 і встановленим на корпусі 4 випромінювачем – лазерним генератором 3 розміщена лінза. Механізм навантаження кулі виконаний у вигляді пружини 2, яка розміщена в корпусі 4. Центр деформуючої кулі

розташований на оптичній вісі негативної лінзи. Необхідна щільність світлового потоку в зоні контакту кулі й деталі 7, що забезпечує нагрівання до температури 1100–1200 °С і можливість керування розмірами плями нагрівання поверхні при імпульсній роботі генератора, а отже, і розмірами й формою мікрорельєфу, забезпечується за допомогою зсуву негативної лінзи. При цьому положення фокальної площини й розміри зони нагріву визначаються фокусною відстанню негативної лінзи і її положенням відносно кулі. Швидке охолодження місця контакту за рахунок інтенсивного відбору тепла основною масою металу забезпечує деяке зміцнення поверхні. У ході зміцнення корпус із деформуючою кулькою встановлюється на оброблювану поверхню, після чого пружиною 2 створюється певний натяг, який дорівнює зусиллю накатування, й вмикається випромінювач лазерного генератора з одночасною подачею головки уздовж оброблюваної деталі. Поперечна подача стола дозволяє одержувати мікрорельєф по всій ширині обробки. При відповідних режимах роботи й зусиллі деформування 100 Н найбільш доцільним з погляду зносостійкості є частково регулярний мікрорельєф із шаховим розташуванням зміцнених мікрозаглиблень розміром 0,5–0,6 мм глибиною 0,0015 мм і висотою напливів по їхніх краях 0,0003 мм. Одержання такого мікрорельєфу на деталях із цементованої й загартованої до 60–62 HRC сталі 20X з вихідною шорсткістю поверхні $Ra=0,16\text{...}0,08$ мм підвищило в 1,5 рази зносостійкість поверхні у порівнянні зі шліфованою.

Пристрій закріплюється на супорті поздовжньо-фрезерного або поздовжньо-стругального верстата. Як деформуючий елемент використовується циліндричний ролик, через який пропускається на оброблювану поверхню імпульсне лазерне випромінювання.

З появою газових лазерів, найчастіше на базі вуглекислого газу, потужністю 5...15 кВт більш істотно розширилася область застосування променевої обробки. Цьому сприяє ще й те, що лазерне зміцнення супроводжується в десятки разів меншим коробленням деталей, ніж при звичайному індукційному загартуванні, що дозволяє виключити деякі технологічні операції і тим самим знизити собівартість обробки. Крім того, мінімальне короблення деталей дає можливість будувати верстати, у яких можуть сполучатися процеси механічної обробки з лазерним термоміцненням.

6.3. Нанесення покриттів

Зміцнення конденсацією з іонним бомбардуванням (КІБ) на установці «Булат» застосовується для підвищення стійкості різального інструменту й зносостійкості поверхонь деталей машин.

При насиченні на установці «Булат-3М» різального інструменту зі швидкорізальної сталі Р6М5 нітридом титана його зносостійкість підвищується залежно від виду інструмента у 2,5–5 разів, а деталей, наприклад плунжерів гідронасосів, у 8–12 разів. Оптимальна глибина зміцненого шару різального інструменту становить 0,010...0,011 мм. У зв'язку з недостатнім зчепленням зміцненого шару з основним металом інструмента цей вид зміцнення небажаний при роботі інструмента зі значними динамічними навантаженнями.

Ефективним є застосування КІБ для зміцнення й підвищення зносостійкості твердосплавного інструмента. Так, стійкість пластин Т15К6 після зміцнення збільшується у 2 рази. При зміцненні матриць і пуансонів для холодного й напівгарячого видавлювання, деталей вимірювального інструмента, оправок для вимірювальних приладів, калібрів досягається значне підвищення їхньої зносостійкості. При нанесенні на поверхню шару нітриду титана може бути досягнута точність розмірів до 0,5 мкм, що особливо важливо при виробництві вимірювального інструмента, а також пуансонів і матриць штампів для листового штампування тонких і надтонких смуг.

Перед зміцненням на установці «Булат-3М» інструменти або деталі машин повинні бути ретельно очищені й промиті по черзі бензином, ацетоном і спиртом. Вони завантажуються в камеру, у якій створюється розрідження від $2,7 \cdot 10^{-3}$ до 0,67 Па за час 20–30 хв, а потім використовуються три режими. Для запобігання конденсації й видаленню парів води й газу з поверхні стінок камери здійснюється прогрів гарячою водою. Режим очищення призначений для очищення підкладки від забруднень. Він здійснюється іонним травленням поверхонь виробу перед напилюванням, для чого до виробу прикладають високий негативний потенціал. Іони металу катода, що утворюються в результаті електродугового розряду, прискорюються під дією високовольтного потенціалу й вибивають із поверхні виробу атомний поверхневий шар. Напилювання протікає в атмосфері азоту або іншого газу при розрідженні в робочому обсязі камери від $1,34 \cdot 10^{-2}$ до 0,67 Па. У режимі напилювання відбувається конденсація на підкладку випаруваного матеріалу катода, який взаємодіє з атомами легуючого газу, що приводить до утворення на оброблюваній поверхні покриття, що містить нітрид матеріалу катода (рис. 6.3.1).

Розрідження створюється за допомогою двох насосів. Спочатку відкриваються вентиля 5, 6 і вмикається форкамерний насос 7, що створює розрідження до 10^{-3} Па. Далі вентиль 6 закривається, відкриваються вентиля 8 і 11, і в роботу вступає дифузійний насос 9. Форкамерний насос 7 при цьому видаляє залишки повітря. Ступінь розрідження контролюється до тиску 10^{-2} МПа по термоманометричному перетворювачу 3, а далі по манометричному іонізаційному перетворювачу 4. Випарник установки призначений для створення потоку плазми з матеріалу катода в момент дії дугового розряду. По досягненні в камері необхідного розрідження на котушку 13 пристрою подають імпульс електричного струму, і сердечник зі штоком 12, втягуючись у цю котушку, переміщає електрод.

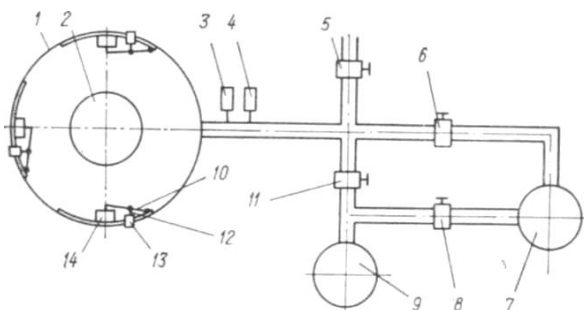


Рис. 6.3.1. Схема установки для нанесення покриттів способом КІВ

Він замикає проміжок між катодом 14 і пристроєм підпалу, який електрично з'єднаний через обмежувальний опір з анодом, роль якого виконує камера 1. По закінченні імпульсу котушка 13 пристрою підпалу знеструмлюється і сердечник зі штоком 12 вертається у вихідне положення, відходить від катода 14 і електричний ланцюг між катодом і анодом переривається, збуджуючи мікродугу, що переростає в дуговий розряд.

Катодні плями, що переміщуються по кругових траєкторіях на кінці катода є джерелами плазмових струменів. Змінюючи величину магнітного поля котушки, установлюють такий середній радіус траєкторій катодних плям, щоб забезпечити рівномірний випар матеріалу на торці катода. Для забезпечення рівномірного покриття поворотний пристрій 2 обертає оброблювані деталі. Номінальний робочий струм дуги 75–180 А. Номінальна напруга на виході високовольтного випрямляча дорівнює 1,28–2,2 кВт. Катод виготовляється з титану. Іони титану проходять через атмосферу азоту, та утворюють на оброблюваній поверхні покриття TiN

товщиною 6...8 мкм. Час нанесення покриття – 30 хв. Для забезпечення рентабельності обробки прагнуть завантажити в камеру установки максимально можливу кількість деталей. Загальний час обробки однієї партії деталей коливається в діапазоні 1,5–2,5 години.

При зміцненні на установці «Булат-3М» варто враховувати, що температура в зоні конденсації є найважливішим чинником, який визначає високі експлуатаційні характеристики зміцненого поверхневого шару деталей. Вона залежить від тиску в камері, струму дуги, відстані від катоду, маси оброблюваних заготовок, а також від співвідношення між масою й площею поверхні.

Електроіскрове зміцнення виконується при зворотній полярності відносно розмірної електроіскрової обробки. Оброблювана деталь при цьому способі обробки приєднується до катоду, а електрод-інструмент, виготовлений з ферохрому, сплаву Т15К6, графіту – до анода. Під впливом електричних розрядів у поверхневих шарах електрода й деталі відбуваються фізичні й хімічні явища, які супроводжуються переносом металу електрода на поверхню деталі (легуванням оброблюваної поверхні деталі за рахунок металу електрода), а також поглинанням розплавленим металом азоту й вуглецю з навколишнього середовища, що утворює гартівні структури в поверхневому шарі деталі.

Глибина й твердість зміцненого шару залежать від режиму зміцнення. При потужності 1 кВт загальна глибина зміцненого шару досягає 0,12 мм, а при 17 кВт – 5 мм. Твердість поверхні, зміцненої ферохромовим електродом, досягає 650 HV. Величина стискаючих залишкових напруг перевищує 90 МПа.

Електроіскрове зміцнення поверхонь деталей, наприклад, валків прокатних станів гарячої прокатки, лопаток дробоструминних апаратів, ножів землечерпалок, підвищує їхню зносостійкість у 2–3 рази. Зміцнення лопаток турбін збільшує, крім того, їхню корозійну стійкість.

6.4. Наплавлення і напилювання

Наплавлення є одним з найбільш універсальних способів зміцнення. Воно дозволяє підвищувати стійкість деталей проти абразивного зношування, електрохімічної корозії, ерозії, кавітаційного руйнування, термічної й контактної втоми; дозволяє замінити в деталях високолеговані сталі вуглецевими, а кольорові метали – чорними. Звичайно використовується ручне, газове або електродугове наплавлення, а також різні механізовані способи наплавлення.

Найбільш часто газове наплавлення використовується для зміцнення твердими сплавами сормайт і різними тугоплавкими з'єднаннями деталей, робочі поверхні яких повинні мати більшу твердість і високу зносостійкість. Цим способом одержують наплавлені шари товщиною 0,5 мм і більше. Сормайт рекомендується для наплавлення вуглецевих сталей і особливо сталі У8А. Можна робити наплавлення й на леговані інструментальні сталі 5ХНМ, 3ХВА, 4ХВС тощо. Кращі результати наплавлення досягаються для конструкційних сталей 40ХН, 40Х. При виборі способу наплавлення варто мати на увазі те, що він в більшості випадків підвищує зносостійкість при одночасному зниженні межі витривалості, наприклад, для деталей з нормалізованої сталі 45 до 25% і до 35% для деталей, виготовлених із цієї ж сталі, але загартованих СВЧ.

Наплавлення здійснюється при високих швидкостях розплавлення й застигання розплаву з інтенсивним протіканням хімічних і термохімічних процесів. При цьому властивість напавленого шару в основному залежить від технології наплавлення й властивостей напавленого матеріалу. Товщина напавленого шару встановлюється залежно від умов роботи деталей і припустимої величини зношування поверхонь. Для деталей, що працюють на стирання, вона не повинна перевищувати 4 мм, а в умовах невеликих ударних навантажень – 2 мм. При цьому твердість напавленого шару 45...65 HRC, а теплостійкість – 1000–3000 °С.

Вирішальне значення для одержання необхідних експлуатаційних якостей деталей має правильно обраний напавочний матеріал і спосіб його нанесення. Так, для зниження інтенсивності абразивного зношування необхідне максимальне підвищення твердості робочих поверхонь деталей, для усунення теплового зношування – підвищення теплостійкості, а для попередження пошкоджуваності в результаті розвитку процесу схоплювання необхідно вести наплавлення матеріалом, який має малу схильність до схоплювання, а також здатність утворювати міцні плівки окислів. У випадку контакту однойменних матеріалів наплавлення може виявитися корисною технологічною операцією, що усуває розвиток процесу схоплювання.

Зміцнення механізованим наплавленням деталей валків прокатних станів зі сталі 60ХТ сталлю 3Х2В8 підвищує їхню зносостійкість в 3–4 рази у порівнянні із загартованими. Зносостійкість напавленого під флюсом КС-320 металу валків у 1,8–2 рази більше стійкості основного металу зі сталі 55Х. Зміцненням наплавленням деталей транспортних, сільськогосподарських машин, металорізальних верстатів вдається істотно підвищити їхні експлуатаційні властивості. Установлено, що стійкість опорних катків транспортних машин, напавлених дротом 30ХГСА під флюсом в багато разів вища, ніж напавлених електродами із крейдовою обмазкою. Подальше поліпшення експлуатаційних властивостей

наплавленого шару досягається його загартуванням з нагріванням СВЧ. На вуглецевих і легованих сталях можна одержати високолегований наплавлений шар, використовуючи електроди у вигляді порошкового або електродного дроту із флюсом і меленим плавиковим шпатом.

Звичайні способи наплавлення пов'язані із прогрівом значної частини обсягу деталей, що приводить до їхньої деформації й інших небажаних змін. Тому найбільш широке поширення одержала автоматична вібродугова наплавка, яка здійснюється на наплавочних машинах різних конструкцій. Цим способом нарощується поверхневий шар товщиною 0,3–3,0 мм без помітного прогріву всієї деталі. Використання флюсів або захисних газів забезпечує одержання більш якісного наплавленого шару, а підвищення продуктивності досягається за рахунок застосування декількох дровових або стрічкових електродів. Спосіб вібродугового наплавлення застосовують для підвищення зносостійкості й довговічності деталей машин, що працюють в умовах циклічних навантажень.

Наплавлення з нагріванням СВЧ здійснюють шляхом нагрівання деталей і плавлення шихти, нанесеної на їхню поверхню, у полі індуктора. Шихта являє собою суміш порошку наплавочного матеріалу й флюсів. При такому способі нагрівання необхідно, щоб наплавочний матеріал мав мінімальну магнітну проникність і мав температуру плавлення на 150–200 °С нижче температури плавлення основного металу. Такими матеріалами є сормайт-1, ФБХ-6-2, псевдосплави ПС-4, ПС-5, що мають гарні наплавочні властивості й високу зносостійкість. Як флюс застосовується суміш на базі борного ангідриду й зневодненої бури. При напавленні псевдосплавів додають до 10% фтористого кальцію. Цей спосіб дозволяє наплавляти шари товщиною 0,3–2,5 мм як на зовнішніх, так і на внутрішніх циліндричних поверхнях деталей. Він забезпечує рівномірний хімічний склад і механічні властивості наплавленого шару, а також відносно низьку шорсткість поверхні. Наплавлення, наприклад культиваторів твердими сплавами підвищує строк їхньої служби у 2–3 рази.

Плазмове наплавлення засноване на використанні тепла плазмового струменя, що являє собою потік іонізованих частинок газу, які мають велику енергію. При вільному горінні електричної дуги температура в ній досягає 5000–6000 °С, а при примусовому стиску дуги вона значно підвищується. Такий стиск використовується для одержання плазмового струменя. Пропускаючи дугу разом із захисним газом (водень, азот, аргон) через охолоджуване водою сопло, її стискають й досягають іонізації потоку газу з температурою до 18000 °С. Як наплавочний матеріал використовується дріт, металокерамічні кільця або гранули порошкових сплавів.

Плазмове наплавлення застосовують для нанесення жароміцних матеріалів на робочу поверхню клапанів двигунів внутрішнього згорання,

на робочі поверхні арматур, а також для наплавлення антифрикційних матеріалів на деталі вузлів тертя.

Напилювання металу найбільш часто здійснюється шляхом газової металізації або електрометалізації. У результаті напилювання підвищується зносостійкість, стійкість проти корозії, проти дії агресивних середовищ.

Сутність цього процесу складається в нанесенні на оброблювану поверхню деталі рідкого металу або іншого матеріалу, розпиленого струменем стисненого повітря або газу. Залежно від джерела тепла розрізняють газову, електричну й плазмову металізацію. При цьому напилювання здійснюється як металевими, так і неметалевими матеріалами у вигляді дроту, стрижнів або порошку. Широке поширення знайшли електродугові металізатори дрогового типу, а також плазмові, які дозволяють завдяки високій температурі плазми виконувати напилювання тугоплавких металів, кераміки й окислів.

Перед напилюванням на поверхні деталей за допомогою піскоструминної, дробоструминної, механічної або анодно-механічної обробки створюється шорсткість, яка необхідна для міцного зчеплення шару з поверхнею деталі.

Напилений шар формується із дрібних крапельок металу сферичної форми, покритих зовні окисною плівкою в момент удару їх об поверхню деталі. Крапельки при ударі деформуються й у результаті схоплювання закріплюються на поверхні. Міцність зчеплення основного й напиленого шарів нижче, ніж при напавленні й залежить від попередньої підготовки поверхні. Наприклад, при піскоструминній обробці міцність зчеплення становить 50– 60 МПа, при обробці різанням з великою шорсткістю – 100– 120 МПа, при анодно-механічній обробці – 200– 250 МПа.

Підвищення міцності зчеплення може бути досягнуте шляхом напилювання підшару молібдену товщиною до 0,1 мм, що дифундує в поверхневий шар оброблюваної деталі й тим самим забезпечує краще зчеплення металу. Поліпшення властивостей покриття й міцності зчеплення може бути досягнуте при напилюванні в захисному середовищі й при використанні для дуття інертного газу.

Для зменшення напруг у поверхневому шарі товщина напилювання тугоплавких металів не перевищує 1,0 – 1,5 мм, а для легкоплавких – 2,5 мм. Послідовне нанесення покриття шарами 0,05–0,1 мм із охолодженням кожного, включення до складу матеріалів 0,7% вуглецю або попередній підігрів поверхні деталі до температури 270–370 °С дозволяють значно знизити внутрішні напруження й уникнути появи тріщин. У зв'язку з тим, що напилюванням можна створити поверхневий шар з високими антифрикційними властивостями, цей спосіб широко застосовують для підвищення зносостійкості вузлів тертя. Напилений шар

має високі антифрикційні властивості тому, що він складається із суміші дрібних часток металу, покритих окисною плівкою, і часток окислів високого ступеня дисперсності. Пористість покриття досягає 10% за обсягом. Таке покриття гарно втримує змащення й добре працює в умовах граничного тертя. Зносостійкість покриттів зі сталі залежить від вмісту вуглецю у вихідному матеріалі й методу напилювання. Так, зносостійкість сталевих вкладишів підшипників ковзання, напилених бронзою Броц4-3, що працюють у парі з валом зі сталі 40X, підвищується в 1,5 рази. Гарні результати досягаються при напилюванні на поверхні тертя декількох металів, у результаті чого виходить шар, що складається із суміші цих металів – псевдосплав. Найбільш високими антифрикційними властивостями володіють псевдосплави, що складаються з 70% міді й 30% свинцю; 85% сталі й 15% міді; 50% міді й 50% свинцю; 50% міді й 50% алюмінію. Метод напилювання дозволяє підвищувати корозійну стійкість і жаростійкість деталей. Так, цинкове напилювання є гарним захистом для деталей сталевих конструкцій, які працюють у повітряній атмосфері й воді, а алюмінієве й свинцеве – для деталей сталевих конструкцій, які працюють як у повітряному середовищі, так і в середовищах, що містять кислоти. Нанесення антифрикційних сплавів напилюванням заощаджує до 80% кольорових металів, що витрачаються на виготовлення підшипників ковзання.

Широке застосування в промисловості знайшло плазмове напилювання. Надвисокі температури плазмового напилювання дозволяють розплавляти й наносити різні тугоплавкі матеріали; напилювати матеріали без їхнього розкладання, не допускаючи окислювання оброблюваної поверхні; наносити багат шарові покриття із щільністю до 98% і досягати міцного зчеплення з основним металом заготовки. Цей спосіб виключає короблення деталей, дозволяє наносити металеві покриття на пластмаси, дерево тощо. При цьому енергетичні характеристики потоку плазми легко регулюються залежно від робочої технології.

6.5. Полімерні та емалеві покриття

Полімерні покриття застосовуються для захисту від корозії хімічної апаратури та інших виробів, а також для підвищення зносостійкості вузлів тертя. Широке поширення одержали антифрикційні покриття деталей тертя і виготовлення підшипників ковзання зі сталеві стрічки, покритої тонким шаром антифрикційного матеріалу. Для нанесення покриттів з полімерних матеріалів на деталі машин використовують різні способи

напилювання й плакування. Найбільше поширення одержало вихрове напилювання, яке полягає у тому, що деталь, попередньо нагріту до температури плавлення полімеру, розміщують у середовищі зваженого в повітрі або в нейтральному газі порошку полімеру. У результаті контакту часток полімеру з поверхнею гарячої деталі вони оплавляються й прилипають до деталі, утворюючи суцільне рівномірне покриття. Час витримки деталі при обробці встановлюється дослідним шляхом і становить 3–30 с залежно від необхідної товщини покриття й площі поверхні деталі. Однак при такому способі важко одержати досить тонкий і рівномірний за товщиною шар покриття.

Вібровихрове напилювання здійснюється при зануренні нагрітої деталі у зважену суміш порошку полімеру. При напилюванні частки полімеру доводять до плавлення в ацетиленовому полум'ї спеціального пальника й за допомогою стисненого газу (повітря) подають на поверхню металу. Струминне напилювання полягає в нанесенні часток полімеру під тиском на попередньо нагріту поверхню.

Напилювання в електростатичному полі протікає в потоці порошокподібного полімеру, який перебуває під одночасним впливом електричного поля високої напруги й стисненого повітря. Заряджені частки полімеру переміщуються до деталі й рівномірно осаджуються на ній. Потім деталь поміщають у піч, де полімер плавиться, утворюючи щільне покриття.

Плакування застосовується для створення шару полімерного матеріалу на листових матеріалах. Матеріал покривають готовою плівкою спеціального полімерного матеріалу за допомогою клейової підкладки або полімер наноситься на деталь в рідкому або пастоподібному стані, а плівка при цьому утворюється після спеціальної термічної обробки. Для створення покриттів із полімерних матеріалів найчастіше використовують поліаміди й особливо капрон, поліпропілен, поліетилен, поліуретан тощо.

Захисні покриття звичайно виготовляються багат шаровими, їх товщина залежить від призначення деталі й матеріалу полімеру. Наприклад, при використанні поліетилену гарний захист від корозії забезпечує покриття товщиною 0,25–0,35 мм, а фторопласта-3 – товщиною 0,18–0,25 мм.

За допомогою вихрового й ежекційного напилювання покриваються сталі, чавуни, алюміній та інші матеріали, які витримують нагрівання до температур 300–500 °С.

Практика застосування деяких полімерних матеріалів як антифрикційних покриттів показала їх високу зносостійкість.

Емалеві покриття використовують в основному для покриття сталевих і чавунних виробів побутового призначення.

Антикорозійне покриття, придатне для контакту з харчовими продуктами й хімічними активними середовищами.

Антикорозійне декоративне покриття добре працює при терті, його використовують для хімічної й харчової промисловості.

Дослідження зносостійкості деталей машин після емалювання показали його перспективність.

Для емалювання чавунних деталей тонкодисперсна емаль під тиском 10–15 МПа подається в трубопровід, що перебуває під напругою високого потенціалу. Електричний розряд виникає внаслідок великої різниці потенціалів. Заряджені частки, рухаючись до заготовки, створюють шар. Йони надають додатковий заряд часткам, які осіли на заготовку, що сприяє поліпшенню адгезії й створенню щільного шару покриття.

Сталеві деталі емалюють ґрунтами й покривними емалями, розмеленими у кульових або вібраційних млинах до таких розмірів, щоб на ситі, що має 6400 отворів на 1 см^2 , залишалось не більше 2% матеріалу.

Для одержання високоякісного покриття варто застосовувати склад з 56–58 г ґрунту щільністю $1,65\text{--}1,68 \text{ г/см}^3$ і 58–60 г покривної емалі щільністю $1,63\text{--}1,67 \text{ г/см}^3$. Емалеві покриття, виготовляють в основному із дешевих матеріалів, вони складають не більше 6% ваги деталей, мають високу теплостійкість при температурі 450–750 °С. Спеціальні жаростійкі керамічні покриття, що складаються з емалевого скла і вогнетривких окислів, витримують експлуатацію протягом 1000 годин при температурі до 1100 °С. Морозостійкість сталевих емальованих деталей досягає мінус 70 °С, а чавунних – мінус 30 °С. Покриття поверхонь синтетичними або керамічними емалями забезпечує деталям машин високу антикорозійну стійкість, зносостійкість і жаростійкість.

Розділ 7

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ Й ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ

Електрофізичні й електрохімічні методи обробки, які пов'язані з видаленням зайвого матеріалу при формуванні деталі заданої форми й розмірів, можна підрозділити на п'ять основних груп:

- електроерозійні;
- електрохімічні;
- ультразвукові;
- комбіновані;
- променеві.

При електроерозійній обробці використовується енергія електричних розрядів між електродом-інструментом і електродом-заготовкою. Розрізняють електроімпульсну, електроіскрову й електроконтактну обробку.

Електрохімічна обробка заснована на явищі анодного розчинення матеріалу при пропущенні постійного електричного струму через електрод-інструмент і електрод-заготовку в середовищі електроліту.

При ультразвуковій обробці видалення матеріалу відбувається внаслідок впливу на заготовку інструмента, що коливається з ультразвуковою частотою.

Комбінована обробка ґрунтується на використанні комбінацій різних процесів.

При променевих методах для обробки використовують енергію пучків часток або високоенергетичних струменів.

Перевагами вищезазначених методів є можливість:

- обробки різних матеріалів;
- виконувати обробку, яку неможливо забезпечити іншими методами;
- обробки нежорстких деталей у зв'язку з відсутністю силового впливу інструмента на деталь;
- забезпечити високу продуктивність та якість обробки навіть для важкооброблюваних матеріалів.

7.1. Електроерозійна обробка

Електроерозійна обробка широко застосовується в промисловості при виготовленні деталей з важкооброблюваних матеріалів, що проводять струм (обробка порожнин штампів, прес-форм, ливарних форм,

одержання отворів різної конфігурації, виготовлення криволінійних щілин і пазів, контурне різання, видалення зламаних інструментів).

Механізм руйнування матеріалу можна представити так. При зближенні двох металевих електродів, що перебувають під напругою, настає момент, коли між ділянками електродів, що перебувають на мінімальній відстані один від одного, створюється електричне поле високої напруги. Це приводить до пробоя міжелектродного проміжку. На початку пробоя електрони, що вириваються з найбільш виступаючих ділянок поверхні катода, прямують до анода. При зіткненні електронів з молекулами газу (повітря) відбувається іонізація газу в міжелектродному середовищі й утворюється вузький провідний канал, по якому спрямовується потік електронів. Лавина електронів несе значну кількість енергії, яка вивільняється на матеріалі електрода-анода у вигляді теплової енергії й приводить до локального розплавлення й часткового випаровування електрода.

Виникнення й розподіл електричних розрядів по поверхні визначається зміною мінімальної відстані між поверхнями електродів. Внаслідок цього при обробці (в умовах впливу на матеріал періодичних імпульсів певної послідовності) на електроді-заготовці відбивається форма електрода-інструмента.

Процес ерозії значно інтенсифікується в рідині. Метал, що видаляється з ерозійної лунки застигає у рідині у вигляді гранул кулястої форми. При пробі рідини утворюється іонізований канал провідності, по якому проходить уся енергія імпульсу. При цьому частина енергії виділяється в рідині у вигляді ударної хвилі й кавітаційної бульбашки. Інша частина енергії виділяється на електродах у вигляді теплової енергії внаслідок проходження струму через електроди (до 30–40% енергії, яка виділяється в іскровому проміжку).

Електроерозійний процес є електротермічним. Нагрівання поверхні електродів створюється в результаті бомбардування анода електронами й катода – позитивними іонами. Спочатку розряд обумовлений іонами рідини, потім – іонізованими парами металу. Температура каналу іскри досягає 40000 °С, температура на поверхні металу електрода 10000 °С.

При електроерозійній обробці використовуються іскровий і дуговий електричні розряди. При електроіскровій обробці переважає іскровий розряд, коли діаметр каналу значно менше, ніж при дуговому розряді, і виникає значна концентрація енергії на електроді, при цьому переважає механізм руйнування випаровуванням.

При електроімпульсній обробці переважає дуговий розряд. При дуговому розряді різко знижується перегрів металу й перехід його в пароподібний стан, тому що температура каналу дугового розряду на 5000–6000 градусів менше, ніж при іскровому розряді. Тому основним

механізмом руйнування матеріалу електрода при електроімпульсній обробці є видалення металу в краплинно-рідинному стані.

При електроконтактній обробці руйнування оброблюваного матеріалу відбувається під впливом дугових розрядів, які приводять до видалення металу в краплинно-рідинному стані або в результаті нагрівання й подальшого розплавлення матеріалу під дією електричного струму. Характер протікання електроерозійного процесу, кількість і склад матеріалу, що виділяється з ерозійної лунки, швидкість його видалення залежать від різних параметрів імпульсів електричного струму.

Основними параметрами є: тривалість, скважність, амплітуда й частота.

Тривалість імпульсу визначає час дії імпульсу електричного струму (його тривалість). При електроерозійній обробці використовуються імпульси тривалістю від 10^{-7} до 10^{-1} с. Імпульси тривалістю $\tau < 10^{-4}$ с переважно використовуються в електроіскровій обробці, а тривалістю $\tau > 10^{-4}$ с – в електроімпульсній.

При електроерозійній обробці використовується діапазон частот 100–2000 кГц.

Амплітуда імпульсів струму при електроерозійній обробці змінюється від часток ампера до десятків тисяч ампер. Амплітуди імпульсів напруги змінюються в порівняно широкому діапазоні (від десятків до декількох сотень вольтів).

Електроерозійна обробка, як правило, ведеться в робочій рідині, яка є діелектричним середовищем.

Робоча рідина в процесі електроерозійної обробки виконує ряд функцій:

- 1) рідина сприяє процесу диспергуванню продуктів ерозії, утворення кулястої форми гранул. Захват часток рідиною перешкоджає також осадженню продуктів ерозії одного електрода на протилежному;
- 2) робоча рідина видаляє продукти ерозії із зони обробки, очищає міжелектродний проміжок і сприяє стабільному протіканню процесу;
- 3) робоча рідина охолоджує електроди. Важливою обставиною є також те, що робоча рідина різко збільшує електричну міцність міжелектродного зазору.

Тому до робочої рідини пред'являються наступні вимоги:

- 1) невисока в'язкість і безпека в експлуатації;
- 2) хімічна нейтральність до матеріалу інструмента-електрода й деталі;
- 3) висока стійкість у процесі обробки;
- 4) надійні електроізоляційні властивості та нетоксичність;
- 5) невисока вартість.

При електроімпульсній обробці найбільш часто застосовують індустріальне 12 і трансформаторне масла, при електроіскровий – гас і воду.

7.2. Електроіскрова та електроімпульсна обробка

Електроіскрова обробка широко застосовується для обробки деталей із твердих сплавів та інших струмопровідних матеріалів, які важко оброблюються «класичними» методами обробки різанням. Вона використовується при виготовленні порожнин, наскрізних отворів складної конфігурації, для обробки зовнішніх поверхонь різного профілю, вирізання вузьких щілин і пазів, виконання операцій таврування, видалення зламаного інструмента тощо. Електроіскровий метод забезпечує одержання прецизійних отворів, щілин при виготовленні сит, діафрагм, сіток, фільтер, штампів, інших відповідальних деталей машинобудування, приладобудування, мікроелектроніки, суднобудівної, інструментальної й інших галузей промисловості.

Електроіскрова обробка характеризується використанням іскрових розрядів малої тривалості ($\tau = 10^{-4} \dots 10^{-7}$ с). Енергія кожного імпульсу невелика (4–5 Дж). Електроіскрова обробка виконується при прямій полярності підключення електродів: електрод-інструмент є катодом, електрод-заготовка – анодом.

Залежно від режиму електроіскрової обробки (оздоблювальний, чистовий, чорновий) продуктивність електроіскрової обробки становить 20–800 мм³/хв.

Електроіскрова обробка забезпечує досить високу якість обробленої поверхні. Шорсткість обробленої поверхні зменшують, знижуючи енергію імпульсу за рахунок збільшення частоти проходження цих імпульсів і зниження середньої потужності, що вводиться в зону обробки.

Оскільки при електроіскровій обробці в зоні обробки реалізується значна теплова енергія, на обробленій поверхні утворюється дефектний шар (зі зміненою структурою), товщина якого залежно від режимів обробки становить 0,15–0,35 мм.

Точність електроіскрової обробки залежить від точності й похибок настроювання верстата, установки заготовки й електрода-інструмента, матеріалу електродів, точності виготовлення електрода-інструмента. При виборі оптимальних умов обробки досяжна точність електроіскрової обробки 0,005–0,2 мм.

Оброблюваність металів при електроерозійній обробці залежить від теплофізичних властивостей металів і електричних параметрів процесу.

При електроіскровій обробці оброблюваність залежно від складу матеріалу коливається незначно.

Переваги електроіскрової обробки перед іншими: високі точність обробки і якість обробленої поверхні, незначна глибина дефектного шару, можливість порівняно легкої автоматизації й механізації процесу й зміни режимів обробки в широких межах.

До недоліків обробки слід віднести порівняно низьку продуктивність обробки, досить високе зношування електродів-інструментів, порівняно високу вартість устаткування для реалізації обробки.

Області застосування електроімпульсної обробки досить широкі. Цей метод використовують, як правило, у тих випадках, коли потрібна висока продуктивність обробки при порівняно невисоких точності обробки і якості обробленої поверхні деталі. Метод успішно застосовується для виготовлення кувальних, згинальних штампів, прес-форм і ливарних форм, одержання порожнин складної форми в різних деталях, виготовлених із загартованих сталей, твердих сплавів, струмопровідних матеріалів, які важко піддаються обробці різанням. При електроімпульсній обробці використовуються імпульсні дугові розряди великої тривалості ($\tau > 10^{-4} \dots 10^{-1}$ с), великої енергії (до декількох десятків джоулів). Полярність електродів при електроімпульсній обробці зворотна: інструмент є анодом, заготовка – катодом.

Електроімпульсна обробка визначається тими ж технологічними параметрами, що й електроіскрова. Характер залежностей цих параметрів від режимів електроімпульсної обробки багато в чому подібний характеру аналогічних залежностей при електроіскровій обробці.

Електроімпульсна обробка характеризується більшим зніманням матеріалу в одиницю часу. Залежно від потужності джерела живлення продуктивність електроімпульсної обробки може досягати 12000–25000 мм³/хв.

Оброблюваність матеріалу електроімпульсним методом залежить від його властивостей. Наприклад, жароміцні сталі, нержавіючі сталі, магнітні сплави, алюміній і його сплави краще піддаються обробці, ніж вуглецеві сталі. Погано обробляється мідь і її сплави. Оброблюваність загартованих сталей на 25–30% вища, ніж незагартованих.

Установлено, що якість поверхні деталей із загартованої сталі вища, ніж деталей із незагартованої сталі.

У результаті термічного впливу імпульсів великої енергії на матеріал його поверхневі шари витримують структурні зміни.

Час чорнової електроімпульсної обробки поверхонь, площа яких не перевищує 200 см², приблизно пропорційний глибині прошивання й майже не залежить від площі.

Час чистової електроімпульсної обробки, при якій сила робочого струму не може підвищуватися, тому що обмежується вимогою високої якості обробленої поверхні, збільшується пропорційно її площі.

Електроімпульсна обробка має наступні переваги:

- 1) висока продуктивність;
- 2) широкий діапазон зміни режимів обробки;
- 3) можливість автоматизації й механізації процесу обробки;
- 4) мале зношування електродів-інструментів.

Недоліки електроімпульсної обробки:

- 1) низька якість обробленої поверхні й порівняно невисока точність;
- 2) значна глибина дефектного шару;
- 3) порівняно висока вартість устаткування.

Інструменти для електроіскрової й електроімпульсної обробки.

При електроіскровій і електроімпульсній обробці можливі різні схеми обробки деталі (рис. 7.2.1).

Найбільш часто обробка порожнин здійснюється за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми електрода (рис. 7.2.1, а).

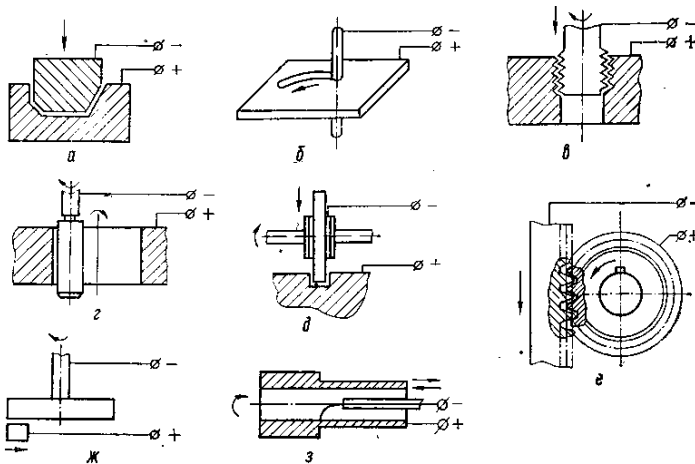


Рис. 7.2.1. Схеми обробки деталей

Для виконання розрізних операцій застосовується електрод-дріт, що переміщається відносно деталі по заданій траєкторії (рис. 7.2.1, б). Крім руху подачі інструменту може бути наданий додатковий рух для виконання процесу формоутворення деталі. Завдяки цим додатковим рухам можна нарізати різі (рис. 7.2.1, в), виконувати внутрішнє шліфування (рис. 7.2.1, г), вирізати пази (рис. 7.2.1, д), нарізати зуби (рис.

7.2.1, е), виконувати плоске шліфування (рис. 7.2.1, ж), тонке внутрішнє шліфування (рис. 7.2.1, з).

Залежно від схеми формоутворення деталі й методу обробки застосовують різні інструменти. Розрізняють профільовані й непрофільовані інструменти. При використанні профільованого електрода-інструмента в оброблюваній деталі відбивається частково або повністю форма електрода-інструмента. Формоутворення деталі за допомогою непрофільованого електрода-інструмента здійснюють, надаючи інструменту-електроду або оброблюваній деталі переміщення за певним законом.

Профільований (фасонний) електрод-інструмент складається з робочої частини, поверхні якої визначають форму профілю обробки, і допоміжних частин, що служать для кріплення інструмента і його базування. Непрофільований електрод – це дріт різного діаметра.

У якості матеріалів електродів-інструментів використовують мідь марок М1 і М2, латунь, алюмінієві сплави марок Д1, АК7, АЛ3, сірий чавун, вольфрам. Найбільш широко при електроіскровій обробці застосовують латунь ЛС-59. Латунні й мідні електроди забезпечують гарні результати обробки, однак інструменти із цих матеріалів піддаються досить великому зношуванню.

Розміри профільованого електрода-інструмента визначаються залежно від схеми формоутворення деталі, величини припуску під наступну обробку, припустимої похибки електроерозійної обробки. При цьому необхідно враховувати величину міжелектродного зазору (розміри електрода повинні бути менше розмірів деталі на подвійну величину зазору).

Обробка великих кувальних штампів – один з типових випадків застосування електроімпульсного методу обробки. При виготовленні штампа до 60% усієї трудомісткості становить обробка формотворних порожнин.

Застосування електроімпульсної обробки замість слюсарно-механічної дає можливість проводити обробку попередньо загартованих заготовок штампів. Найбільш широко електроімпульсний метод обробки впроваджений на підприємствах автотракторної промисловості при виготовленні штампів на шатуни й кришки шатунів, хрестовини диференціала, колінчаті вали.

Обробка робочого колеса турбіни електроімпульсним методом знижує трудомісткість виготовлення в 10–12 разів у порівнянні із фрезеруванням.

При виготовленні турбінних і компресорних лопаток застосування електроімпульсної обробки як попередньої (чорнової) у комбінації з наступною електрохімічною дає можливість практично повністю

виключити з технологічного процесу різальний інструмент і значно знизити собівартість і трудомісткість виготовлення.

Можна одержувати канали прямокутні, еліптичні, розміщати їх у важкодоступних місцях виключати зовнішні трубопроводи. Можливість з'єднання робочих порожнин у деталях з більшою кількістю каналів без додаткових свердлінь і технологічних заглушок підвищує продуктивність праці при проектуванні й виконанні гідро- і пневмоапаратури, створює передумови для підвищення компактності агрегатів, герметичності з'єднань.

Електроімпульсна обробка дозволила знизити витрати праці у 2–3 рази у порівнянні з механічною обробкою. При обробці валів діаметром 200–400 мм і довжиною 600–2500 мм цим методом можна одержати шорсткість від 10 до 300 мкм. Продуктивність обробки валків білого зносостійкого чавуну при максимальній шорсткості й площі обробки 12000–15000 мм² перебуває в межах 1500–2000 мм³/хв.

Оскільки електроімпульсна й електроіскрова обробка здійснюється практично без прикладання зусиль до деталі, їх успішно застосовують для виготовлення отворів, пазів у тонкостінних деталях типу фільтрів, сит, бандажів тощо. При цьому широко використовується багатоінструментальна обробка (одночасно можна обробляти до декількох тисяч отворів і пазів за один прохід).

За принципом копіювально-прошивальних операцій трубчастим електродом (електроерозійним руйнуванням залишків інструмента) здійснюють електроерозійне видалення зламаного інструмента (мітчиків, свердел та ін.) Швидкість прошивання трубчастим електродом у цьому випадку досягає 2–3 мм/хв при діаметрі інструмента 3–25 мм. Електроерозійне видалення зламаного інструмента значно знижує брак і собівартість виготовлення продукції, особливо при випуску великогабаритних деталей.

Розрізні операції дротом електродом поширені на багатьох підприємствах машинобудівної, приладобудівної, електронної промисловості. При цих операціях обробка ведеться непрофільованим електродом-дротом, постійно поновлюваним перемотуванням. Швидкість перемотування дроту залежить від його діаметра, матеріалу електрода, оброблюваної деталі й інших факторів. Оптимальна швидкість перемотування, наприклад, мідного дроту діаметром 0,15 мм, при обробці твердого сплаву ВК-20 товщиною 15 мм знаходиться у межах 3 мм/хв. Діаметр дроту визначається шириною різа, яка дорівнює сумі діаметра й подвоєної величини міжелектродного проміжку. Найкращим матеріалом для дротового електрода є мідь. Однак дріт діаметром менш 0,08 мм важко застосовувати через недостатню міцність. У таких випадках застосовують вольфрамовий або молібденовий дріт діаметром 0,025–

0,040 мм. Існуюче устаткування забезпечує продуктивність обробки до 10 мм²/хв.

Обробка непрофільованим електродом застосовується для розрізування високоточних деталей, для прорізання тонких прямих і фігурних щілин і наскрізних отворів постійного перетину, для виготовлення сталевих і твердосплавних матриць і вирубних штампів, фасонних різців та іншого інструмента.

Технологічні операції електроіскрової й електроімпульсної обробки можуть виконуватися як на універсальних, так і на спеціальних верстатах. Найбільше застосування в промисловості одержали універсальні верстати для копіювально-прошивальних операцій. Універсальні верстати й установки для копіювально-прошивальних операцій мають вертикальне компонування, при якому деталь закріплюється на робочому столі, оснащеному піднімальною ванною для діелектричного середовища, а шпindel верстата забезпечує прямолінійне переміщення електрода-інструмента. У верстатах є система подачі й чищення робочої рідини (насос, фільтри й відстійники); система стеження, яка автоматично або напівавтоматично забезпечує оптимальну величину міжелектродного зазору; схеми блокування й захисту від короткого замикання. У деяких верстатах шпindelю з електродом-інструментом надається обертання, що розширює коло виконуваних технологічних операцій.

На базі універсального копіювально-прошивального верстата моделі 4723 створений спеціальний двошпindelний верстат 4723Д. Він призначений для обробки робочих коліс турбін діаметром до 300 мм для обробки лопаток турбінних коліс, а також для обробки штампів та інших деталей.

Для виготовлення високоточних отворів в деталях паливної апаратури електроіскровим прошиванням випускаються спеціальні верстати, що працюють у напівавтоматичному й автоматичному режимах. Наприклад, верстат моделі 34М2 використовується для одержання отворів діаметром 0,15–0,4 мм у дизельних розпилювачах. На ньому також можна обробляти різноманітні циліндричні й конічні деталі з різною кількістю отворів, розташованих по колу. Час обробки отворів діаметром 0,3 мм на глибину 0,7 мм становить 15 сек.

Вирізання дротовим електродом може здійснюватися як по копію, так і з використанням програмного керування.

7.3. Електроконтактна обробка

Електроконтактна обробка як один із різновидів електроерозійних методів обробки матеріалів застосовується для виготовлення деталей з важкооброблюваних струмопровідних матеріалів. Цей метод використовується для виконання розрізних операцій, точіння, фрезерування, шліфування деталей, обдирання злитків. Технологічні характеристики електроконтактної обробки (продуктивність, точність обробки, якість обробленої поверхні, оброблюваність різних матеріалів) визначаються режимами обробки (електричними параметрами процесу), тими умовами (зокрема, середовищем), у яких відбувається обробка, властивостями оброблюваних матеріалів. При цій обробці реалізується механічний метод генерування імпульсів, тобто в зоні контакту двох струмопровідних поверхонь виділяється тепло як через підвищений електричний опір, так і завдяки електричному розряду.

Залежно від середовища, у якому протікає процес, розрізняють електроконтактну обробку двох видів: у повітрі й у рідині (воді). У першому випадку в зону обробки можна підвести великі потужності (до 300–500 кВт) при струмі до 15000–20000 А. Однак, у цих умовах утворюється дефектний шар значної товщини. Товщина дефектного шару значно знижується при обробці в рідині. Вода сприяє підвищенню якості обробленої поверхні, кращому охолодженню заготовки й інструмента, зменшує приварювання виплавленого металу до поверхні заготовки. Обробка у воді ведеться при порівняно невеликих потужностях (до 50–70 кВт) і струмах (до 2000–3000 А), при невисокій продуктивності. Застосовується в основному для грубої (чорнової) обробки металів.

Ефективність знімання металу при електроконтактній обробці залежить від теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу. Найкраще піддаються обробці жароміцні сталі. Електроконтактна обробка має високу продуктивність. При потужності установки близько 500 кВт знімання металу складає 450 кг/год. Зі збільшенням потужності установки продуктивність електроконтактної обробки зростає (рис. 7.3.1).

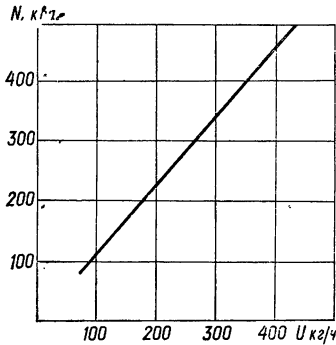


Рис. 7.3.1. Залежність продуктивності електроконтактної обробки U від потужності установки N

У якості інструмента для електроконтактної обробки в більшості операцій застосовують профільні диски (рис. 7.3.2).

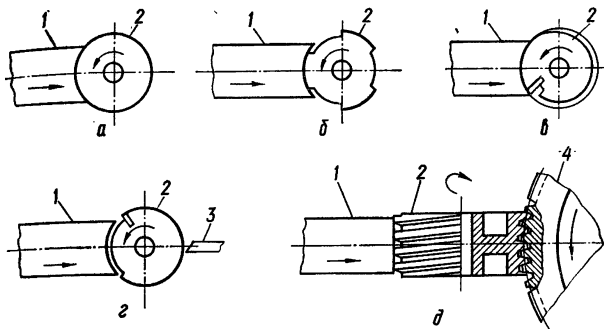


Рис. 7.3.2. Схема електроконтактної обробки

Метал із заготовки видаляється шарами, ширина яких дорівнює товщині диска або його подачі на прохід, а товщина – глибині врізання.

Залежно від потужності джерела живлення дисковим інструментом можна видаляти шари металу перетином 6–7 см² і більше.

Інструментами при зовнішньому й плоскому електроконтактному шліфуванні є диски із сірого чавуну, для внутрішнього шліфування – круги із міді або іншого ерозійностійкого матеріалу. Щоб зменшити зношування інструментів, їм надають підвищені швидкості обертання (до 40–60 м/с). При цьому відносно зношування дискових електродів, наприклад, з

вуглецевих конструкційних сталей при роботі в рідині становить усього 3–5% (сила струму 2000 А), а в повітрі 0,8–1,2% (сила струму до 15 000 А).

Для охолодження електрода-інструмента використовується обдув його повітрям або за допомогою рідини. У якості рідини можна використовувати воду, 1–3%-у емульсію, мінеральні масла і їх суміші.

Подача електрода-інструмента при електроконтактній обробці змінюється в межах 0,75–4 м/хв.

Основні переваги електроконтактної обробки перед іншими методами: висока продуктивність; можливість подальшого підвищення продуктивності створенням потужних джерел живлення; можливість широкого варіювання режимами обробки; можливість обробки на постійному й змінному струмі; економічність для чорнових заготівельних операцій; можливість проведення обробки як у повітрі, так і в рідині; невисокі тиски інструмента на заготовку (порядку 0,3–0,5 кг/см²); простота устаткування.

Недоліки: невисока якість обробленої поверхні й більші розміри зони термічного впливу при твердих режимах обробки; підвищений шум верстатів; необхідність розробки й застосування захисних засобів від розплавленого металу й світлового випромінювання.

Електроконтактний верстат або установка містить у собі наступні елементи: джерело живлення (понижувальний трансформатор типу ТК-16-31, ТРП-1200 або іншого типу), шпindelний вузол, що забезпечує необхідні рухи електрода-інструмента, механізм кріплення й переміщення оброблюваної заготовки

7.4. Електрохімічна обробка

Електрохімічна обробка матеріалів заснована на використанні процесів електролізу, тобто хімічних перетворень, які спостерігаються на поверхні електродів у середовищі електроліту. При цій обробці заготовка підключається до анода, а інструмент – до катода.

Електрохімічна обробка – високопродуктивний технологічний процес, який успішно застосовується у різних галузях промисловості.

Електрохімікогідрравлічну й електрохімікомеханічну обробку на багатьох підприємствах використовують для одержання складних порожнин у штампах, пресформах, ливарних формах, для виготовлення лопаток і коліс турбін, для шліфування, розрізування деталей, видалення зламанних інструментів тощо.

В основі процесу електрохімічної обробки лежить явище анодного розчинення металу. В електролітах молекули речовини розпадаються на

електрично заряджені частки – іони. Електроліт є електрично нейтральним.

Без зовнішнього електричного поля іони в електроліті рухаються хаотично, і ефекту електричного струму не спостерігається. Якщо металеві провідники в електроліті підключити до джерела постійного струму, то в електроліті виникне спрямований рух іонів. Позитивні іони (катиони) будуть рухатися до катода, негативні (аніони) – до анода. Поблизу електродів поступово підвищується концентрація іонів протилежного знака. У результаті на катоді починається відновлення катионів, на аноді – окиснення металу, тобто анодне розчинення.

Електрохімікогідрравлічна обробка є процесом спрямованого анодного розчинення струмопровідного матеріалу в середовищі проточного електроліту, який видаляє продукти анодного розчинення. Схема процесу показана на рис. 7.4.1.

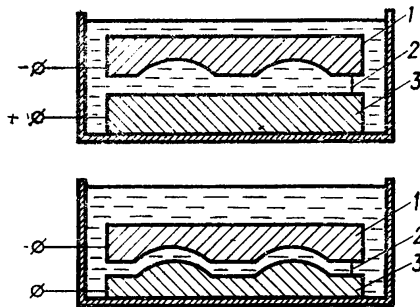


Рис. 7.4.1. Схема електрохімікогідрравлічної обробки

Катод-інструмент і анод-заготовка 3 перебувають у середовищі проточного електроліту й підключені до джерела постійного струму великої сили й низької напруги. Спочатку ділянки обробки профілю інструмента-катода розташовані на різних відстанях від поверхні заготовки-анода 3. Від цих відстаней 2 залежить сила струму, що протікає через кожну ділянку інструмента й відповідну йому ділянку оброблюваної поверхні заготовки. Чим більше сила (щільність) струму, тем вище швидкість анодного розчинення ділянки поверхні деталі, тим інтенсивніше видаляється метал з анодної поверхні. Навпаки, анодна поверхня, більш віддалена від поверхні інструмента, розчиняється повільніше. У результаті анодного розчинення зазори між електродами вирівнюються, конфігурація поверхні анода-заготовки поступово змінюється, набуваючи форму, що представляє собою дзеркальне відображення електрода-інструмента.

Електрохімікогідравлічна обробка застосовується для формоутворення деталей складної форми, прошивання отворів, виготовлення фасонних пазів і щілин, обробки поверхонь типу тіл обертання тощо. Схема установки для електрохімікогідравлічної обробки показана на рис. 7.4.2.

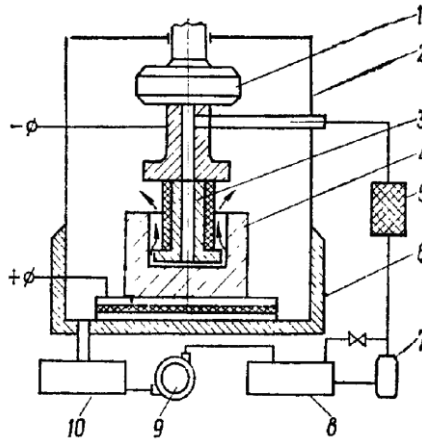


Рис. 7.4.2. Схема установки для електрохімікогідравлічної обробки

Інструмент-катод 3 закріплений у шпинделі. Заготовка-анод 4 встановлена на робочому столі 6. Робоча зона обмежена кожухом 2. Електроліт з резервуара 8 насосом 7 через фільтр 5 подається в міжелектродний зазор.

Електроліт із продуктами анодного розчинення стікає в резервуар 10, звідки після відстою надходить у центрифугу 9 і потім, повністю очищений, знову включається в робочий цикл. При обробці шпинделю разом з електродом-інструментом надається рух подачі. Спеціальна система забезпечує сталість міжелектродного зазору. У міру переміщення електрода-інструмента здійснюється анодне розчинення заготовки-анода, що приводить до утворення порожнини заданої форми й розмірів.

На продуктивність процесу впливає щільність струму, тип застосовуваного електроліту, вихідна структура матеріалу заготовки. Зміна питомого знімання металу для різних матеріалів, що перебувають у різному вихідному стані, у трьох типах електроліту показана у табл. 7.4.1.

Точність обробки залежить від умов електролізу, гідродинамічних характеристик потоку електроліту, конструкції інструмента-катода, способу подачі електроліту в робочу зону й ряду інших факторів. Крім того, на точність обробки можуть помітно впливати стан і структура матеріалу заготовки, шорсткість робочої поверхні інструмента. На точність

обробки також впливає щільність електричного струму й мінливість міжелектродних зазорів. При щільності струму 30 А/см² точність складає ±0,15 мм, а при щільності струму 120–130 А/см² – підвищується до ±0,08 мм.

Таблиця 7.4.1

Питоме знімання матеріалу

| | Видалення металу, мм ³ /(А·год), у розчині | | |
|-------------------|---|-----------------------|-------------------------------------|
| | 25% NaCl | 30% NaNO ₃ | 15% Na ₂ SO ₄ |
| Чавун легований | 114,3 | 7,5 | 11,4 |
| Сталь: | | | |
| 45 | 103,5 | 80,1 | 11,4 |
| 40Х загартована | 123 | – | – |
| 40Х незагартована | 120 | – | – |
| У10 загартована | 114,3 | 50,2 | 7,5 |
| У10 незагартована | 103,5 | 34,2 | 11,4 |
| Латунь Л62 | 191,5 | 144,5 | 147,9 |
| Алюміній | 139,5 | 145,0 | 11,1 |

На шорсткість поверхні впливають фізико-хімічні властивості вихідної поверхні заготовки, склад, властивості й стан електроліту, швидкість руху електроліту в міжелектродному зазорі, склад і стан продуктів анодного розчинення. Шорсткість поверхні значною мірою залежить від щільності технологічного струму й швидкості електроліту. Чим вище щільність струму, тим менше висота мікронерівностей і вище клас чистоти обробленої поверхні. При збільшенні швидкості електроліту шорсткість знижується. Електрохімікогідралічна обробка змінює характер мікрорельєфу, нерівності мають округлу форму, усуваються концентратори напруг (збільшується зносостійкість поверхні деталей, підвищується їх точність і надійність).

Для зменшення шорсткості обробленої поверхні рекомендується наступне:

1) виконувати обробку деталей при мінімальних міжелектродних зазорах (0,1–0,3 мм) і при високих щільностях струму (не менш 15–20 А/см²);

2) виконувати обробку при невисоких температурах електроліту (не вище 30–35 °С);

3) застосовувати різні добавки до електроліту для підвищення його в'язкості.

Переваги електрохімікогідралічної обробки:

- 1) відсутність механічного контакту між інструментом і оброблюваним виробом;
- 2) можливість обробки нежорстких деталей;
- 3) відсутність задирок у результаті обробки;
- 4) практична відсутність зношування інструмента й нагрівання оброблюваної деталі;
- 5) відсутність впливу на швидкість обробки таких параметрів, як твердість, крихкість, в'язкість оброблюваного матеріалу;
- 6) відсутність зміцнення матеріалу в результаті обробки, а також необхідності в наступних операціях відпалу, загартування, зняття задирок;
- 7) відсутність слідів інструмента на обробленій поверхні;
- 8) більша продуктивність процесу в порівнянні з іншими електрофізичними методами (до 25 кг/год);
- 9) безшумність обробки внаслідок відсутності іскроутворення й вібрації;
- 10) відсутність необхідності в операторах високої кваліфікації для роботи на устаткуванні;
- 11) безпека напруги застосовуваного струму.

Недоліки електрохімікогідралічної обробки:

- 1) виникнення корозії оброблених деталей, викликане застосуванням у якості електроліту водяних розчинів солей;
- 2) труднощі утилізації шламу;
- 3) порівняно невисока точність обробки (при прошиванні порожнин, обробці лопаток $\pm(0,1-0,2)$ мм, при обробці тіл обертання $\pm 0,025$ мм).

Найбільш характерний процес електрохімікогідралічної обробки – одержання різних порожнин (прошивання глухих і наскрізних отворів, обробка порожнин складної форми, прошивання глибоких отворів). У цьому випадку електрод-інструмент являє собою деталь з отвором, через отвір якої прокачується електроліт. Схема обробки порожнини показана на рис. 7.4.3.

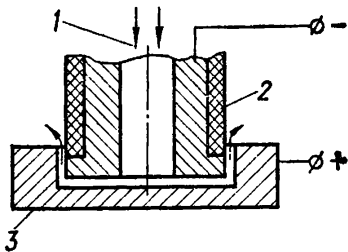


Рис. 7.4.3. Схема обробки порожнин

При виготовленні циліндричного отвору беруть електрод з мідної або латунної трубки й покривають зовні шаром ізоляції. Ізолювати неробочі ділянки поверхні інструмента необхідно для спрямованого й локалізованого знімання металу.

Електрохімікогідрравлічне прошивання дає можливість одержати в аноді-заготовці отвір не тільки циліндричної, але й будь-якої іншої форми. Форма отвору визначається профілем інструмента катода.

У деталях з вольфрамового сплаву успішно прошивають отвори діаметром 1,27 мм на глибину до 300 мм. При цьому швидкість подачі інструмента досягає декількох сотих міліметрів у секунду.

Для прошивання глибоких отворів застосовують електроди з латуні й нержавіючої сталі трубчасті форми з подачею електроліту через центральний отвір. Через незадовільну твердість латунних трубок їх можна застосовувати при прошиванні отворів діаметром не менш 10–12 мм.

Широко електрохімікогідрравлічну обробку застосовують для виготовлення лопаток турбін. Необхідна точність, виготовлення лопатки перебуває в межах 0,05–0,15 мм. Лопатки виготовляють із жароміцних, жаростійких та корозійностійких матеріалів.

У промисловості застосовують дві схеми електрохімікогідрравлічної обробки лопаток.

По першій схемі заготовка й інструмент протягом усієї операції залишаються нерухомими, а міжелектродний зазор безупинно збільшується. Цю схему застосовують головним чином для видалення припуску із заготовки, яка отримана штампуванням або електроерозійним методом. При обробці лопаток нерухомими електродами швидкість формоутворення робочого профілю турбінних лопаток становить 0,2–0,3 мм/хв, а точність обробки $\pm 0,15$ мм.

Найбільш прогресивною й більш розповсюдженою в наш час є схема обробки, при якій формоутворення пера лопатки здійснюється рухомими інструментами-катадами.

Заготовка-анод установлюється між інструментами-катадами 6, які здійснюють зустрічне переміщення в напрямку до деталі 3. За допомогою вентиля 2, встановленого за розподільною камерою 7, створюється протитиск. Протитиск і наявність розподільних камер сприяє більш рівномірному потоку електроліту, що призводить до підвищення точності форми обробленої деталі. Корпус 5 ізолюваний від електродів-інструментів ізоляторами 4. За допомогою резервуара 10, насоса 9 і фільтра забезпечується прокачування електроліту через міжелектродний зазор. Манометр 8 призначений для контролю тиску електроліту в розподільній камері. З розподільної камери 7 електроліт прокачується під

тиском 5–6 кг/см² у міжелектродний зазор і попадає в таку ж камеру при виході із зазору.

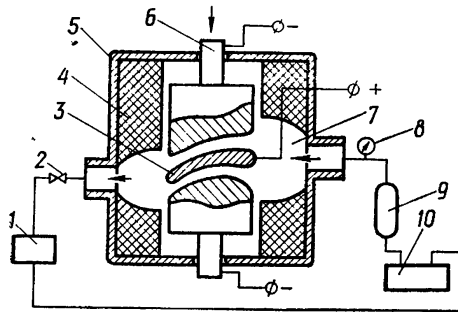


Рис. 7.4.4. Схема обробки лопатки рухомими електродами

Схема з рухомими електродами дозволила виключити з технологічного процесу електроерозійну обробку. За цією схемою виготовлення пера лопатки ведеться тільки електрохімікогідрравлічним методом за одну технологічну операцію. При обробці лопаток за схемою з рухомими електродами швидкість формоутворення робочого профілю лопаток становить 0,4–0,6 мм/хв при точності обробки до $\pm 0,1$ мм. Середній машинний час обробки лопаток турбіни становить 18–20 хвилин.

Електрохімікогідрравлічний метод можна застосовувати для виконання операцій різання різних важкооброблюваних матеріалів. Різання здійснюється фасонним (рис. 7.4.5, а) і обертовим з великою швидкістю дисковим електродом (рис. 7.4.5, б).

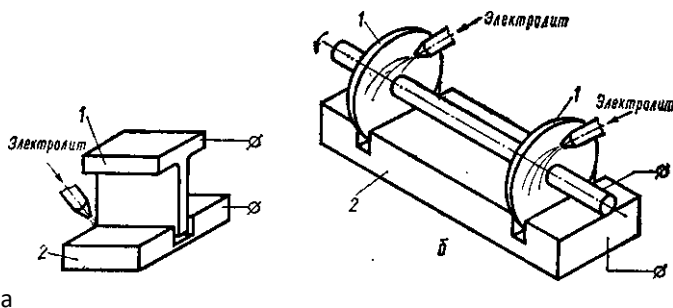


Рис. 7.4.5. Схема обробки пластинчастим (а) і дисковим (б) електродами

При різанні пластинчастим (плоским або фасонним) електродом обробка ведеться при тих же режимах, що й електрохімікогідрвлічне прошивання. Електроліт у зону обробки подається поливом через спеціальне сопло.

При обробці обертовим електродом швидкість обертання електрода-інструмента досягає 30 м/сек. У процесі анодного розчинення бере участь торцева поверхня електрода: бічні поверхні при цьому ізолюються. Ширина різа значною мірою залежить від конструкції електрода-інструмента й співвідношення товщини заготовки 2.

Для вирізання деталей складного контуру, а також для чистових операцій вирізання можна використовувати обробку електродом-дротом (рис. 7.4.6).

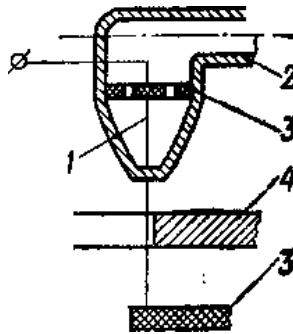


Рис. 7.4.6. Схема обробки електродом-дротом

При обробці заготовки 4 дріт натягається в спеціальному пристрої 3. Верхній його кінець закріплено в насадці 2, яка служить формуючим соплом для електроліту. Пристрій 3 з натягнутим дротом переміщається за заданим законом, обумовленим формою різа. Електроліт під тиском 12–15 кПа/см² подається через сопло 2 уздовж дроту, заповнюючи міжелектродний зазор. Цим способом доцільно розрізати листовий матеріал товщиною не більш 20 мм.

7.5. Електрохімікомеханічна обробка

При електрохімікомеханічній обробці продукти анодного розчинення видаляються із зони обробки механічним шляхом за допомогою абразиву й несуться потоком електроліту. Існує багато різноманітних та іноді

суперечливих назв методів, що входять у дану групу: електроабразивна, анодно-абразивна, електроалмазна обробка, електрохімічне шліфування, електроабразивне шліфування, електроалмазне шліфування, алмазно-електролітична обробка.

Електрохімікомеханічну обробку можна застосовувати для виконання операцій шліфування, полірування, хонінгування деталей з важкооброблюваних матеріалів, заточування металорізального інструмента тощо.

Принципова схема електроабразивної обробки наведена на рис. 7.5.1.

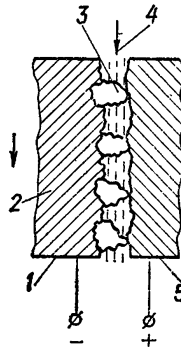


Рис. 7.5.1. Схема обробки електроабразивним кругом

Електропровідний абразивний круг, що складається з абразивних зерен 3, електропровідного наповнювача (графіту) і зв'язки (бакеліту) 2, з'єднаний з негативним полюсом джерела струму (катодом), а оброблювана деталь 5 – з позитивним полюсом (анодом).

У зазор між оброблюваною поверхнею й кругом подається електроліт 4. Абразивні зерна круга виступають із електропровідної зв'язки й створюють зазор між оброблюваною поверхнею й зв'язкою круга. При проходженні струму через електроліт, що заповнює зазор, відбувається процес анодного розчинення матеріалу деталі. Продукти анодного розчинення видаляються зернами абразиву, а електролітом – із зони обробки.

Працездатність електроабразивного круга підтримується внаслідок його самозагострювання в процесі роботи. Самозагострювання відбувається через викришування зношених абразивних зерен, а також через руйнування зв'язки й наповнювача при електричних розрядах.

Схема обробки електроабразивним кругом показана на рис. 7.5.2.

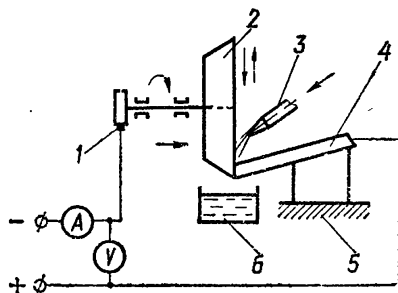


Рис. 7.5.2. Схема обробки електроабразивним кругом

Оброблювана деталь 4 закріплюється на столі 5 і підключається до позитивного полюса джерела струму. Електроабразивний круг 2 є негативним електродом. Електроліт 3 через спеціальне сопло подається в робочу зону. Крім головного робочого руху (обертання), електроду-інструменту 2 надається допоміжний рух подачі. У якості інструмента можна використовувати металоабразивні круги, виготовлені пресуванням суміші абразивного (електрокорунд) й металевих порошоків. У якості електропровідного наповнювача застосовують суміш мідного й залізного порошку з абразивом у співвідношенні 1:1.

Для кругів на бакелітовій зв'язці з домішкою графіту співвідношення абразиву, графіту і зв'язки складає 4:1,25:1. Краща якість при обробці досягається при роботі з кругами з абразивів середньої м'якості й зернистості – електрокорунду нормального зернистості 25–16.

У якості електроліту найбільш часто використовують водяний розчин рідкого скла, розчин бури, азотнокислого натрію або калію. Для запобігання корозії устаткування в електроліт додається антикорозійна добавка (звичайно нітрит натрію).

Продуктивність і якість обробки залежить від окружної швидкості V електроабразивного круга. Оптимальною швидкістю слід вважати $V = 15\text{--}30$ м/сек. При менших швидкостях знижується інтенсивність знімання матеріалу, при більших – утрудняється подача електроліту в зону обробки. Щоб продуктивність була найвищою, слід підтримувати постійним тиск круга на деталь (приблизно $2\text{--}2,5$ кг/см²). При більших тисках продуктивність не збільшується, а точність обробки знижується. При малому тиску збільшується зазор між кругом і деталлю, що знижує продуктивність.

Процес обробки можна виконувати периферією кола, чашковими кругами (торцем круга) або спеціальним інструментом заданої форми.

Електроабразивну обробку рекомендується застосовувати для профілювання фасонних твердосплавних різців. При цьому на глибині

профілю до 10 мм можна встановлювати подачу до 2 мм/хв при досяжній точності по профілю 0,02–0,05 мм. Економічно вигідно застосовувати цю обробку при профілюванні фасонних деталей з магнітних, жароміцних і титанових сплавів одиничного й дрібносерійного виробництва, а також при обробці тонкостінних деталей.

Режими попередньої обробки наступні:

| | |
|-------------------------------------|-------|
| Робоча напруга, В | 30–32 |
| Щільність струму, А/см ² | 30–50 |

Режими доводочної обробки наступні:

| | |
|-------------------------------------|-------|
| Робоча напруга, В | 12–15 |
| Щільність струму, А/см ² | 5–10 |

Електроабразивне шліфування інструмента із швидкорізальної сталі типу Р9, Р18 доцільно проводити чашковими кругами з електрокорунду на металевій зв'язці, які забезпечують дуже високу продуктивність. Швидкість знімання металу при електроабразивному шліфуванні швидкорізальної сталі в 2–2,5 рази більше.

Стійкість інструмента, заточеного цим методом, в 1,2–1,5 рази вище, ніж абразивним. Останнє пояснюється тим, що при абразивному шліфуванні інструмент не нагрівається. При використанні в якості абразиву алмаза процес обробки значно інтенсифікується. Цю обробку доцільно застосовувати при заточенні твердосплавного інструмента, при плоскому й круглому шліфуванні твердосплавних заготовок, для виготовлення деталей вирубних штампів і пресформ, для виготовлення деталей з нержавіючих сталей і жароміцних сплавів.

Електроалмазна обробка – високопродуктивний процес, де висока інтенсивність знімання металу обумовлена високими щільностями струму (до 100 А/см²), які виникають за рахунок малих зазорів між алмазозносним кругом і деталлю (0,01–0,03 мм). На швидкість знімання металу при електроалмазному шліфуванні впливає концентрація алмаза в робочому шарі.

Найбільша швидкість знімання металу досягається при роботі з алмазними кругами 100%-ої концентрації. Зниження концентрації алмазного порошку до 25% призводить до зменшення швидкості знімання металу у 1,5 рази й збільшення зношування круга у 2 рази. Пористість круга й зернистість алмазного порошку не впливають на продуктивність методу. Щоб електроліт краще протікав, у шарі абразиву роблять канавки шириною 2–3 мм, глибиною до 1 мм. Наявність канавок в алмазозносному шарі круга збільшує щільність струму й забезпечує більш високу швидкість знімання матеріалу.

Збільшення швидкості обертання круга з 5–10 м/с до 20–25 м/с підвищує інтенсивність знімання матеріалу в 1,4–1,6 рази. Подальше збільшення швидкості приводить лише до незначного росту

продуктивності обробки. Оптимальна швидкість електроалмазного шліфування $V = 25\text{--}28$ м/с.

Тиск круга на деталь повинний бути в межах $3\text{--}5$ кг/см². Збільшення тиску, хоча й зменшує міжелектродний зазор, підвищує щільність струму й швидкість знімання матеріалу, але приводить до швидкого зношування круга, зниження його стійкості. Порівняльні технічні дані для алмазного й електроалмазного методів шліфування наведені в табл. 7.5.1.

Таблиця 7.5.1

| Показник | Шліфування | |
|-------------------------------------|------------|----------------|
| | Алмазне | Електроалмазне |
| Продуктивність, мм ³ /хв | до 20 | 750–1000 |
| Точність обробки, мм | 0,005–0,01 | 0,01 |
| Питома витрата алмаза, мг/г | 0,15–0,3 | 0,02–0,05 |

Заточення твердосплавного різального інструменту методом електроалмазного шліфування виключає можливість появи мікротріщин на різальних кромках, внаслідок чого його стійкість в 1,2–1,8 рази вище стійкості інструмента, заточеного алмазним шліфуванням.

Шліфування твердосплавного інструмента слід виконувати при наступних режимах:

робоча напруга, В 6–8
щільність струму, А/см² 80–100

У якості електроліту рекомендуються наступні водяні розчини:

1) 3–5% азотнокислого калію, 3–5% фтористого натрію, 0,3% нітриту натрію;

2) 5% азотнокислого калію і 10% нітриту натрію;

3) 10% азотнокислого калію й 5% нітриту натрію й ін.

Електрохімікомеханічне хонінгування застосовують для розмірної обробки циліндричних отворів. Схема верстата для електрохімікомеханічного хонінгування показана на рис. 7.5.3.

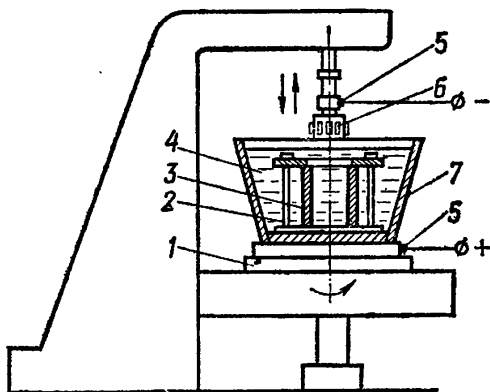


Рис. 7.5.3. Схема верстата для електрохімікомеханічного хонінгування

На обертовому столі верстата встановлене пристосування 2 для закріплення деталі 3. Пристосування з деталлю поміщено в бак 7 з електролітом 4. Бак і пристосування ізольовані від верстата. У шпинделі верстата закріплена спеціальна хонінгувальна головка 6 з електронейтральними притирами. На шпинделі й на пристосуванні встановлені контактні кільця 5 із щітками для струмопідводу.

У якості електронейтральних притирень використовують бруски, виготовлені з м'яких порід дерева, пластмаси, абразивні бруски (дрібнозернистий карборунд на керамічній зв'язці). Електролітом є водяний розчин фосфорнокислих і азотнокислих солей з добавкою абразиву. У якості абразиву застосовують окис хрому.

Циліндричні отвори хонінгують у дві операції. При першій операції до складу електроліту додають абразив М28. Час обробки 20 хв. Знімання металу при цьому на одну сторону 40 мкм. Для другої операції застосовують абразив у вигляді окису хрому. Знімання металу на одну сторону 6–8 мкм.

Режим електрохімікомеханічного хонінгування вибирають залежно від конкретних умов процесу.

Для електрохімікомеханічного хонінгування можна використовувати звичайні хонінгувальні або свердлильні верстати, модернізовані для електрохімікомеханічної обробки. Обробку рекомендується використовувати для хонінгування внутрішніх циліндричних поверхонь маложорстких тонкостінних деталей, виготовлених з важкооброблюваних матеріалів. Звичайне хонінгування деталей з високою продуктивністю веде до зниження точності обробки через більші деформації деталей під впливом зусиль різання.

Верстат оснащується джерелом струму силою до 1500 А при робочій напрузі 6–12 В й резервуаром для електроліту ємністю 200 л із шестерним насосом продуктивністю 30–40 л/хв при тиску 20 кг/см².

7.6. Ультразвукова обробка

Ультразвукові коливання для обробки матеріалів застосовують із початку п'ятдесятих років минулого століття. Під ультразвуковою обробкою розуміють таку, у якій процес видалення матеріалу здійснюється за допомогою інструмента, що коливається з ультразвуковою частотою. Обробка може відбуватися при частотах як ультразвукового, так і звукового діапазону. Однак оптимальні режими обробки забезпечуються при частотах 6–25 кГц (нижня межа ультразвукового діапазону). Тому метод і називають ультразвуковою обробкою.

Ультразвукова обробка розвивається у двох напрямках:

- 1) розмірна ультразвукова обробка матеріалів у середовищі абразивної суспензії;
- 2) накладення ультразвукових коливань на різальний інструмент при звичайних процесах обробки різанням.

Ультразвукову обробку успішно застосовують для виготовлення деталей із твердих важкооброблюваних матеріалів. Причому, на відміну від попередніх методів (електроерозійних, електрохімічних), ультразвукову обробку можна використовувати як для струмопровідних, так і струмонепровідних матеріалів.

Джерелом електричної енергії звукової або ультразвукової частоти можуть бути машинні й лампові генератори.

Серійно випускається кілька типів генераторів, які вбудовуються у верстати різних конструкцій.

Так, для верстатів середньої потужності випускають генератор типу УЗМ-1,5 з номінальною вихідною потужністю 1,5 кВт.

Електрична енергія ультразвукової частоти перетворюється у звукову енергію ультразвукових механічних коливань за допомогою спеціальних перетворювачів.

Найпоширеніші перетворювачі – магнітострикційні й п'єзокерамічні. Для промислового одержання ультразвукових коливань частотою 16–25 кГц застосовують, як правило, магнітострикційні перетворювачі.

Магнітострикція – це властивість феромагнітних тіл (залізо, нікель) під впливом магнітного поля змінювати свої розміри. Магнітострикційне подовження звичайно дуже мале, але при роботі в режимі гармонійних

коливань амплітуду останніх можна значно збільшити, використовуючи явище механічного резонансу.

У магнітострикційному перетворювачі під дією змінного електромагнітного поля ультразвукової частоти магнітостриктор змінює свою довжину, періодично розтягуючись (рис. 7.6.1, а) і стискаючись (рис. 7.6.1, б).

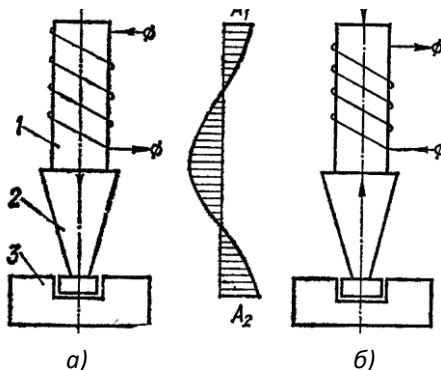


Рис. 7.6.1. Коливання магнітострикційного перетворювача

На рис. 7.6.1 показані епюри стискаючих і напруг розтягу у системі магнітостриктор 1 – концентратор-інструмент 2. Щоб зменшити втрати, сердечник перетворювача звичайно виготовляють з тонких пластинок магнітострикційного матеріалу. Для одержання резонансу довжину сердечника беруть кратною половині довжини звукової хвилі.

Магнітострикційні пакети (набори з тонких пластинок магнітострикційного матеріалу) перетворювачів при знаходженні в змінному електромагнітному полі ультразвукової частоти коливаються з невеликою амплітудою. Навіть на резонансному режимі амплітуда коливань торця магнітострикційного перетворювача не перевищує 5–10 мкм. Щоб збільшити амплітуду коливань до необхідної (30–80 мкм), до торця магнітострикційного перетворювача кріпиться концентратор 2, який концентрує звукову енергію на кінці меншого перетину. Концентратор з'єднує магнітострикційний перетворювач із інструментом. Концентраторам надають форму, яка забезпечує на торці інструмента максимально можливу амплітуду коливань. Форма інструмента, що коливається з ультразвуковою частотою, копіюється в матеріалі заготовки 3.

Найбільш широко при розмірній ультразвуковій обробці застосовують експонентний і сідчастий концентратори. У першому перетин по довжині

змінюється за експонентним законом – амплітуда коливань збільшується пропорційно відношенню діаметрів торців.

Під розмірною ультразвуковою обробкою розуміють кероване руйнування оброблюваного матеріалу в результаті імпульсного ударного механічного впливу інструмента на матеріал в абразивному середовищі. Принцип розмірної ультразвукової обробки показаний на рис. 7.6.2.

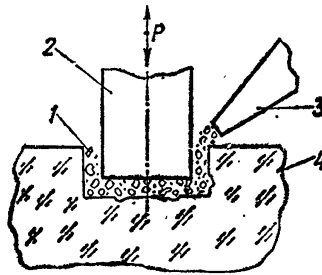


Рис. 7.6.2. Схема ультразвукової обробки

Інструмент 2 здійснює механічні коливання з частотою 4–30 кГц і амплітудою 0,01...0,06 мм. У робочу зону, тобто в зазор між торцем інструмента 2 і заготовкою 4 подається абразивна суспензія 3 – зерна абразиву у воді. Зерна 1 абразиву під дією ударів вібруючого інструмента поступово виконують обробку (виколують частки матеріалу). Розмір часток оброблюваного матеріалу, що виколується, невеликий, однак кількість ударів і зерен абразиву значна (до 20–100 тис. на 1 см^3), що призводить до порівняно інтенсивного видалення матеріалу. У результаті виколування часток матеріалу абразивом у заготовці копіюється форма робочого інструмента.

Дослідженнями встановлено, що при обробці матеріал знімається в основному внаслідок прямого удару торця інструмента по зернах абразиву, що лежать на оброблюваній поверхні.

Велике значення в руйнуванні матеріалу має кавітація. Кавітація полягає в утворенні й захопванні порожнин у рідині під впливом ультразвукових коливань. Порожнини утворюються в результаті розриву рідини під час півперіодів розтягання на так званих кавітаційних зародках, а захоплюються під час півперіодів стиску. При захопванні порожнини тиск у ній різко зростає (як при вибуху), що приводить до випромінювання імпульсів стиску.

Внаслідок занурювання зерен абразиву в матеріал під впливом інструмента на оброблюваній поверхні утворюються мікротріщини. Створюється зона напівзруйнованого матеріалу, яка тим більше, чим менше міцність і вища пористість та крихкість матеріалу. Абразивна

суспензія, проникаючи в пори, розклинає їх і під впливом кавітаційних явищ виносить продукти руйнування із зони обробки.

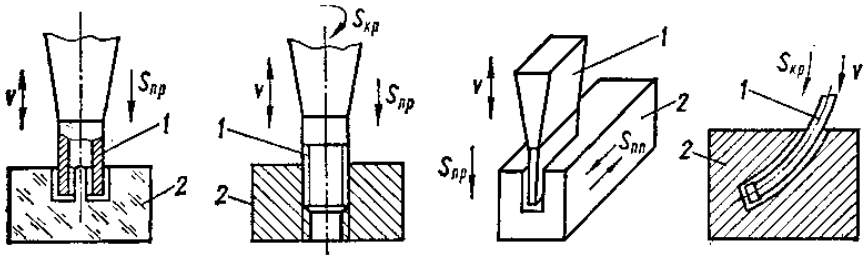


Рис. 7.6.3. Кінематичні схеми ультразвукової розмірної обробки

В ультразвуковій розмірній обробці розрізняють головний рух різання – поздовжні коливання інструмента з ультразвуковою частотою та допоміжний – рух подачі.

Допоміжні рухи при ультразвуковій обробці можуть бути різними. Можливі кінематичні схеми ультразвукової розмірної обробки, з яких видно, що допоміжні рухи можуть бути або у вигляді поздовжньої подачі, поперечної, кругової, або комбінацією двох з них. Використання допоміжних рухів дозволяє значно розширити можливості методу, застосувати його для прошивання порожнин, нарізання різей, розрізних операцій, прошивання криволінійних порожнин тощо.

Устаткування для ультразвукової розмірної обробки. Принципова схема ультразвукового верстата показана на рис. 7.6.4.

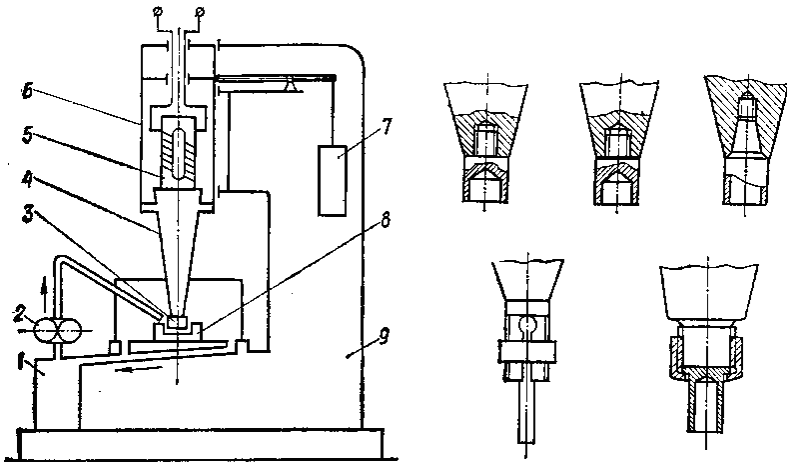


Рис. 7.6.4. Схема ультразвукового верстата

Електричні коливання високої частоти подаються від генератора на обмотку охолоджуваного водою магнітострикційного перетворювача 5. З перетворювачем жорстко зв'язані концентратор 4 і робочий інструмент 3. Коливальну систему встановлено в акустичній головці 6, яка розташована в станині 9 верстата. Спеціальний пристрій забезпечує необхідне зусилля подачі інструмента на оброблювану деталь 8. В конструкції, показаній на рис. 7.6.4, це здійснюється за допомогою важільної системи й противаги 7. Абразивна суспензія в зону обробки подається насосом 2 з бака 1.

Стаціонарні ультразвукові верстати, застосовувані в наш час, можна розділити на три основні групи: верстати малої потужності (30–300 Вт), верстати середньої потужності (0,35–1,5 кВт) і верстати великої потужності (1,6–4 кВт).

Верстати малої потужності застосовують для обробки неглибоких отворів малих діаметрів (0,15–1,5 мм). Розміри таких верстатів невеликі. Конструктивно вони нагадують настільно-свердлильні верстати. До верстатів середньої потужності можна віднести моделі 4770, 4772, 4772А.

Одним з найбільш важливих і відповідальних вузлів ультразвукового верстата є акустична головка – комбінація магнітострикційного перетворювача з ультразвуковим інструментом. Ультразвуковий інструмент – це комбінація концентратора із прикріпленим до нього робочим інструментом.

З'єднання інструмента з концентратором може бути нероз'ємним і рознімним.

Верстат типу 4773А є одним з найбільш продуктивних і потужних ультразвукових верстатів, відомих у цей час.

Матеріал, призначений для виготовлення ультразвукового інструмента, повинен мати гарні пружні властивості, високу втомну міцність, гарну оброблюваність різанням і невисоку вартість. Втрати звукової енергії у високовуглецевих і легованих сталях значно нижчі, ніж у маловуглецевих. Звичайно для виготовлення концентраторів і робочих інструментів рекомендуються хромисті 40Х, пружинні 60С2, 65Г сталі. При роботі з високими амплітудами ($A > 50$ мкм) доцільно застосовувати інструмент зі сталі 18Х2Н4ВА. Найбільш високу амплітуду коливань допускають концентратори із титанових сплавів.

Ультразвукова розмірна обробка ведеться в абразивному середовищі. У якості абразиву використовують карбід бору, карбід кремнію, електрокорунд.

При ультразвуковій обробці твердість зерен абразиву повинна бути більша твердості оброблюваного матеріалу. Тому для ультразвукової обробки важкооброблюваних матеріалів в першу чергу використовують карбід бору. При ультразвуковій обробці крихких матеріалів застосовують більш дешеві, менш дефіцитні абразиви – чорний карбід кремнію,

електрокорунд. Карбід кремнію має більш високу твердість, ніж електрокорунд, і при обробці скла забезпечує досить високі різальні властивості. Однак карбід кремнію, особливо зелений, має велику крихкість. Тому при обробці твердого сплаву й загартованих сталей його використовувати недоцільно.

Продуктивність обробки суттєво залежить від характеристик абразиву й концентрації його в суспензії. Зі збільшенням розмірів і твердості зерен абразиву продуктивність ультразвукової обробки росте, причому особливо інтенсивно – у діапазоні зернистості 0–60 мкм. При подальшому збільшенні зернистості абразиву збільшення швидкості обробки вповільнюється. Максимальна продуктивність досягається при використанні абразиву із зернами середньої величини, при цьому концентрація абразиву повинна бути в межах 30–40% загальної ваги суспензії.

На продуктивність значно впливає рідина абразивної суспензії. Найкращі результати виходять при використанні звичайної води, тому що вода має малу в'язкість, задовільну змочувальну здатність і гарні властивості охолодження. У воду доцільно додавати невелику кількість інгібіторів корозії. Якщо в якості рідини для суспензії застосовують різні масла, гас, гліцерин, дистильовану воду, продуктивність ультразвукової обробки знижується в 5–10 разів.

Зі збільшенням глибини обробки продуктивність обробки падає через погіршення умов у відновленні абразивної суспензії.

Для поліпшення умов відновлення абразиву під торцем інструмента й створення більш рівномірної концентрації абразиву в робочій зоні доцільно застосовувати циркуляційну систему підведення абразивної суспензії. Застосовують також періодичний підйом і опускання інструмента, підведення суспензії через канал концентратора, підведення суспензії під тиском.

Збільшення площі інструмента приводить до зниження продуктивності обробки, що можна пояснити зменшенням амплітуди коливань. При великій площі інструмента також значно погіршуються умови надходження в робочу зону свіжого абразиву й видалення продуктів зношування.

На ультразвукових верстатах при обробці скла можна одержати продуктивність до 1000–1500 мм³/хв на 1 кВт підведеної потужності, при обробці твердого сплаву продуктивність становить 20–25 мм³/хв.

Шорсткість обробленої поверхні залежить від ряду факторів: розміру зерна абразиву, амплітуди коливань інструмента, шорсткості поверхні інструмента тощо. Зокрема, на шорсткість поверхні найбільше впливає розмір зерна – зі зменшенням розміру зерна шорсткість поверхні зменшується. При ультразвуковій обробці спостерігається розбивання

отвору, тобто його розміри трохи більше відповідних розмірів інструмента. Величина розбивки залежить від зернистості абразиву. Так, при використанні абразиву зернистістю №10 розбивка отвору досягає 0,4–0,5 мм, а при використанні дрібнозернистого абразиву – знижується до 0,03–0,06 мм. Для підвищення точності обробки поперечні розміри інструмента слід коректувати з урахуванням розмірів абразиву.

У процесі ультразвукової обробки виникає конусність отвору. Найбільший впливає на конусність зернистість абразиву. При обробці отворів глибиною 5–10 мм конусність перебуває в межах 0,025–0,01 мм. Найбільш високу точність обробки ($\pm 0,005$ мм) можна забезпечити при використанні мікропорошків.

При ультразвуковій обробці зношування інструмента, в основному, відбувається по торцю й становить при обробці скла 1–1,5%, а при обробці твердого сплаву – 40–50% об'єму видаленого металу.

Ультразвукова розмірна обробка має наступні переваги перед обробкою інших видів:

1) можливість використання для виготовлення деталей як із струмопровідних матеріалів, так і з матеріалів, які не проводять струм;

2) висока точність обробки (до 0,01–0,02 мм) при високій якості обробленої поверхні;

3) немає місцевого нагрівання деталі в зоні обробки й дефектного шару на обробленій поверхні;

4) порівняно висока продуктивність при обробці твердих і крихких матеріалів.

До основних недоліків ультразвукової обробки слід віднести наступні:

1) складність проектування й виготовлення ультразвукового інструмента, які пов'язані з необхідністю проведення акустичних розрахунків;

2) непридатність цього методу для обробки в'язких важкооброблюваних матеріалів.

Ультразвукову розмірну обробку застосовують для виконання наступних операцій: виготовлення, доведення й відновлення матриць, пуансонів, твердосплавних волок, обробки алмазних волок, годинних каменів, різального інструменту, гравіювання деталей, виготовлення щілин і пазів, розрізування крихких і твердих матеріалів. Ультразвукова обробка твердосплавних матриць, пресформ, ливарних форм, а також виготовлення матриць штампів невеликих розмірів дозволяє знизити трудомісткість в 5–20 разів у порівнянні зі слюсарною обробкою.

Обробка сферичної поверхні твердосплавної матриці для висадження кульок підшипників здійснюється за 10–15 хв (при припуску на обробку 1 мм), а методами механічної обробки така деталь виготовляється за 3–4 години. Щоб одержати високу якість поверхні твердосплавних штампів,

обробку ведуть із максимальною продуктивністю при амплітуді коливань інструмента 50–60 мкм. При чорновій обробці застосовують абразив зернистістю №10 і №6, а при чистовий – №3 із меншою зернистістю. Звичайно обробка проводиться за один чорновий прохід і один-два чистові проходи. Припуск на чистову обробку при цьому не перевищує 0,02–0,04 мм на сторону. Щоб не було сколювання твердого сплаву на виході інструмента, при обробці наскрізних порожнин під заготовку штампів підкладають загартовані сталеві пластини.

При великому припуску на обробку доцільно послідовно застосовувати електроерозійний (для чорнкової обробки) і ультразвуковий (для чистової обробки) методи, особливо, коли площа обробки велика. Сітка мікротріщин, що утворюється після електроімпульсної обробки під дією термічних явищ, видаляється ультразвуковим методом. При цьому шорсткість поверхні поліпшується. Послідовне використання двох нових методів обробки значно знижує трудомісткість виготовлення матриць.

При виготовленні твердосплавних штампів для складних деталей невеликих розмірів доцільно застосовувати ультразвуковий метод для чорнкової й чистової обробки.

Обробка різального інструменту, оснащеного пластинами із твердого сплаву, застосовується при виготовленні призматичних фасонних різців для одержання канавок на передній поверхні твердосплавних різців. Зокрема, такі канавки можна одержати й електроіскровим методом. Однак ультразвукова обробка забезпечує більш високу якість обробленої поверхні й, отже, стійкість різця. При ширині 0,5–2 мм трудомісткість виготовлення канавки становить 0,5...2 хвилини. Трудомісткість одержання таких канавок на різцях з мінералокерамічними пластинками в 5–10 разів нижче трудомісткості виконання цієї операції на твердосплавних пластинках.

Ультразвуковий метод широко використовується для обробки алмазів. Обробка алмазів – серйозна проблема. Звичайно при виготовленні деталей з алмазу до 50% сировини йде у відходи. Ультразвукова обробка підвищує коефіцієнт використання матеріалу й продуктивність виготовлення алмазних фільтрів в 5–7 разів у порівнянні з механічною. У якості інструмента використовується алмазна голка діаметром 1,35 мм, заточена на необхідний кут. Для підвищення точності і якості обробки алмазній заготовці надається обертовий рух. Час виготовлення отвору діаметром 0,1–2 мм в алмазах становить 1,5–4 годин. Точні отвори малих діаметрів виготовляють цим методом також у деталях зі штучних рубінів, сафірів.

Ультразвукове гравіювання дуже ефективно використовують для скла, напівкоштовних каменів та подібних матеріалів. Трудомісткість обробки в порівнянні зі звичайним гравіюванням (механічним) знижується у десятки

разів. При гравіюванні весь малюнок, нанесений на торець робочого інструмента на глибину 0,5–1,5 мм, відтворюється відразу на поверхні оброблюваної деталі. Час нанесення малюнка становить приблизно 2...5 сек. Оскільки один інструмент можна використовувати багаторазово, вартість ультразвукового гравіювання невелика.

Для обробки деталей використовується спосіб ультразвукового розрізування дротом інструментом. В установках використовується сталевий або вольфрамовий дріт-інструмент діаметром 0,05–0,3 мм, який шляхом перемотування безупинно відновлюється в зоні обробки.

Інструменту-дроту надаються ультразвукові коливання. Така обробка дозволяє здійснити прямолінійне розрізування керамічних пластин і інших крихких матеріалів непрофільованим інструментом з високою продуктивністю (до 60–80 мм²/хв для скла) і малою шириною різу (0,15–0,25 мм).

Процеси ультразвукової обробки використовуються також для інтенсифікації процесу різання жароміцних сплавів та інших важкооброблюваних матеріалів. При цьому на інструмент накладаються ультразвукові коливання малої амплітуди (рис. 7.6.5).

Накладання ультразвукових коливань на процес різання викликає додаткові циклічні переміщення контактних поверхонь інструмента, що може значно зменшити опір сходу стружки (полегшити процес стружкоутворення), знизити сили тертя, а також змінити характер тертя інструмента й заготовки. Це сприяє зменшенню сил різання й, таким чином, полегшує процес різання.

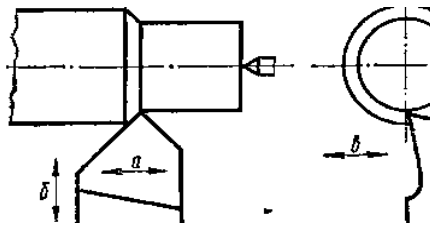


Рис. 7.6.5. Коливальні рухи інструмента в процесі обробки

Зараз вивчений вплив ультразвуку на різні процеси обробки різанням: точіння, свердління, розгортання, нарізування різей, шліфування.

При точінні ультразвукові коливання можуть бути накладені на різальний інструмент у трьох напрямках (рис. 7.6.5):

- а) паралельно осі обертання деталі, що викликає коливання інструмента в напрямку подачі;
- б) нормально до осі обертання деталі (радіальні коливання);

в) у вертикальному напрямку для створення тангенційних коливань. Дослідження показали, що найбільш ефективно накладення тангенціальних ультразвукових коливань. Наприклад, встановлено, що ефективність дії тангенціальних ультразвукових коливань малої амплітуди ($A < 5$ мкм) на процес різання залежить від властивостей оброблюваного матеріалу: чим вища пластичність оброблюваного матеріалу, тим більше ефект. При обробці червоної міді створення тангенційних коливань ($A = 2,5 \dots 3$ мкм) при подачах $0,08-0,25$ мм/об дало можливість знизити тангенційну складову P_z сили різання у $8-10$ разів, а радіальну складову P_y – у 50 разів. При накладенні тангенційних коливань на два класи знижується висота мікронерівностей.

Надання інструменту радіальних ультразвукових коливань малої амплітуди ($A=3 \dots 4$ мкм) призводить до збільшення стійкості швидкорізальних різців у 4 рази в порівнянні зі стійкістю різців, які працюють без коливань.

Установлено, що накладення ультразвукових коливань уздовж осі інструмента при роботі спіральними свердлами звичайної форми не дає позитивних результатів. Більш ефективно на процеси свердління, зенкерування й розгортання впливають крутильні коливання, що збігаються з напрямком головного руху. Так, якщо розвертці діаметром 18 мм зі сталі 9ХС надати крутильні коливання з амплітудою 5 мкм при розгортанні отворів довжиною 20 мм у зразках зі сталей 20 і 45 , то можна знизити шорсткість обробленої поверхні й підвищити точність обробки.

Проводилися дослідження з накладанням ультразвукових коливань (осьових і крутильних) на різальний інструмент при фрезеруванні, що приводило до значного зменшення сил різання й полегшення процесу різання. При цьому глибину різання можна збільшити майже в 2 рази. Фрезерування з накладанням ультразвукових коливань дає можливість виконувати високоякісну обробку на верстатах низької жорсткості.

Існують методи шліфування з накладанням ультразвукових коливань шліфувальному кругу або заготовці (рис. 7.6.6).

Накладення ультразвукових коливань дає можливість збільшити стійкість круга майже в 3 рази. Усунення засалювання круга дозволяє застосувати більш тверді й дрібнозернисті круги. Цей метод доцільно застосовувати при чистовому шліфуванні в'язких важкооброблюваних матеріалів.

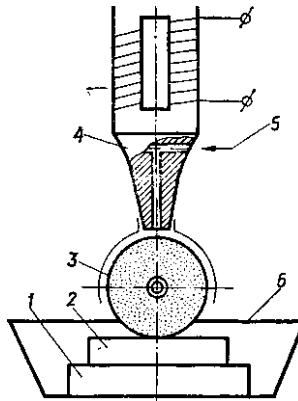


Рис. 7.6.6. Надання коливального руху інструменту

Зараз у промисловості при виготовленні деталей з нержавіючих сталей, жароміцних, титанових та інших важкооброблюваних сталей і сплавів усе ширше починають застосовувати ультразвукове нарізання внутрішніх різей. При нарізанні різей одночасно з обертовим рухом навколо осі й поступальним уздовж осі мітчика додатково надаються ультразвукові коливання з частотою 18–24 кГц і амплітудою до 20 мкм. Внаслідок цього поліпшуються умови роботи, усувається заклинювання й поломка мітчика при зворотному ході, що підвищує стійкість інструмента у 8–10 разів. У якості рідини використовують машинне мастило або емульсію.

7.7. Комбіновані методи обробки

Перспективним є використання в одному процесі розмірної обробки різних фізичних або хімічних явищ, тобто комбінації різних електрофізичних і електрохімічних методів обробки.

Найкращі результати досягаються при сполученні в одному методі електроерозійної, електрохімічної, ультразвукової обробки.

Зокрема, останнім часом досягнуті успіхи в розвитку обробки наступними комбінованими методами:

- 1) анодно-механічна;
- 2) електроерозійно-хімічна;
- 3) ультразвукова-електрохімічна.

7.7.1. Анодно-механічна обробка

Найбільш широко анодно-механічна обробка з металевим електродом-інструментом застосовується для розрізних операцій і заточення різального інструменту. Цю обробку можна застосовувати практично у всіх тих випадках, коли можлива обробка різанням, тобто для методів токарної, фрезерної, свердлильної та шліфувальної обробки. Але в наш час анодно-механічну обробку доцільно використовувати тільки для обробки важкооброблюваних металів і сплавів. Анодно-механічна обробка заснована на використанні комбінованого процесу електрохімічного й електроерозійного впливу електрода-інструмента на оброблюваний виріб. При цьому, як і при електрохімічній обробці, електрод-інструмент підключається до негативного полюса джерела струму, а електрод-деталь – до позитивного.

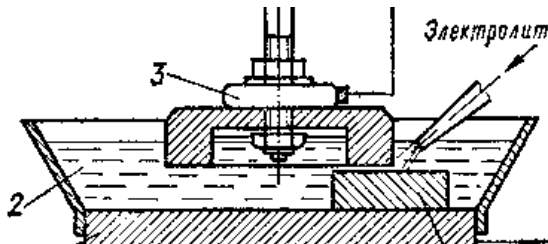


Рис. 7.7.1. Схема анодно-механічної обробки

У результаті анодного розчинення на поверхні деталі утворюється плівка, яка видаляється внаслідок механічного руху (обертання) електрода-інструмента. Таке руйнування оброблюваного матеріалу спостерігається при малих щільностях струму. Швидкість видалення матеріалу при цьому становить 0,03–0,05 мм/хв.

При високих щільностях струму обробка відбувається внаслідок електроерозійного руйнування. У результаті електротермічної дії плавляться вершини мікронерівностей оброблюваної поверхні в місцях контакту з електродом-інструментом. Продукти руйнування видаляються із зони обробки рухомих електродом і електролітом.

Живлення здійснюється постійним струмом при потужності джерела живлення до десятків кіловатів.

У якості електроліту для анодно-механічної обробки часто застосовується водяний розчин силікату натрію щільністю 1,28–1,38 г/см³. Залежно від характеру виконуваної роботи іноді застосовують інші електроліти.

Виходячи із сутності методу анодно-механічну обробку можна виконати у двох режимах:

- високопродуктивні (чорнові) режими при робочій напрузі 22–30 В. У цих режимах переважає електроерозійне руйнування матеріалу. Оброблена поверхня має висоту мікронерівностей до 500–600 мкм. Застосовуються для чорнової обробки;
- чистові, або м'які, режими. Ці режими менш продуктивні й виконуються при робочій напрузі 3–15 В. У цих режимах видалення металу відбувається тільки за рахунок анодного розчинення оброблюваного матеріалу. Якість обробленої поверхні на цих режимах висока – висота нерівностей менше 1 мкм. Застосовуються для чистової обробки.

Обробку можна виконати одним інструментом без заміни, тобто з однієї установки інструмента.

Анодно-механічна обробка має наступні переваги:

- висока продуктивність (при роботі на чорнових режимах) і висока якість обробленої поверхні (при роботі на чистових режимах);
- можливість обробки будь-яких важкооброблюваних металів і сплавів;
- можливість порівняно легкого видалення й утилізації продуктів обробки;
- можливість варіювання режимів обробки в широких діапазонах.

До недоліків методу можна віднести експлуатаційні незручності використання рідкого скла як електроліту, порівняну складність в експлуатації й порівняно високу вартість устаткування.

Найбільш широко анодно-механічна обробка з металевим електродом-інструментом застосовується для розрізних операцій і заточення різального інструменту.

Анодно-механічна обробка використовується для розрізування труб, заготовок, прокату й злитків з важкооброблюваних сталей і сплавів (титанових, жароміцних, кислотостійких), а також вирізання щілин у різних матеріалах. Електроди-інструменти виготовляють зі сталі, чавуну, міді, латуні, графіту.

Перевагами цього методу розрізування перед механічним є: незначний механічний і термічний вплив на оброблюваний виріб у процесі обробки, значне зниження відходів через меншу ширину різку. Трудомісткість обробки в основному залежить від розмірів заготовки. Чим більше перетин заготовки, тим більше потрібно часу для розрізування її при незмінній силі струму. Така ж залежність існує між шириною різку й часом розрізування. Між силою струму й часом розрізування заготовки при незмінному перетині й ширині різку існує обернено пропорційна залежність.

Якість обробленої поверхні залежить від режиму обробки й підвищується при зм'якшенні режиму обробки (робота в чистових режимах). При обробці в грубих режимах глибина дефектного шару досягає 0,3–0,4 мм. При роботі в м'яких режимах дефектний шар практично відсутній.

Для виконання розрізних операцій вітчизняна промисловість випускає універсальні анодно-механічні відрізни верстати.

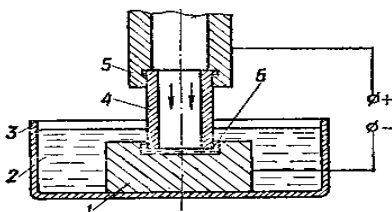
Крім універсальних, випускають спеціальні верстати для розрізування труб діаметром до 300 мм, для розрізування необмежених за довжиною заготовок перетином до 600 мм.

Анодно-механічне заточення інструмента широко застосовується на підприємствах країни. Цей метод в основному застосовують для заточення твердосплавного інструмента.

7.7.2. Електроерозійно-хімічна обробка

Принцип комбінації електроерозійного процесу з анодним розчиненням, який використаний в анодно-механічному методі обробки, повністю не реалізований.

Цей метод можна використовувати для прошивання отворів, одержання порожнин штампів і прес-форм, різних щілин і пазів. Сутність електроерозійнохімічного методу полягає в тому, що в одній операції сполучаються одночасно два процеси: локальне електроерозійне руйнування матеріалу деталі за допомогою графітового електрод-інструмента й анодне розчинення матеріалу в проточному електроліті по всій оброблюваній поверхні. Схема обробки показана на рис. 7.7.2.



Заготовку 1 поміщають у ванну 3 з електролітом 2. Графітований електрод-інструмент 4 закріплено в шпинделі 5. Заготовка й електрод-

інструмент підключені до джерела живлення, яким є спеціальний генератор імпульсів.

У якості електроліту використовується 10%-ий водяний розчин хлористого натрію.

Інструмент для цього методу повинен бути виготовлений з хімічно- і ерозійностійкого матеріалу (найкраще із графіту).

Продуктивність електроерозійнохімічного методу обробки значно (в 5–10 разів) вища продуктивності кожного процесу окремо (електроерозійного й електрохімічного) і сумарної продуктивності при роздільному проведенні обох методів.

7.7.3. Ультразвукова електрохімічна обробка

Останнім часом з'явився новий комбінований метод обробки, що поєднує ультразвукову й електрохімічну обробку. Такому об'єднанню сприяла ідентичність кінематики процесів формоутворення деталей цими методами. Сутність ультразвукової електрохімічної обробки полягає в тому, що для формоутворення поверхні деталі використовуються анодне розчинення й руйнування оброблюваного матеріалу під дією ультразвукового інструмента в абразивному середовищі.

Залежно від того, у яких умовах абразив бере участь у процесі знімання матеріалу, можна виділити обробку в електроліті з абразивом й обробку абразивним інструментом.

Обробку застосовують для деталей із твердих сплавів штампів, волок, фільтер, прес-форм тощо.

При проходженні постійного електричного струму поверхня оброблюваної деталі зазнає анодного розчинення, інтенсивність якого прямо пропорційна щільності струму й обернено пропорційна величині міжелектродного зазору.

Одночасно ультразвуковому інструменту надаються коливання ультразвукової частоти. Коливальні рухи інструмента в умовах абразивної суспензії – суспензії зерен абразиву в електроліті – приводять до механічного руйнування матеріалу заготовки й до часткового видалення поверхневої плівки. Абразивна суспензія-електроліт, яка прокачується через міжелектродний зазор, видаляє продукти анодного розчинення й ультразвукової обробки з робочої зони. У результаті відбувається «копіювання» форми ультразвукового інструмента-катода в матеріалі заготовки анода.

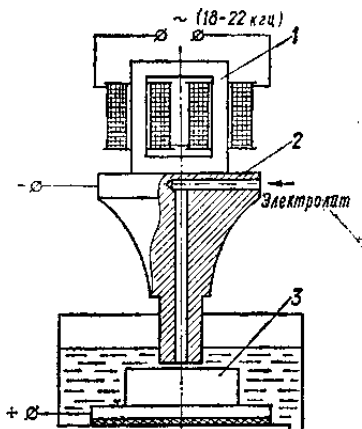


Рис. 7.7.3. Схема ультразвукової електрохімічної обробки

У якості електроліту рекомендується використовувати 10–15%-ий розчин азотнокислого натрію (калію), тому що такий електроліт забезпечує необхідну щільність робочого струму в міжелектродному зазорі. У якості антикорозійної присадки в електроліт вводиться азотисто-кислий натрій. У якості абразиву (приблизно 19%) рекомендується застосовувати зерна карбіду бору або зерна карбіду кремнію зеленого.

Швидкість обробки залежить в основному від щільності робочого струму. Зі збільшенням щільності струму швидкість обробки зростає.

Найбільша припустима щільність струму обмежена певною напругою (напруга іскріння). Граничний рівень напруги визначається розмірами зерен застосовуваного абразиву.

Зі збільшенням розміру зерен абразиву підвищується продуктивність обробки внаслідок того, що можна одержати високі щільності робочого струму. При щільностях струму $15\text{--}20\text{ А/см}^2$ продуктивність обробки твердого сплаву становить приблизно $500\text{ мм}^3/\text{хв}$ (продуктивність ультразвукової обробки в цих умовах становить приблизно $50\text{ мм}^3/\text{мм}$, а електрохімічної – $160\text{ мм}^3/\text{хв}$).

Розрахунки й конструювання інструмента для комбінованої ультразвукової електрохімічної обробки здійснюється по тій же методиці, що й для звичайної ультразвукової обробки.

Для одержання необхідної амплітуди коливань ультразвуковий інструмент може мати східчасту, конусну або експонентну форму. При площі обробки менш $150\text{--}200\text{ мм}^2$ рекомендується застосовувати

інструмент експонентної або конусної форми, а при площі більше 200 мм^2 – східчастої.

У якості матеріалів для виготовлення інструментів можна використовувати вуглецеві конструкційні й низьколеговані сталі (сталь 45, 40X, 65Г). Для подачі електроліту в інструменті передбачаються спеціальні канали.

У процесі ультразвукової електрохімічної обробки інструмент зношується. Але це зношування набагато менше, ніж при звичайній ультразвуковій обробці. Найменше зношування – у діапазоні щільності струму $2\text{--}5 \text{ А/см}^2$. При щільності струму $15\text{--}20 \text{ А/см}^2$ зношування інструмента становить $5,5\text{--}6\%$.

Розділ 8

ПРОМЕНЕВІ МЕТОДИ ОБРОБКИ

Під променевими розуміють процеси розмірного видалення матеріалу плавленням і випаром його в зоні обробки під впливом енергії променистих потоків або високоенергетичних струменів.

До променевих методів можна віднести обробку:

- 1) фотоннопроменевою;
- 2) електроннопроменевою;
- 3) плазмовим струменем.

8.1. Фотоннопроменевою обробка

Фотоннопроменевою обробку доцільно використовувати для одержання мікроотворів у деталях типу фільтр, діафрагм, ґрат, для контурно-променевою мікрообробки (одержання щілин, пазів, розрізування матеріалів), для видалення дисбалансу при динамічному балансуванні, для локальної зміни властивостей матеріалу.

Можливість обробки сфокусованим фотонним променем з'явилася внаслідок інтенсивного розвитку квантової електроніки. Процес взаємодії світлового випромінювання з речовиною можна представити в наступному вигляді. Після поглинання світлової енергії речовиною відбувається перехід світлової енергії в теплову, що розігріває матеріал до високих температур з великою швидкістю. Високі температури та більші щільності фотонів приводять до термоемісії часток з поверхні матеріалу. Спостерігається інтенсивне плавлення й випаровування матеріалу й заглиблення променя ОКГ (оптичного квантового генератора) у матеріал. При скупченні випарованого матеріалу великої щільності в порожнині отвору утворюється потужний струмінь і відбувається викид продуктів руйнування матеріалу із зони обробки у вигляді факела.

Типові операції й технологічні характеристики фотоннопроменевою обробки:

- 1) виготовлення отворів малих діаметрів;
- 2) контурнопроменевою обробка;
- 3) видалення дисбалансу деталей при динамічному балансуванні.

Обробка першого типу доцільна для наступних деталей: діафрагм, форсунок, ґрат, фільтр для виготовлення синтетичних волокон, алмазних волоків.

Виготовлення отворів за допомогою випромінювання ОКГ є як би елементарним процесом лазерної обробки. Тому технологічні характеристики фотоннопроменевої обробки доцільно розглядати на прикладі обробки мікроотворів. Під технологічними характеристиками при фотоннопроменевої обробці розуміють розміри обробки (діаметр, глибину, форму елементарного отвору, обсяг елементарної лунки), якість обробленої поверхні (розміри зони нагрівання, властивості зони нагрівання, шорсткість обробленої поверхні), оброблюваність різних матеріалів променем ОКГ, точність обробки. При фотоннопроменевої обробці технологічні характеристики залежать від багатьох параметрів (керованих і некерованих).

Керованими параметрами фотоннопроменевої обробки є енергетичні характеристики (енергія, щільність енергії) імпульсу ОКГ, частота й тривалість імпульсів випромінювання, кількість імпульсів, величина зсуву деталі щодо фокальної площини об'єктиву, фокусна відстань системи.

Крім того, характеристики зони нагрівання (структура матеріалу, розміри зони, мікротвердість матеріалу) залежать від властивостей оброблюваного матеріалу.

Експерименти, проведені на вуглецевих сталях зі вмістом вуглецю 0,2–1,2%, дали можливість з'ясувати, що зі збільшенням вмісту вуглецю мікротвердість сталі в зоні нагрівання, граничної з отвором, зростає. Порівняно мала товщина зони нагрівання й різкі границі між різними шарами цієї зони вказують на високу локальність впливу променя ОКГ на структуру металу. Характеристики зони нагрівання залежать також від вихідної структури сталі.

Виготовлення мікроотворів випромінюванням ОКГ – високопродуктивний процес. Машинний час виготовлення одного отвору при моноімпульсній обробці визначається тривалістю імпульсу випромінювання ОКГ і становить 0,001–0,0015 сек.

При лазерній обробці ще велика частка допоміжного часу, що обмежує її продуктивність (недосконалий процес фокусування випромінювання ОКГ на оброблюваній поверхні). Ручне настроювання системи на робочий режим крім збільшення допоміжного часу технологічного процесу, перешкоджає автоматизації лазерних установок. Критерієм для оцінки точності фокусування служить різкість зображення оброблюваної поверхні в полі зору візуальної системи, що значною мірою визначається суб'єктивними особливостями оператора.

У ряді випадків для особливо точних деталей після обробки променем ОКГ потрібне додаткове доведення (наприклад, механічне притирання алмазним порошком, калібрування дротом, пуансонами). Зокрема, розроблена технологія виробництва фільтер для ацетатного волокна, за якою формуючий канал фільтер виготовляється двома операціями:

1) виготовлення чорного отвору діаметром 35–45 мкм за допомогою випромінювання ОКГ;

2) наступне калібрування отвору діаметром 56 мкм твердосплавними пуансонами. У результаті такої обробки витримується допуск 2–3 мкм на діаметр.

Для одержання отворів малих діаметрів у ряді випадків фотоннопроменева обробка є єдиною можливим технологічним методом.

Контурно-променева обробка застосовується для одержання малюнків на тонких плівках з різних матеріалів, нанесених на підложку. Зокрема, безперервне випромінювання газового ОКГ використовується при виготовленні фотошаблонів для напівпровідникової промисловості. Характерною рисою таких фотошаблонів є розташування на них великої кількості порівняно простих за конфігурацією елементів (отворів, штрихів, простих геометричних фігур). Розміри окремих елементів коливаються в межах 5–100 мкм. Товщина плівки – до 0,5 мкм. За допомогою випромінювання ОКГ можна одержати мінімальний розмір елементів 2–3 мкм.

Значний техніко-економічний ефект виходить при впровадженні випромінювання ОКГ на вуглекислому газі (CO_2) для нарізання резисторів видаленням у певних місцях резистивного тонкого шару із циліндричної керамічної підложки. Випромінювання ОКГ фокусується на поверхню заготовки, яка обертається навколо своєї осі і одночасно поступально рухається уздовж неї. Цю технологію використовують при нарізання заготовок хромистих резисторів діаметром 7,5 мм і довжиною активної частини 9,5 мм із номіналами опорів 40, 10 і 1 Ом. Товщина резистивного шару, нанесеного шляхом дифузії хрому в поверхневій шарі кераміки, становить 10–20 мкм.

Останнім часом одержало розвиток газолазерне різання. При цьому випромінювання газового ОКГ на газі CO_2 фокусується оптичною системою на поверхню оброблюваного матеріалу й одночасно в зону обробки подається кисень за допомогою співвісного із променем ОКГ сопла спеціального різачка. Струмінь кисню значно інтенсифікує процес різання. Цю обробку доцільно застосовувати для різання жароміцних матеріалів, пластмас, скла, кераміки, тканини, дерева. При цьому досягається висока якість різання, мала зона термічного впливу (0,05–0,2 мм), високі швидкості різання. При потужності випромінювання ОКГ 500...1000 Вт швидкість різання досягає декількох метрів у хвилину. Метали з високою теплопровідністю (мідь, алюміній) практично не піддаються газолазерному різанню.

При використанні імпульсних ОКГ із високою частотою проходження імпульсів контурна обробка повинна вестися при подачах менш 1/2

діаметра фокальної плями. Це забезпечує високоякісне розрізування матеріалу.

В останні роки з'явилися надійні імпульсні ОКГ, які працюють в частотному режимі із частотою проходження імпульсів до 10...100 Гц. Їх використання дозволяє добитися високої продуктивності контурнопроменевої лазерної обробки важкооброблюваних металів і сплавів.

Для видалення дисбалансу деталі при динамічному балансуванні шляхом випару матеріалу використовується випромінювання ОКГ. Обсяг матеріалу, вилученого за один імпульс, невеликий і лежить у межах міліграмів. Основною перевагою такого методу балансування є можливість видалення зайвого матеріалу без зупинки деталі.

Фотоннопроменева обробка характеризується рядом важливих особливостей:

1) можливість проведення обробки в місцях, недоступних для іншого обробного інструмента;

2) здатність променя ОКГ проникати через будь-яке прозоре середовище, не порушуючи його й значно не знижуючи свою інтенсивність, що створює можливість для проведення обробки в ізольованих прозорих середовищах;

3) відсутність механічного контакту між заготовкою інструментом – променем ОКГ, а також силових впливів на заготовку, що полегшує кріплення останньої при обробці й усуває появу небажаних деформацій.

До недоліків методу слід віднести існуючі обмеження за глибиною обробки, складність стабілізації параметрів випромінювання ОКГ і складність здійснення надійного й точного оптичного переміщення потужного випромінювання ОКГ у просторі.

Для розмірної обробки фотонним променем використовують установки ОКГ на твердому тілі й з газовими ОКГ безперервного випромінювання.

Енергетичні параметри ОКГ, стабільність характеристик фотонного випромінювання значною мірою залежать від температури робочого тіла, ламп накачування.

8.2. Електроннопроменева обробка

Електроннопроменева обробка заснована на використанні кінетичної енергії електронів, що летять із великою швидкістю для спрямованого

видалення матеріалу шляхом нагрівання, плавлення та його випару в зоні обробки.

При нагріванні металу (вольфраму або танталу) у вакуумі пропущенням через нього електричного струму на поверхні металу виникають процеси термоелектронної емісії. Кінетична енергія цих електронів порівняно невелика. Але якщо на електрони впливати електричним полем, створюючи високу різницю потенціалів між поверхнями катоду і аноду – швидкість руху електронів можна значно підвищити.

При цьому кожний електрон здобуває кінетичну енергію. Технологічні характеристики електроннопроменевої обробки (продуктивність обробки, оброблюваність різних матеріалів, швидкість знімання матеріалу, точність обробки) багато в чому визначаються можливостями устаткування, енергетичними параметрами електронного пучка, властивостями оброблюваного матеріалу.

Продуктивність електроннопроменевої обробки залежить від потужності променя, розмірів ділянки, на якій він фокусується, імпульсної подачі променя й тривалості кожного імпульсу. Крім того, вона залежить від теплофізичних констант і товщини оброблюваного матеріалу. Залежність продуктивності обробки від властивостей металів і сплавів характеризується відносною оброблюваністю.

Швидкість знімання матеріалу електронним променем може досягати 20–30 мм²/хв, але при високоякісній обробці швидкість знімання не перевищує 1 мм²/хв. Тому метод доцільно використовувати тільки для мікрообробки.

Для інтенсифікації обробки заготовок перед обробкою електронним променем у деяких випадках доцільно застосовувати попереднє нагрівання. Зокрема, нагрівання сталевого зразка до температури 400°C значно підвищує продуктивність обробки (до 50%).

Точність електроннопроменевої обробки також визначається енергетичними параметрами променя, стабільністю цих параметрів при керуванні процесом, системою фокусування випромінювання, точністю керування частотою проходження й тривалістю імпульсів, точністю виконання механічної частини устаткування. На існуючому устаткуванні точність керування параметрами електронного променя може бути дуже високою (не нижче 0,1% номіналу). При оптимальному виборі режимів точність електроннопроменевої обробки може становити 10–20 мкм.

Електроннопроменева обробка успішно застосовується для виготовлення отворів мікронних розмірів з великим відношенням глибини до діаметра. Наприклад, у скляній пластині товщиною 2 мм отвір діаметром 48 мкм одержують за 1 сек.

Можливості переміщення електронного променя, точного керування його енергетичними й тимчасовими параметрами дозволили застосувати електроннопроменеву обробку для виготовлення фасонних щілин і пазів у важкооброблюваних матеріалах, наприклад, для виготовлення фільтр при одержанні об'ємного синтетичного волокна. Такі фільтри виготовляють із твердого сплаву або іншого аналогічного за властивостями матеріалу товщиною до 8 мм із поступовим зменшенням товщини матеріалу до 0,5 мм. Ширина щілини або діаметр отвору залежить від товщини оброблюваного матеріалу. Оптимальне співвідношення між шириною щілини або діаметром отвору й товщиною матеріалу не повинно перевищувати 1/20. Зі зменшенням цього співвідношення збільшується клиновидність паза або конусність отвору.

Електроннопроменеву технологію успішно застосовують для виготовлення алмазних волоків.

Використання електроннопроменевої обробки скорочує машинний час виготовлення каналу алмазної волоки висотою 1–1,7 мм до 3–5 хв, а волоки висотою більш 1,7 мм – до 5–13 хв. Повний час виготовлення каналу, що включає одержання вакууму в установці й час на заміну алмаза становить 15–20 хв (на обробку алмазної волоки інструментом, шаржованим алмазним пилом, витрачалося до 8–10 днів).

Більші перспективи відкриті перед електроннопроменевою обробкою в області мікроелектроніки. Електронний промінь успішно застосовується при виготовленні інтегральних схем. Ця обробка усе ширше застосовується для одержання резисторів, тунельних діодів, деяких типів транзисторів, для одержання мікроотворів у тонких плівках.

Переваги електроннопроменевої обробки перед іншими методами полягають в тому, що електронний промінь можна легко фокусувати, модулювати за потужністю, його можна миттєво й порівняно легко переміщати на будь-яку ділянку оброблюваної поверхні.

До недоліків електроннопроменевої обробки слід віднести необхідність проведення обробки у вакуумі, складність і високу вартість устаткування.

Устаткування для електроннопроменевої обробки звичайно містить у собі наступні основні елементи:

- 1) електронну гармату;
- 2) вакуумну камеру з вакуумною системою;
- 3) джерело живлення з апаратурою керування процесом.

8.3. Обробка матеріалів плазмовим струменем

Плазмовою обробкою називають такий технологічний процес, при якому для видалення матеріалу використовується струмінь іонізованого газу (плазми). Плазмою називають особливий стан речовини, у якому поряд з нейтральними й збудженими атомами є іонізовані атоми й електрони. Такий стан властивий будь-якій речовині, нагрітій до високої температури.

При нагріванні речовина із твердого стану може переходити в рідкий й потім у газоподібний. При переході речовини із твердого стану в рідкий й з рідкого в газоподібний збільшується кінетична енергія молекул і атомів речовини, послабляються й руйнуються енергетичні зв'язки між ними. Подальше нагрівання приводить до руйнування енергетичних зв'язків не тільки між атомами, але й між елементарними частками, що входять до складу атомів – ядрами й електронами. Відбувається іонізація газу (газ являє собою суміш нейтральних атомів, вільних електронів і позитивних іонів). Такий стан речовини (у формі іонізованого газу – плазми – називають четвертим станом речовини (поряд із твердим, рідким і газоподібним).

Перехід речовини з газоподібного стану в плазмовий відбувається поступово. При порівняно невеликій температурі (3000–5000°C) у газі з'являється незначна кількість заряджених часток. При температурі 5000–10000°C кількість заряджених часток досягає кілька відсотків загальної кількості часток, а при температурі 30000–50000°C кількість заряджених часток досягає майже 100%, тобто виникає повна іонізація газу. Найбільш простим способом переходу газу в стан плазми є порушення в ньому електричних розрядів. Такий стан виникає й при тліючому, і при дуговому, і при іскровому розрядах.

Температура плазми залежить від виду розряду. При тліючому розряді температура плазми настільки низька, що не викликає навіть істотного нагрівання електродів і середовища, у яких плазма збуджується. Такий вид розряду виникає, наприклад, у неонових лампах.

При дуговому розряді в газі температура плазми досягає 5000–50000°C, а при іскровому розряді – навіть на порядок вище. При плазмовій обробці іонізований газ – плазма – утворюється при нагріванні якого-небудь робочого газу в умовах дугового розряду.

Підвищення тиску газу приводить до збільшення щільності заряджених часток. Це викликає збільшення частоти зіткнень електронів, іонів і нейтральних часток, інтенсивний обмін енергією між ними й тим самим приводить до підвищення температури іонізованого газу.

Для одержання високотемпературної плазми тиск газу підвищують стиском дугового розряду. Дугу стискають, подаючи газ під деяким тиском у камеру, у якій збуджується дуговий розряд, або іншим способом.

Плазма має високу електропровідність, що дозволяє управляти нею за допомогою магнітних і електромагнітних полів. Тому стиск дуги може здійснюватися також за допомогою стороннього магнітного поля. Важливою властивістю плазмового струменя є висока швидкість утворюючих її часток. У результаті впливу плазмового струменя на оброблюваний матеріал цей матеріал розігрівається в зоні обробки, потім плавиться й частково випаровується. Розплавлений матеріал під дією кінетичної енергії плазмового струменя видаляється із зони обробки.

Можна виділити наступні чотири випадки застосування плазмового струменя для розмірної обробки:

- 1) для попереднього нагрівання заготовки при обробці різанням;
- 2) для зняття поверхневих шарів матеріалу із циліндричних заготовок на токарному верстаті;
- 3) для різання листового матеріалу;
- 4) для обробки отворів, щілин і пазів малих розмірів.

При обробці важкооброблюваних матеріалів різанням продуктивність можна суттєво підвищити, попередньо нагріваючи поверхневий шар матеріалу. Можливості індукційного нагрівання оброблюваної деталі обмежуються габаритними розмірами заготовки, складністю устаткування. Останнім часом для попереднього нагрівання оброблюваної поверхні успішно використовують плазмові пальники. Плазмові пальники забезпечують високу енергетичну щільність і дають можливість здійснити попереднє нагрівання поверхні швидко й без більших витрат.

Установка для такої обробки монтується на базі універсального токарного верстата. На установці використовуються плазмові пальники потужністю до 50 кВт при діаметрі сопла 3 мм. Використання цих пальників дає можливість одержати щільність потужності до 700 кВт/см². У якості робочого газу застосовують суміш аргону, азоту й водню. Дуга запалюється від високочастотного пристрою запалювання, за допомогою якого іонізується простір між катодом і анодом. Спочатку запалюється допоміжна дуга між катодом і включеним для цього анодом соплом пальника. При підведенні пальника до оброблюваної поверхні загоряється головна дуга подачею більш високого потенціалу. Струм підводиться до оброблюваної заготовки за допомогою рухомого контакту, розташованого на патроні токарного верстата. Обробка різанням в умовах попереднього нагрівання плазмовим струменем здійснюється твердосплавними або мінералокерамічними різцями.

Плазмовий струмінь для попереднього підігріву використовується при обробці корозійно-кислотостійкої сталі.

Видалення плазмовим струменем поверхневих шарів металу з заготовки, що обертається, останнім часом також посилено розвивається. При цій операції матеріал видаляється за схемою звичайної токарної обробки, але із застосуванням плазмового пальника замість різця. На ефективність такого процесу обробки впливає правильність установки плазмового пальника відносно деталі. Розташування пальника відносно деталі показано на рис. 8.1.

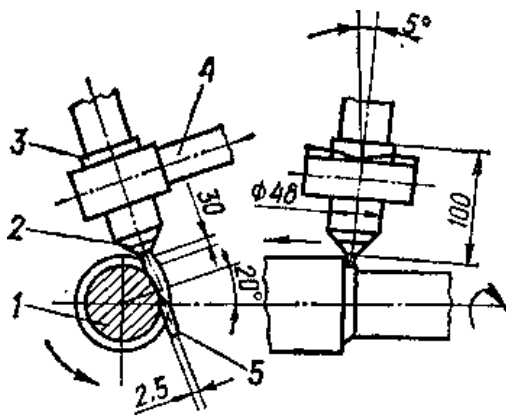


Рис. 8.1. Розташування плазмового пальника відносно деталі:
1 – оброблювана деталь; 2 – сопло пальника; 3 – плазмовий пальник;
4 – тримач; 5 – плазмовий струмінь

При такому розташуванні пальника оплавлений матеріал повністю видаляється із зони обробки й досягається найвища якість обробленої поверхні. Оптимальна відстань осі плазмового струменя від оброблюваної поверхні дорівнює 2,5 мм. Середня відстань сопла від оброблюваної поверхні 10 мм.

Гарні результати (значне збільшення питомого видалення матеріалу) у порівнянні з обробкою різанням отримані при «плазмовому точінні» жаростійких сталей. Для обробки вуглецевих сталей, алюмінію, латуні використовувати цей спосіб недоцільно.

Устаткування для плазмової обробки складається з наступних основних елементів (рис. 8.2): плазмового пальника 5; джерела живлення; системи подачі робочого газу, системи охолодження блоку керування. Плазмовий струмінь 6 направляєється на оброблювану заготовку 7. Для одержання заданого закону обробки плазмовому пальнику 5 або заготовці 7 надаються необхідні рухи.

Плазмовий пальник – це пристрій, у якому утворюється струмінь плазми, який використовується для обробки. При формуванні плазмового струменя в пальнику між двома електродами (катодом і анодом) збуджується дуга. Робочий газ, що подається під тиском у камеру пальника, видуває дугу через сопло у вигляді плазмового струменя, що представляє собою потік іонізованого газу.

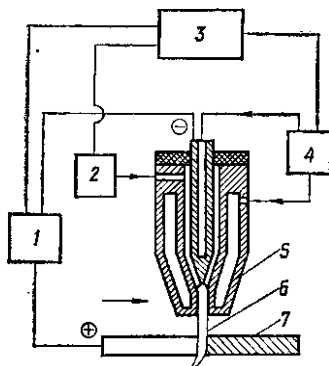


Рис. 8.2. Блок-схема установки для плазмової обробки матеріалів

ЛІТЕРАТУРА

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т.Ю. Степанова / Иван. Гос. Хим.-технол. Ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.
3. Повышение долговечности машин технологическими методами / В.С. Корсаков, Г.Э Таурит, Г.Д. Василюк и др. – К.: Техніка, 1986. – 158 с.
4. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні: Підручник / А.І. Грабченко, М.В. Верезуб, Ю.М. Внуков, П.П. Мельничук, Г.М. Виговський / За редакцією А.І. Грабченка. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 451 с.
5. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. — М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
6. Демкин Н.Б., Рыжов З.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
7. Яковлев Г. М. Технологические основы надежности и долговечности машин. – Минск: Беларусь, 1964. – 334 с.
8. Шаврин О.И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
9. Егоров В.И., Митряев К.Ф. Повышение выносливости деталей с концентраторами напряжений алмазным выглаживанием – Вестн. Машиностроения. – № 1, 1981. – С. 47–49.
10. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процессы протягивания / А.М. Розенберг, О.А.Розенберг, Э.К. Посвятенко. – К.: Наук, думка, 1979.– 255 с.
- 11.Топычканов В.В., Жуков П.И. Деформационное упрочнение зубчатых колес – Вестн. машиностроения, 1982, № 6, с. 26–27.
12. Шнайдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1982.– 245 с.
13. Чистосердов П.С. Комбинированные инструменты для совмещения процессов резания и поверхностного пластического деформирования.— М.: НИИмаш, 1975.— 67 с.
14. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием.— М.: Машиностроение, 1981.— 159 с.
15. Андрианов А.И. Прогрессивные методы технологии машиностроения.— М. : Машиностроение, 1975.— 239 с.

16. Лукьянец В.Л. Влияние температуры алмазного выглаживания на эксплуатационные свойства деталей. – Станки и инструмент, 1983, № 12, С. 48–51.
17. Плешаков В.В., Комаров В.А., Сергеев Ю.А. Повышение производительности алмазного выглаживания. – Станки и инструмент, 1982 № 1, С. 32–34.
18. Повышение эффективности алмазного выглаживания / А.А. Михайлов, В.В. Плешаков, В.В. Андрианов, Ю.Н. Савицкий. — Вестн. машиностроения, 1983, № 4, С. 59–61.
19. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978.– 152 с.
20. Парфиянович В.С. Руководство по проектированию процессов чистового накатывания поверхностей. Минский автомобильный завод. Минск: Польша, 1983, 88 с.
21. Рябов А.Я., Броинз А.Д. Повышение ресурса деталей авиадвигателей из высокопрочных сталей. – М.: Машиностроение, 1977.— 99 с.
22. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Л.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. — М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
23. Холмогорцев Ю.П., Берлин В.И. Упрочняющая обработка деталей. – Вестн. машиностроения, 1981, № 2, С. 54–56.
24. Пономарев В.П., Уваров А.В. Влияние режимов электрохимической обработки на микротвердость и шероховатость зубчатых колес. – Вестн. машиностроения, 1980, № 11, С. 17–19.
25. Донсков А.С, Торбило В.М. Выбор режимов алмазного выглаживания. — Вестн. машиностроения, 1981, №5, С. 52–55.
26. Увеличение ресурса машин технологическими методами / В.А. Долецкий, В.Н. Бунтов, Ю.А. Легенкин и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 215 с.
27. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
28. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – К.: Техніка, 1971. – 144 с.
29. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 207 с.
30. Браславский В.М., Топичканов В.В. Однорезцовые накатывающие инструменты пониженной жесткости. – Станки и инструмент, 1978, № 11, С. 21–23.
31. Степанович А.Д., Степанович В.А. Свойства среднеуглеродистых сталей после термомеханической обработки со ступенчатой

- деформацией. – *Металловедение и термообработ. металлов*, 1982, № 2, С. 15–16.
32. Корытко А.Ф. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки зубчатых колес поверхностным пластическим деформированием. – *Станки и инструмент*, 1979, № 1, С. 24.
33. Елизаветин А.М. Повышение надежности машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
34. Громаковский Д.Г. Повышение износостойкости узлов трения упрочняющим деформационным формоизменением контактирующих поверхностей. – *Вестн. машиностроения*, 1983, № 5, С. 24–26.
35. Шнайдер Ю.Г., Маккаваев Е.П. Образование регулярного микрорельефа способом ротационно-ударного деформирования. – *Станки и инструмент*, 1981, № 7, С. 31–32.
36. Хворостухин Л.А., Волков А.Ф. Влияние алмазного выглаживания на усталостную прочность нержавеющей сталей при повышенных температурах. – *Вестн. машиностроения*, 1975, № 7, С. 42–45.
37. Кудрявцев И.В., Наумченко Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
38. Влияние дробеструйного и гидробеструйного упрочнения на малоцикловую ударную усталость высокопрочной стали / А.Н. Овсенко, А.Я. Малолетнев, В.А. Остапенко, А.Р. Ключин. – *Вестн. машиностроения*, 1982, №6, С. 35–37.
39. Гах В.М. Исследование механизма и технологии вибрационного упрочнения твердосплавного инструмента – Надежность режущего инструмента: Науч.-техн. сб. Вища шк. Головное изд-во, 1976, вип. 2, С. 95–102.
40. Бабичев А.В., Матюхин Е.В., Шевцов С.Н. Упрочняемость закаленных шлифовальных сталей при виброударной обработке. – *Вестн. машиностроения*, 1980, № 7, С. 55–58.
41. Бенкин В. А. Влияние финишной механической обработки на работоспособность цилиндрических зубчатых колес. – *Вестн. машиностроения*, 1980, № 10, С. 13–16.
42. Объемная вибрационная обработка / И.Е. Бурштейн, А.П. Бабичев, Б.Б. Ходош и др. – М.: ЭНИМС, 1970. – 95 с.
43. Папшев Д.Д., Фишбейн С.И. Упрочнение режущего инструмента в центробежно-планетарных машинах. – *Станки и инструменты*, 1983, № 5, С. 36–37.
44. Папшев Д.Д. Эффективность методов отделочно-упрочняющей обработки. – *Вестн. машиностроения*, 1983, № 7, С. 42–44.
45. Браславский В.М. Технология обработки крупных деталей роликами – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.

46. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин – М.: Машиностроение, 1979.– 158 с.
47. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой.– Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение. 1977.– 184 с.
48. Пономарев В.П., Уваров А.В. Влияние режимов электромеханической обработки на микротвердость и шероховатость зубчатых колес. – Вестн. машиностроения, 1980, № 11, С. 17–19.
49. Надежность и долговечность машин / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И. Бершадский, А.К. Караулов.– К: Техніка, 1975.– 405 с.
50. Електрофізичні й електрохімічні методи обробки матеріалів / Коваленко В.С. – Видавниче об'єднання «Вища школа», 1975, 236 с.
51. Захарченко П.В. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов / Захарченко П.В., Волкогон В.М., Бочко А.В. и др. – К.: Наук. думка, 1991 – 288 с.
52. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименка. - М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
53. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І. Грабченко та ін. – Львів: Новий світ. 2018. – 471 с.
54. Клименко С.А. Высокотемпературные явления при обработке материалов резанием / С.А. Клименко, А.С. Манохин // Надійність інструменту і оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. – Краматорськ. – 2011. – № 28. – С. 61-65.
55. Азаренков Н.А. Наноструктурные покрытия и наноматериалы. Основы получения. Свойства. Области применения. Особенности современного наноструктурного направления в нанотехнологии / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Д.А. Колесников. – М : Книжный дом «Либроком», 2012. – 368 с.

*Виговський Георгій Миколайович
Балицька Наталія Олександрівна
Глембоцька Лариса Євгеніївна
Мельник Олександр Леонідович*

ПРОГРЕСИВНІ ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ Навчальний посібник

Редактор: Виговський Г.М.
Технічний редактор: Балицька Н.О.
Комп'ютерний дизайн та верстка: Балицька Н.О.
Макетування: Балицька Н.О.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи Серія ЖТ № 08 від 26.03.2004 р.

Формат 60x84/16. Гарнітура Calibri. Ум.-друк. арк. 7,25. Обл.-вид. арк. 7,51.
Електронне видання.

Редакційно-видавничий сектор бібліотеки Державного університету
«Житомирська політехніка» вул. Чуднівська, 103, Житомир, 10005