

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ У ВИДАВНИЦТВІ ТА
ПОЛІГРАФІЇ:
КУРС ЛЕКЦІЙ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня доктора філософії за
освітньо-науковою програмою «Видавництво та поліграфія»
спеціальності 186 Видавництво та поліграфія*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Методи досліджень та обробки у видавництві та поліграфії: курс лекцій [Електронний ресурс] // навч. посіб. для докторів філософії спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» // Укладачі: П. О. Киричок, Т. Ю. Киричок, Т. А. Роїк, О. І. Бараускене. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,38 Мбайт). – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 210 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 1 від 16.09.2021 р.)
за поданням Вченої ради ВПІ
(протокол № 1 від 30.08.2021 р.)*

Електронне мережеве навчальне видання

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ У ВИДАВНИЦТВІ ТА ПОЛІГРАФІЇ: КУРС ЛЕКЦІЙ

Укладачі: *Петро Олексійович Киричок*, д-р. техн. наук, проф.
Тетяна Юріївна Киричок, д-р. техн. наук, проф.
Тетяна Анатоліївна Роїк, д-р. техн. наук, проф.
Оксана Іванівна Бараускене, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Штефан Є. В.*, д-р техн. наук, проф., (професор кафедри репрографії)
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Рецензент *Палюх О. О.*, д-р техн. наук, доц., (доцент кафедри репрографії)
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Навчальний посібник відповідає навчальній програмі дисципліни «Методи досліджень та обробки у видавництві та поліграфії» спеціальності 186 Видавництво та поліграфія освітньо-наукової програми «Видавництво та поліграфія» підготовки докторів філософії Видавничо-поліграфічного інституту. Узагальнено теоретичний матеріал, показано його застосування до розв'язування поставлених практичних задач у відповідності до робіт практикуму.

Для докторів філософії ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського спеціальності 186 Видавництво та поліграфія.

© *П. О. Киричок, Т. Ю. Киричок,
Т. А. Роїк, О. І. Бараускене, 2021*
© *КПІ ім. Ігоря Сікорського (ВПІ), 2021*

ЗМІСТ

Передмова	8
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ	9
1.1. Статистичні дослідження як основа удосконалення технологічних процесів видавничо-поліграфічної галузі	9
1.2. Сучасні уявлення про механізм тертя і зношування матеріалів в умовах тертя	14
1.3. Методи дослідження властивостей матеріалів поліграфічних машин	19
1.3.1. Металографічний аналіз	20
1.3.2. Фізико-механічні випробування	20
1.3.3. Триботехнічні випробування	22
1.3.4. Рентгенофазовий аналіз	22
1.3.5. Дослідження поверхонь тертя	23
1.3.6. Визначення анізотропії орієнтації матеріалів	25
1.3.7. Електронно-мікроскопічний аналіз	27
1.3.8. Дослідження теплопровідності матеріалів	29
1.4. Дослідження параметрів якості поверхні	30
1.4.1. Дослідження фізико-механічних параметрів поверхні	30
1.4.2. Дослідження мікроструктури	33
1.5. Дослідження параметрів геометрії поверхні	34
1.5.1 Параметри шорсткості	35
1.5.2. Прилади для визначення шорсткості	37
1.6. Методика дослідження експлуатаційних властивостей	44

1.6.1. Методика дослідження зносостійкості	44
1.6.2. Дослідження корозійної стійкості	46
1.7. Контроль якості покриття	47
РОЗДІЛ 2. ОБРОБЛЕННЯ ЗМІЦНЕННЯМ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН ТА МЕХАНІЗМІВ	49
2.1. Зміцнення металевих поверхонь деталей методами поверхневого пластичного деформування	49
2.1.1. Вібраційні методи обробки	49
2.1.2. Вигладжування алмазом та іншими надтвердими матеріалами	56
2.1.3. Обкочування та розкочування	64
2.1.4. Дорнування отворів	71
2.1.5. Дробоструминне зміцнення	77
2.1.6. Електромеханічна пластична обробка	86
2.1.7. Зміцнення карбуванням	93
2.2. Зміцнення металевих поверхонь термічними та криогенними методами	96
2.2.1. Термічні методи зміцнення	96
2.2.2. Криогенні методи зміцнення	103
2.3. Фізичні та фізико-хімічні методи зміцнення металевих поверхонь	106
2.3.1. Лазерне оброблення	106
2.3.2. Зміцнення методами іонно-плазмової обробки	114
2.3.3. Зміцнення наплавленням	120
2.3.4. Зміцнення методами електролітичного осадження і розчинення	125
2.3.5. Зміцнення методами електроіскрової обробки	129

2.3.6. Зміцнення методами хімічного осадження із розчинів	133
2.4. Хіміко-технічні методи зміцнення металевих поверхонь	142
2.4.1. Цементация	142
2.4.2. Азотування	146
2.4.3. Нітроцементация	149
2.4.4. Борування	150
2.4.5. Насичення складними сполуками кремнію, алюмінію, сірки, цинку	151
РОЗДІЛ 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ДО ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ МЕТОДАМИ АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ	157
3.1. Абразивні матеріали та інструменти	158
3.1.1. Абразивні матеріали	158
3.1.2. Порошки з синтетичних алмазів і кубічного нітриду бору	161
3.1.3. Абразивні інструменти	162
3.2. Види шліфування. Елементи режиму різання під час шліфування	165
3.2.1. Зовнішнє кругле шліфування	166
3.2.2. Внутрішнє кругле шліфування	168
3.2.3. Плоске шліфування	169
3.2.4. Безцентрове шліфування	171
3.2.5. Шліфування торцем абразивного круга	172
3.3. Особливості абразивного оброблення матеріалів	174
3.4. Основи будови абразивних інструментів	175
3.4.1. Розподіл розмірів абразивних зерен	176

3.4.2. Кількість зерен в одиниці об'єму абразивного інструмента	179
3.4.3. Кількість зерен на одиниці площі робочої поверхні абразивного інструмента	180
3.4.4. Розподіл вершин зерен на робочій поверхні	182
3.4.5. Кількість зерен на одиниці довжини робочої поверхні	185
3.5. Закономірності процесу різання одиничним зерном	186
3.5.1. Дуга контакту шліфувального зерна із заготовкою	186
3.5.2. Миттєві параметри зрізаного шару під час шліфування	188
3.5.3. Параметри шару, що зрізають одним абразивним зерном	189
3.6. Сили різання і потужність під час шліфування	190
3.7. Теплові явища при абразивному обробленні й методи керування ними	191
3.7.1. Особливості теплових явищ під час шліфування	191
3.7.2. Основні шляхи регулювання теплових процесів	192
3.8. Особливості процесу алмазного шліфування	193
3.9. Зношування абразивних інструментів і методи відновлення їх різальних властивостей	194
3.9.1. Особливості зносу абразивних зерен	194
3.9.2. Особливості відновлення різальної здатності шліфувальних кругів	196
3.9.3. Правка шліфувальних кругів	196
3.9.4. Формотворення робочої поверхні абразивних інструментів на струмопровідних зв'язках безпосередньо у процесі шліфування	197
3.9.5. Період стійкості шліфувальних кругів	199
3.10. Призначення режимів різання під час шліфування	199
3.11. Викінчувально-абразивні методи оброблення	201

3.11.1. Хонінгування	201
3.11.2. Суперфінішування	202
3.11.3. Доведення	203
3.11.4. Полірування і стрічкове шліфування	203
3.11.5. Віброабразивне оброблення	204
3.11.6. Магнітно-абразивне оброблення	204
3.11.7. Оброблення потоком вільного абразиву	205
3.12. Високопродуктивні й комбіновані процеси абразивного оброблення	206
3.12.1. Глибинне і швидкісне шліфування	206
3.12.2. Абразивне оброблення з використанням ультразвукових коливань	207
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	209

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник охоплює поняття, концепції, принципи: різноманітних видів досліджень; розроблення та реалізації технологічних процесів оброблення деталей поліграфічного устаткування для усіх типів технологічних процесів видавництва та поліграфії. Посібник містить інформацію про сучасні наукові знання та інноваційні технології у видавництві та поліграфії, теоретичні відомості щодо опанування наявних технологій оброблення та методів досліджень. Навчальний посібник спрямований на підготовку фахівців, здатних розв'язувати задачі дослідницького та/або інноваційного характеру у сфері видавництва та поліграфії, що характеризуються комплексністю і невизначеністю умов, набуття компетентностей у сфері досліджень та інновацій; проектування, удосконалення та створення нових видів виробів та технологій видавництва та поліграфії.

В посібнику відображено окремі напрацювання наукової школи «Технологічне забезпечення видавничо-поліграфічного виробництва, техніки, процесів і систем репродукування», котра протягом двох десятиліть діє на кафедрах технології поліграфічного виробництва та репрографії. Це буде корисним для майбутніх докторів філософії. Навчальний посібник поглибить уявлення про коло професійних питань з новітніх технологій видавництва та поліграфії, зокрема поліграфічного устаткування, дозволить розвинути такі компетентності як здатність розробляти нові та удосконалювати наявні технологічні процеси та види продукції у сфері видавництва та поліграфії, розвине індивідуальне творче мислення, стане підґрунтям для розроблення власного плану наукового пошуку та дослідження.

Посібник призначено для здобувачів, аспірантів усіх форм навчання технічних спеціальностей. Курс відповідає нагальній ринковій потребі підготовки сучасних фахівців.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

1.1. Статистичні дослідження як основа удосконалення технологічних процесів видавничо-поліграфічної галузі

Інформація зі сфери експлуатації є каналом зворотного зв'язку, який впливає на процес проектування і виробництва поліграфічних машин і вносить у нього корективи з умов виготовлення деталей з відповідними показниками надійності. Відомості про відмови поліграфічних машин, про термін служби окремих деталей і вузлів, а також трудомісткість їх ремонту, отримані на основі збирання й обробки статистичних даних на видавничо-поліграфічних підприємствах дозволяють оцінити методи й умови роботи, ремонту і технічного обслуговування машин, тобто правильність організації процесу експлуатації техніки.

Проаналізований досвід підприємств і виявлені відомості про відмови поліграфічних машин, про термін служби окремих деталей і вузлів, а також трудомісткість їх ремонту дозволяють поділити відмови на такі групи:

- механічні відмови;
- відмови електромеханічного обладнання;
- відмови електроніки й комп'ютерної техніки;
- технологічні відмови.

Механічні відмови можуть бути спонтанними, або ж виникати поступово. До спонтанних належать: руйнування деталей під дією циклічного, ударного навантаження і перевантаження; порушення міцності зчеплення й герметичності рухомих з'єднань. Поступовими відмовами є: зношування рухомих з'єднань і підвищення сили або моменту тертя в цих з'єднаннях.

Відмови електромеханічного обладнання мають здебільшого постійний характер. Це зниження опору ізоляції, злипання контактів реле, зникнення контакту в реле й роз'ємах, іскріння електродвигуна, порушення зворотного зв'язку в системах регулювання швидкості обертання електропривода.

Відмови електроніки й комп'ютерної техніки відрізняються широким розмаїттям – наприклад, такі які виникають унаслідок порушення функціонування фотоелектричних датчиків у разі зміни напруги живлення або забруднення світлопропускаючих поверхонь оптичних контактів. Фотоелектричні датчики є важливими елементами систем управління оптичною густиною відбитків у друкарському процесі.

Також широким розмаїттям відрізняються технологічні відмови, які характеризуються відхиленням параметрів технологічного процесу від їхніх номінальних значень або випуском бракованої продукції. Технологічні відмови є вторинними. Вони виникають як у процесі налагоджування машини, так і в разі її нормальної експлуатації.

Протягом останніх років проводився збір статистичних даних у видавничо-поліграфічних підприємствах, таких як Державне підприємство «Преса України» (спеціалізується на випуску книжково-журнальної та акцидентної продукції), Державне підприємство «Київська офсетна фабрика» (спеціалізується на випуску цінних паперів та документів суворого обліку) та Закрите акціонерне товариство «Конві» (спеціалізується на випуску паковальної та акцидентної продукції). За отриманими результатами спостережень встановлено співвідношення причин браку для аркушевого офсетного друку (рис. 1.1), рулонного офсетного друку (рис. 1.2), флексодрукарського обладнання (рис. 1.3) і для післядрукарських операцій (рис. 1.4).

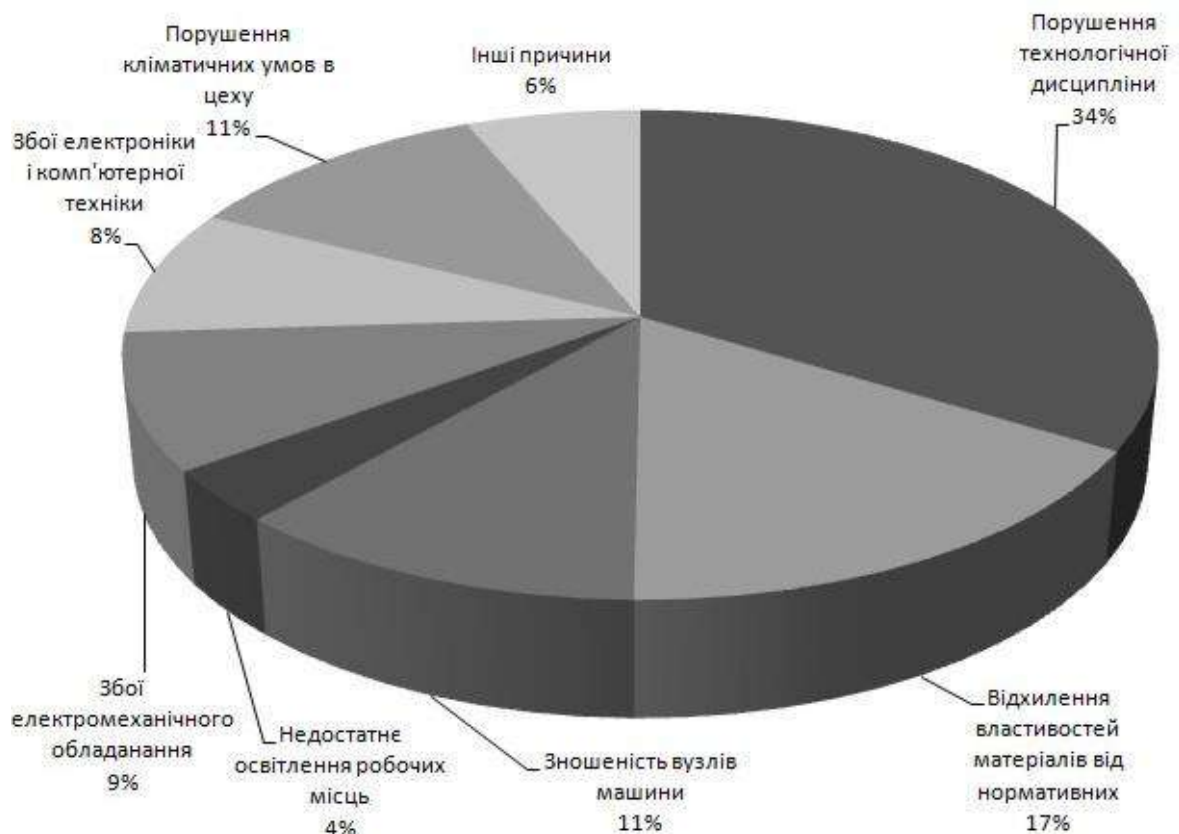


Рис. 1.1. Співвідношення причин браку для аркушевого офсетного друку

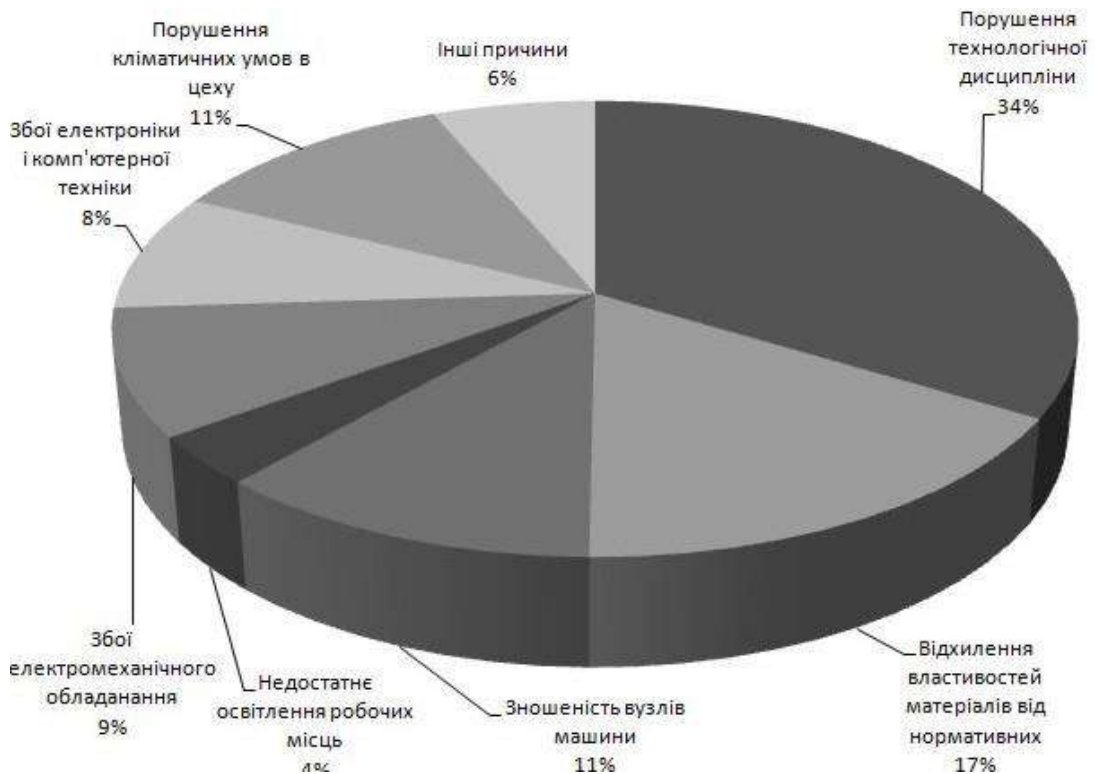


Рис. 1.2. Співвідношення причин браку для рулонного офсетного друку

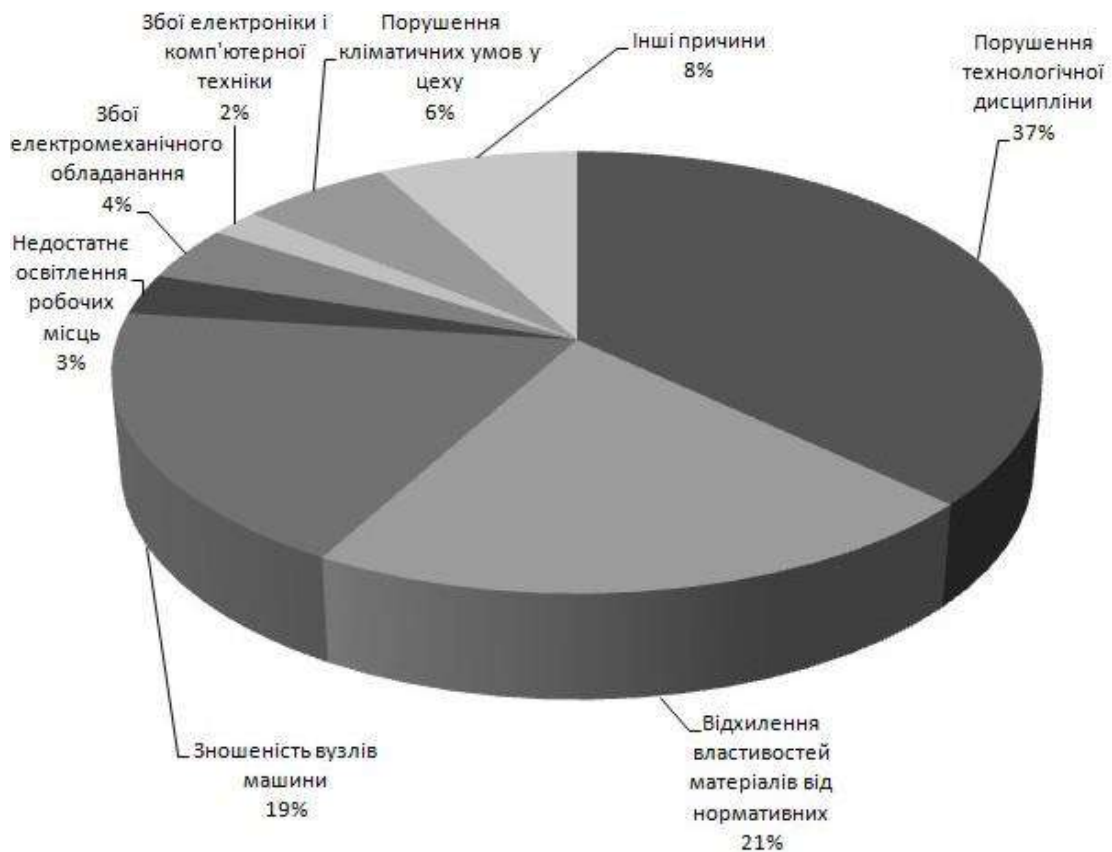


Рис. 1.3. Співвідношення причин браку для флексодрукарського обладнання

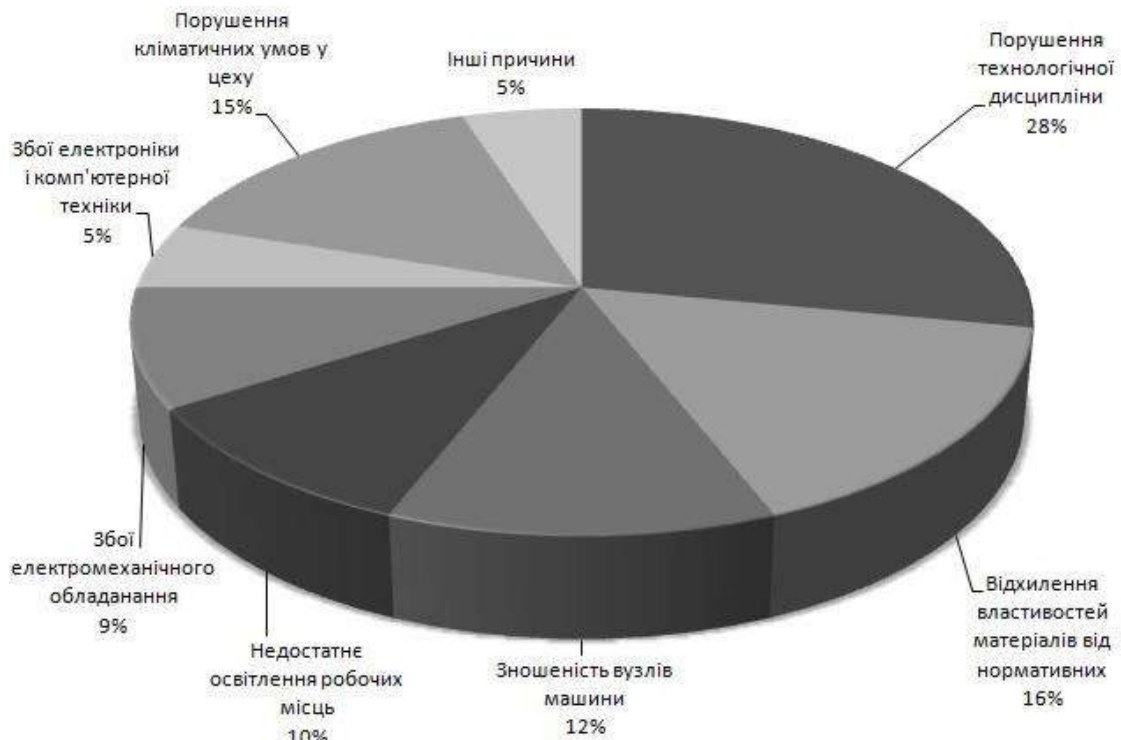


Рис. 1.4. Співвідношення причин браку для післядрукарських операцій

На підставі наведеної інформації можна зробити висновок, що в першу чергу є порушення технологічної дисципліни і відхилення властивостей матеріалу, а також зношуваність деталей та вузлів поліграфічного обладнання приводять до браку продукції, і є однією з актуальних проблем, яку потрібно вирішити.

У поліграфічних машинах, як і багатьох інших, значна частина деталей являє собою тіла обертання, в яких циліндричні поверхні основні. Деталі, у яких обробляється й відновлюється зовнішня циліндрична поверхня, можна умовно поділити на такі групи: вали, втулки, диски, кільця тощо.

У процесі експлуатації механізмів і деталей поліграфічних машин неминуче зношування. Основною причиною зношування поверхонь є тертя. Існують такі види зношування: абразивне, молекулярно-механічне, окислювальне, віповідне, водневе, теплове, зношування в результаті пластичної деформації, викришування.

При відновленні деталей машин, які потребують ремонту, велике значення має вибір раціонального способу їх відновлення. Правильний вибір способу відновлення деталей здешевлює ремонт, зменшує час простою обладнання, скорочує витрати матеріалів і підвищує міжремонтний термін служби. Вибір способу відновлення деталей слід виконувати на основі комплексного аналізу технічної (оцінити надійність і довговічність деталей після відновлення) і економічної доцільності його

застосування. Для обґрунтування вибору способу відновлення деталей, забезпечення довговічності необхідно вивчити умови роботи типових деталей механізмів, мати дані про фізико-механічні властивості та працездатність матеріалів, які застосовують для відновлення зношених деталей.

З огляду на це проаналізовано циліндричні деталі поліграфічних машин посиленого зносу (з підвищеними експлуатаційними властивостями) на вищевказаних підприємствах. Результати аналізу зведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Деякі циліндричні деталі поліграфічних машин з підвищеними експлуатаційними властивостями

№ з/п	Поліграфічне обладнання	Найменування
1	Рулонні та аркушеві офсетні друкарські машини: - Rondoset RO – 170; - Speedmaster SM-102; - KBA Rapida 105. Календарно-ротаційні машини PLAMAG	Букси офсетного, друкарського та формного циліндрів Вали (з пазами та без) Втулки Контактні кільця Кришки ланцюгового транспортера Шийки друкарського та формного циліндра Шийки фарбових апаратів
2	Вкладально-швейно-різальний агрегат 735/4-5КТ	Двохкарданний вал Карданний вал Осі циліндричні Штовхач для загинання
3	Вкладально-швейно-різальний агрегат 745/1	Ексцентрикова втулка Виштовхувач Втулка (зовнішня) Осі циліндричні
4	Кришкоробний автомат Kolbus ДА-36	Вали шлицьові Втулки Шестерні Фланці
5	Лінії клейового безшвейного скріплення “Стар-Біндер”	Вали Втулка муфти перенавантаження Шийки валів
6	Лінія безшвейного скріплення “Ротор-Біндер РБ-5”	Вали Втулки Стакани Тяги

7	Компресор “Atlas Copco”	Поршень Диски Кільця Головка циліндра
8	Фальцювальні машини: - Multieffect 5090, 5071; - Guk K 54-4/KL	Осі (напівосі) з фланцями Втулки Кільця Фальцювальні вали Шийки валів подачі паперу

Основними дефектами циліндричних деталей є знос шийок (порушення циліндричної форми, еліпсність), втрата необхідної чистоти поверхні, порушення щільності посадки і кріплення спряжених деталей, прогин валу або осі, згинання валу, скручування, биття валу, послаблення кріплення осі, тріщини і поломки.

Тому до циліндричних деталей висувають підвищені експлуатаційні властивості, а саме: довговічність експлуатації, зносостійкість, корозійна стійкість, підвищення фізико-механічних властивостей, точність обробки тощо.

1.2. Сучасні уявлення про механізм тертя і зношування матеріалів в умовах тертя

Успіхи в створенні нових антифрикційних матеріалів і забезпеченні оптимальних умов їх експлуатації залежать від глибокого розуміння механізму тертя і зношування, а також від розроблення теоретичних основ процесу тертя.

Тертя і зношування винятково складні процеси, для яких характерні фізичні, хімічні, електрохімічні явища, взаємодія матеріалу тертьових поверхонь і мастил, а також навколишньої атмосфери, деформація поверхневих шарів, перенесення речовини тертьових матеріалів тощо.

До останнього часу не існує достатньо повної теорії цих процесів, що дозволяла б підходити до створення матеріалів вузлів тертя на підставі чітких теоретичних уявлень про механізм тертя і зношування. Установлені в багатьох працях закономірності процесів тертя мають зазвичай частковий характер і залишаються справедливими тільки у вузьких межах конкретного експерименту.

Вивченню механізму тертя присвячено велику кількість праць, і їх можна розділити на декілька основних напрямів, що відображають сучасний стан проблеми: вивчення молекулярної і механічної взаємодії тертьових поверхонь, утомнісного механізму зношування, механізму

утворення робочих прошарків і їх складу, деформації і поверхневої міцності матеріалу під час тертя, механізму вибіркового перенесення.

Уявлення про розмаїтість і суперечливість даних про вплив зовнішніх параметрів на одну з характеристик процесу тертя, наприклад, коефіцієнт тертя, дають узагальнені дані І. В. Крагельського. Відповідно до уявлень І. В. Крагельського характерними для коефіцієнта тертя у разі тертя без змащування є зниження його значень із зростанням навантаження, наявність максимального значення зі збільшенням швидкості тертя, зростання його значень зі збільшенням розміру поверхонь, що контактують, і зменшення – зі зменшенням шорсткості поверхні.

У разі граничного тертя коефіцієнт тертя має такі особливості: за малих навантажень він знижується в міру збільшення тиску до певного значення, потім стабілізується або зростає в результаті часткового переходу тертя від граничного до тертя без змащування. Залежно від швидкості тертя відбувається підвищення або зниження коефіцієнта тертя з наступною його стабілізацією. Великі суперечності також виявляються в залежностях коефіцієнта тертя від зовнішніх умов для металополімерних пар.

Стан досліджень у галузі тертя та зношування поки не дозволяє проектувати вузли тертя без широкого залучення експериментальних методів. Розроблення теоретичних основ механізму процесів тертя останнім часом набуло особливої актуальності, оскільки підвищилися вимоги до матеріалів у зв'язку зі збільшенням навантажень і швидкостей у вузлах тертя сучасних машин і механізмів. Пошуки нових матеріалів для цієї мети вкрай утруднені, оскільки немає чітких уявлень про механізм тертя і зношування, про вплив структури та фізико-механічних й інших властивостей матеріалу на його антифрикційні властивості.

Спочатку процес тертя розглядали як результат зачеплення виступів на поверхні тіл, що контактують. Потім було встановлено молекулярну взаємодію. Ці початкові дані, так само, як і наступні дослідження Кулона, який показав вплив на тертя швидкостей і навантажень, характер матеріалів пари тертя і навколишнього середовища, не пояснювали природу зношування і процесів, що відбуваються під час тертя.

Тільки в останні десятиліття лише частково розкрито фізичну і фізико-хімічну природу тертя і зношування. Через складність процесу були розпочаті спроби розчленувати його та аналітично розглянути його модельні складники, зокрема, пружно-пластичну деформацію, мікрорізання, локальне зварювання, відділення (відрив) атомів, пластичний зсув, сили атомної взаємодії та ін.

Теоретичні основи процесу тертя і зношування розвиваються нині у декількох напрямках. Широко відомі праці І. В. Крагельського і його школи, в основу яких покладено уявлення про молекулярно-механічну природу тертя. Відповідно до цих праць тертя між поверхнями зумовлено насамперед взаємодією (зчепленням) виступів на поверхнях у результаті взаємного проникнення поверхонь, що контактують. Причому на вихідну шорсткість поверхонь накладається додаткова шорсткість, що виникає під тиском стискальних сил і зумовлена неоднорідністю механічних властивостей полікристалічних матеріалів. У місцях реального контакту виникають адгезійні зв'язки (містки зварювання). Ця взаємодія характеризується двома безрозмірними параметрами: відносним проникненням нерівностей і відносною міцністю адгезійного зв'язку на зсув. Отже, керування процесом тертя зводиться до керування деформаційними й адгезійними складниками сил тертя.

І. В. Крагельський указує, що існують два способи зниження тертя і зношування: зменшення деформаційного складника відносного проникнення і зниження адгезійного складника, тобто відносного зсувного опору. В ідеальному випадку мінімального тертя можна досягнути у випадку граничного твердого тіла, покритого м'якою захисною плівкою або з поверхневим шаром зниженої міцності на зсув.

Отже, відповідно до цих уявлень механізм зовнішнього тертя зводиться до пластичного або пружного відтискування більш м'якого матеріалу виниклими нерівностями (деформаційні складники сил тертя) і подолання адгезійних зв'язків, що виникають у контактній зоні (адгезійний складник).

Поряд із цим численні спроби знайти кореляцію між тими або іншими фізичними (теплопровідністю, теплоємністю, електронною структурою) і механічними (твердістю, плинністю, модулем пружності, міцністю під час стискання і зсуву) властивостями, а також фазовим складом і структурою (гетерогенністю або гомогенністю, характером кристалічної ґратки, геометрією структурних складників та ін.) задовільних результатів не дали.

Властивості вторинних структур, що виникають безпосередньо в процесі роботи, справляють вирішальний вплив на зносостійкість пари тертя. Стан робочого прошарку визначається процесами, що перебігають під час тертя – дифузійними, зумовленими перерозподілом елементів у складі матеріалу, абсорбційними, що супроводжуються взаємодією поверхонь тертя з повітрям, мастильними речовинами й іншими навколишніми середовищами, пов'язаними з хімічними взаємодіями. Відбуваються структурно-фазові перетворення, причому активність їх дуже залежить від пластичної плинності поверхневого шару і температури.

Під час тертя досягається тісний зв'язок між найтоншими компонентами вихідних речовин (механічне легування) й утворюються нові фази – карбіди, нітриди, сульфіді, тверді розчини взаємодіючих елементів під впливом великого енергетичного потенціалу утворювальних частинок, локального підвищення тисків і температур та високого ступеня дефектності структури частинок. У хімічних і фізико-хіміко-механічних процесах активно беруть участь кисень, азот, оксид і двооксид вуглецю, що наявні у повітрі, вуглеводні й інші речовини в мастилі.

Найбільший інтерес становить вивчення зазначених фізико-механічних явищ і структури утворюваного прошарку, які характеризують сталий процес тертя. Тільки в умовах його стабілізації можливе тривале функціонування вузлів тертя. Проте до останнього часу більш вивченими були процеси, які відбуваються під час переходу в зону катастрофічного зношування, що супроводжується зчепленням і заїданням поверхонь. Тому для створення надійних матеріалів тертя необхідно насамперед вивчити умови виникнення робочих прошарків, які мають тривалу стійкість. Таким вимогам відповідає окислювальний вид зношування.

Адсорбційне зниження міцності поверхневого шару. Винятково великий вплив на зносостійкість матеріалу можуть справляти поверхнево-активні речовини (ПАР) внаслідок адсорбційного зниження міцності. Під впливом ПАР, наявних у мастилах, що полегшують вихід дислокацій на поверхню деформованих тіл, відбувається пластифікація поверхневого шару і полегшення його деформації. Дефекти кристалічної структури полегшують міграцію атомів ПАР у зародкові тріщини, що призводить до окрихчування матеріалу.

Поверхнево-активні речовини впливають на тверді тіла, змінюючи поверхневу енергію, твердість та інші характеристики матеріалу. За цих умов винятково великий вплив на зносостійкість матеріалу справляють процеси пластичної деформації. У зв'язку з цим великого значення набувають дослідження, спрямовані на вивчення хімічних і структурних змін у поверхневих шарах матеріалів під час тертя.

Наразі детально розглянуто процеси, що відбуваються у поверхневих шарах матеріалів під час тертя, і питання поверхневої міцності. Створена класифікація видів зношування, в основу якої покладено уявлення про чільну роль у механізмі зношування механіко-хімічного (окислювального) зношування. Сформульовано положення про те, що поверхнева міцність матеріалів зумовлюється універсальним явищем структурної пристосованості матеріалів під час тертя, сутність якого зводиться до такого.

Під час тертя на поверхнях матеріалів відбувається пластична деформація. Поверхневий шар змінює свою структуру і переходить в

активований стан. Із такого термодинамічно невірноваженого стану матеріал прагне негайно перейти в пасивний стан через адсорбційну, дифузійну або хімічну взаємодію із зовнішнім середовищем. В результаті цієї взаємодії утворюється нова фаза, що і стає об'єктом поверхневої руйнації. Проте механізм руйнації реалізується не за всіх умов тертя. Якщо не утвориться достатньо міцного і зносостійкого прошарку вторинних структур, що захищає основний матеріал пари тертя від безпосередньої взаємодії, процес тертя перебігатиме в умовах пошкоджуваності, тоді відбувається зчеплення мікрорізання, проникнення і проорювання, фретинг-процес тощо.

Принцип структурної пристосованості ґрунтується на такому механізмі. Під час тертя в результаті деформації структура найтоншого поверхневого шару перебудовується в нову тонкодисперсну фазу. Відповідно до принципів термодинаміки усі види взаємодії під час тертя відбуваються у мінімальних об'ємах у тонкоплівковому об'єкті, здатному поглинати максимальну енергію до руйнації. Як зазначається у праці, у разі руйнації за принципом структурної пристосованості питома робота руйнації на декілька порядків вища, ніж за інших процесів руйнації під час тертя. Такі тонкі зруйновані прошарки перебувають в надзвичайно хиткому стані, у результаті чого з великою швидкістю мають відбуватися процеси пасивації. Їх перебіг зумовлено взаємодією з активними елементами середовища (киснем, сіркою, фосфором, хлором, азотом та ін.) і матеріалом контртіла, а також внутрішньою перебудовою структури поверхневих шарів. Кожний із цих видів пасивації відбувається паралельно відповідно до термодинамічних умов, що виникають під час тертя.

У результаті пасивації з'являються нові однофазні або гетерофазні тонкоплівкові об'єкти (вторинні структури). Вторинні структури утворюються у певному діапазоні режимів тертя за наявності динамічної рівноваги процесів активації і пасивації. Внаслідок зношування поверхневої плівки в умовах тертя активуються нові прошарки основного матеріалу, і завдяки наступним процесам пасивації прошарок вторинної структури відновлюється. Вторинні структури за нормального тертя металів мають ультрадисперсну орієнтовану будову. Вони метастабільні і являють собою здебільшого тверді розчини й нестехіометричні сполуки металів та активних компонентів середовища.

Відповідно до сучасних уявлень роль процесу припрацювання поверхонь тертя зводиться до генерації прошарку вторинних структур в результаті всього комплексу фізичних, фізико-хімічних і механічних процесів, що відбуваються під час тертя.

Розглянуті результати досліджень механізму тертя здебільшого отримано на звичайних литих матеріалах, проте вони цілком застосовані і

для тлумачення процесів, що відбуваються під час тертя композиційних спечених матеріалів. Особливості технології виготовлення, складу і структури композиційних спечених матеріалів дозволяють успішно реалізовувати отримані уявлення про механізм тертя для впливу на процес тертя в потрібному напрямі.

Методи порошкової металургії дозволяють виготовляти композиційні антифрикційні матеріали різноманітного складу з наявністю в матеріалі рівномірно розподілених вкраплень речовин, що відіграють роль твердого мастила – графіту, сульфідів, селенідів, фторидів та інших сполук, які активно беруть участь у створенні вторинних структур на поверхнях тертя. Крім того, у структуру матеріалу можна вводити тверді зносостійкі домішки типу карбідів та інших твердих сполук, що мають невисокий коефіцієнт тертя і перебирають на себе навантаження, підвищуючи несучу здатність підшипника. У широких межах можна регулювати дисперсність вкраплень і їх розподіл у матеріалі підшипника.

У спечених матеріалах можна зробити каркас з міцного матеріалу порожнини в якому заповнені м'яким матеріалом або сплавом, спроможним відігравати роль твердого мастила. І, навпаки, в матриці м'якого матеріалу можуть бути розподілені тверді вкраплення, які підвищують його несучу здатність.

Усі ці особливості відкривають великі перспективи для цілеспрямованого регулювання властивостей антифрикційних матеріалів стосовно до конкретних умов їх експлуатації, забезпечення потрібної поверхневої й об'ємної міцності матеріалу і перебігу процесів, що сприяють утворенню прошарку вторинних структур з оптимальними антифрикційними властивостями.

1.3. Методи дослідження властивостей матеріалів поліграфічних машин

Для забезпечення стабільного функціонування вузлів тертя повинні мати цілий комплекс фізичних, фізико-механічних, структурних, теплофізичних, триботехнічних, технологічних властивостей, які тільки у сукупності, при одночасному оптимальному поєднанні зможуть зробити роботу підшипника, вузла тертя та виробу в цілому тривалою та безперебійною.

У зв'язку з цим від точності вимірювань, достовірності, повторюваності результатів досліджень вищевказаних властивостей залежить вірність обраного напрямку досліджень, і як слідство, придатність того чи іншого з розроблених матеріалів.

Тому при вивченні комплексу властивостей використовували багато методик, що затверджені стандартами та велику кількість спеціальних тонких методів досліджень, причому з використанням паралельних досліджень одного показника різними методами.

1.3.1. Металографічний аналіз

При створенні композиційних підшипникових матеріалів питання забезпечення вигідної, з точки зору трибоніки, металографічної структури матеріалу та можливості керувати нею у потрібному напрямку для придання матеріалу високих експлуатаційних властивостей є найважливішими аспектами даного дослідження.

Для вивчення зеренної структури, поруватості, розподілу легуючих елементів і домішок, присутності тих чи інших фаз у твердому розчині використовували методи оптичної металографії з використанням фотомікроскопа віддзеркаленого світла МИМ-8, що дає можливість досліджувати травлені та нетравлені мікрошліфи з матеріалів при збільшеннях до $\times 1000$ та фотографувати їх.

Виготовлення мікрошліфів здійснювали методом механічного полірування у два етапи: з грубим та дрібним абразивом (або поліруючою речовиною) відповідно. Зразки полірували на горизонтальному полірувальному крузі, що покритий сукном, поліруючою речовиною були суспензії з оксиду алюмінію, хрому та алмазні порошки.

Нетравлені мікрошліфи використовували для аналізу дрібних фаз та включень. Травлені шліфи застосовували при вивченні механізму структурної побудови досліджуваних матеріалів, виявлення змінюючих фаз, їх розподіл та властивості. Травлення здійснювалося різними розчинами у залежності від типу досліджуваного матеріалу та шуканої тої чи іншої структурної фази. Насамперед, для зразків з ЕП975 – реактиви кольорового травлення Мураками та Марбле («царська горілка» не здатна розтравити шліф). Реактив Мураками містить 10 г червоної кров'яної солі, 10 г – КОН; 100 мл – H_2O дист.; реактив Марбле: 20 cm^3 $HCl_{конц}$; 20 cm^3 – C_2H_5OH ; 4 г – $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. Зразки з матеріалів на основі міді протравлювалися з використанням реактиву, до складу якого входить 3% H_2O_2 + 25% NH_4OH у співвідношенні 1:1.

1.3.2. Фізико-механічні випробування

При відпрацюванні технологічних режимів виготовлення підшипникових матеріалів здійснювали визначення щільності матеріалів згідно зі стандартними методиками ГОСТ 18898–73. Це дозволило визначати показники пористості досліджуваних композитів. Одержані дані

дають змогу контролювати поведінку того чи іншого матеріалу у процесі його виготовлення та оцінювати технологічність прийнятих складів матеріалів і режимів їх виготовлення.

При визначенні фізико-механічних характеристик одержаних підшипникових матеріалів було виготовлено стандартні зразки для проведення випробувань на міцність при вигинанні, твердість та ударну в'язкість згідно з ГОСТ 18228–94; ГОСТ 25698–98; ГОСТ 26528–98 відповідно.

Умови випробувань значно впливають на отримані результати. Тому необхідно було задати ці умови для того, щоб параметри фізико-механічних властивостей можна було порівняти та відтворювати їх.

Наприклад, при вимірюванні твердості за Бринелем стандартними умовами випробувань були навантаження 4901,95 Н (250 кгс), діаметр кульки 5 мм, тривалість навантаження 10...15 с.

В залежності від одержаного діаметра відбитка на зразках за складеними таблицями визначали значення твердості матеріалів за Бринелем.

При випробуваннях матеріалів на міцність при вигинанні виготовлювались зразки розмірами 5 мм x 10 мм x 55 мм, а сам процес випробування на деформування здійснювали на універсальній розривній машині МР-10. Зразки вказаних розмірів піддавали ламанню на опорах з відстанню між ними 40 мм. Межу міцності при вигинанні визначали за формулою:

$$\sigma_{\text{виг}} = 3P \cdot l / 2b \cdot a^2,$$

де P – руйнівне навантаження, кгс (Н);

$\sigma_{\text{виг}}$ – межа міцності при вигинанні, кгс/мм² (МПа);

l – відстань між опорами, мм;

b та a – відповідно ширина та товщина зразка, мм.

Випробування на ударне вигинання (ударну в'язкість) мають найбільше значення для визначення опору матеріалів, що досліджувались, крихкому руйнуванню. Для цієї мети (згідно з ГОСТ 26528–98) виготовлялися зразки, розмірами 10 мм x 10 мм x 55 мм, які піддавали випробуванням на маятниковому копрі КМ-1,5 (виробництво Німеччини), що працює за методом Шарпі (тобто зразок розташовано на двох опорах). Шкала приладу показує роботу удару A_0 (Дж). Для визначення ударної в'язкості KC (Дж/м²) користувались формулою $KC = A_0/S$, де S – площа поперечного перерізу, м².

1.3.3. Триботехнічні випробування

Аналіз процесів, які приводять до зносу, показує, що зносостійкість матеріалів визначається великою кількістю факторів і поєднанням властивостей тертьових матеріалів; якістю контактуючих поверхонь (чистота поверхні, змазка); характером руху (ковзання, качіння, удари, течія); швидкістю взаємного переміщення; рівнем навантаження; відводом відділених частинок (продуктів зносу) або присутністю частинок якогось іншого матеріалу, який ускладнює тертя тощо.

Тому з науково-технічної та практичної точки зору при створенні підшипникових матеріалів важливим показником їх працездатності є висока антифрикційність, куди відносяться якомога нижчі величини коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування матеріалів.

У даному дослідженні визначення триботехнічних характеристик здійснювали з використанням методики високотемпературної трибометрії.

При проведенні випробувань на високотемпературній установці ВМТ-1 проводили автоматичний запис моментів тертя на діаграмний папір у залежності від температури випробувань. Характер запису (частота, амплітуда коливань) доповнюють інформацією про якісні особливості процесів тертя. Наприклад, при низьких температурах, коли виникають містки «холодного» зварювання (явище схоплювання) амплітуда коливань значно збільшується та переходить у плавну лінію-запис при високих температурах.

Тобто в системі автоматичного запису, відбувається вимірювання сили тертя без зупинки установки при різних навантаженнях, температурах, швидкостях ковзання для кожної пари тертя. Від величини сили тертя F при конкретних навантаженнях P не складно перейти до розрахунку коефіцієнта тертя μ згідно формули $\mu = F/P$.

Автоматичний запис темпу зношування будь-якого з досліджених матеріалів дає значення I (інтенсивності зношування) у лінійних одиницях – зношення у мікрометрах на 1 км шляху тертя (мкм/км).

1.3.4. Рентгенофазовий аналіз

Дослідження проводиться на дифрактометрі «ДРОН-4С-01» в Cu – характеристичному випромінюванні. Принцип дії дифрактометру "ДРОН-4С" базується на дифракції рентгенівських променів від атомних площин кристалічної ґратки досліджуваного зразка. Рентгенівські промені з довжиною хвилі λ , відбиваються від площин hkl , що задовольняє рівнянню Вульфа-Брега:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta ,$$

де d_{hkl} – міжплощина відстань, Å;
 θ – кут відбиття дифрагованого пучка, град;
 λ – довжина хвилі, Å.

В дифрактометрі використовується схема фокусування по Бреґу-Брентано. Пучок рентгенівських променів дифрагує від площин hkl , паралельних площині зразка і фокусується на приймальній щілині детектора.

При дослідженні структури зразків використовували Cu випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_{Cu} = 1,54051$ Å. Для отримання якого використовувався вигнутий кристал монохроматор (LiF).

1.3.5. Дослідження поверхонь тертя

Сучасне металознавство нараховує більше двадцяти фізичних методів дослідження структури, сполук та властивостей поверхневих шарів матеріалів. У наших дослідженнях застосовувалися методи: растрової електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу.

Методика растрової електронної мікроскопії. Фактографічні дослідження в Даній роботі проводились в Центрі кристалофізичних досліджень ІНМ В. М. Бакуля (Гонтар О. Г., Ткач В. М.) з використанням методу растрової електронної мікроскопії на двох мікроскопах. Растровому електронному мікроскопі EVO 50XVP (Німеччина, Carl Zeiss) дослідницького класу, який має велику аналітичну камеру з можливістю підбору багаторівневої та гнучкої комплектації, що забезпечує отримання результатів високої якості. Він забезпечує роздільну здатність 2...3 нм, високу точність позиціонування зразків та їх прецизійне переміщення в процесі роботи, дозволяє використовувати увесь спектр вакуумних режимів.

Особливістю мікроскопу є спеціально розрахована аналітична геометрія для рентгенівських спектрів, що працює в комплексі з дифракційними приставками, які забезпечують високу якість кінцевого результату за об'ємом отриманих результатів. Також використовували мікроскоп-мікроаналізатор «CamScan-4DV», основне призначення якого відтворення за допомогою електронопроменевої трубки тривимірного зображення поверхні зразка за загальноприйнятою методикою. При цьому можливе дослідження мікротопографії грубих поверхонь і масивних зразків, що не досягається у випадку традиційних методів світлової і трансмісійної електронної мікроскопії. Роздільна здатність на зображенні при задовільних умовах зйомки може досягати 5...6 нм, а значна глибина фокуса, що виникає внаслідок малого кута розбіжності електронного пучка

(приблизно 10 мрад), більш ніж у 300 разів перевищує глибину фокуса у світловому мікроскопі, що працює в аналогічних умовах.

Взаємодія електронів первинного пучка з матеріалом досліджуваного зразка приводить до появи: 1) зворотньорозсіяних електронів; 2) повільних і швидких вторинних електронів; 3) електронів, поглинених зразком; 4) ОЖЕ-електронів; 5) електромагнітного і рентгенівського випромінювання. Найбільший інтерес для аналізу представляють вторинні електрони малої енергії (згенеровані в зразку пучком), а також високоенергетичні відбиті електрони (первинні електрони, відбиті від поверхні зразка). Детектування низькоенергетичних вторинних електронів здійснюється осцилятором з прикладанням «поточного» потенціалу 12 кВ. Сигнал від електронів даного виду дозволяє фіксувати зображення ділянок поверхні, які в силу їх геометрії не мають прямої видимості від осцилятора.

У випадку роздільного детектування сигналів від зворотньорозсіяних електронів, що у даному приладі здійснюється за допомогою твердотілого чотирьохполюсного детектора, можливе одержання додаткової інформації. Оскільки відношення зворотного розсіювання відбитих і падаючих електронів зростає зі зростанням атомного номера матеріалу зразка або його ділянки, даний режим зображення широко використовується у випадку контрасту, обумовленого різницею в атомних номерах аналізованих елементів або середнього електронного номера у випадку багатоелементних зразків (режим «фазового контрасту»). Дана методика дозволяє також детектувати поверхневі забруднення на зразку.

У роботі була також використана інформація, отримана в режимі детектування електронів поглинених зразком (режим «поглинання струму»), з застосуванням програми обробки рентгенівського випромінювання досліджуваного зразка.

Струм, поглинений зразком, може використовуватися для реєстрації сигналів зображення. Поглинений струм, або струм зразка ($I_{зр.}$) у зразках з нормальною провідністю представляє різницю між струмом падаючого пучка ($I_{вх.}$) і сумарним значенням струму відбитих ($I_{від.}$) і вторинних електронів ($I_{вт.}$):

$$I_{зр.} = I_{вх.} - (I_{від.} + I_{вт.}).$$

Сигнал у поглинених електронах, як правило, є зворотнім на контрасті в порівнянні з зображенням у вторинних електронах.

Методика визначення хімічного складу. Визначення хімічного складу поверхонь зразків, а також різних фаз і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу, сутність якого полягає в генерації рентгенівського випромінювання при падінні первинного електронного пучка на поверхню досліджуваного зразка.

Коли падаючий електронний пучок високої енергії досягає поверхні зразка, частина його енергії перетворюється в рентгенівські промені. Випромінюваний рентгенівський спектр складається із спектра неперервного рентгенівського випромінювання, що включає рентгенівські промені всіх значень енергії, аж до енергії падаючого пучка, і з ліній характеристичного рентгенівського випромінювання (відомого як ряд ліній *K*-, *L*- і *M*-серій), за допомогою яких можна однозначно ідентифікувати хімічний склад зразка.

Детектування і аналіз рентгенівських променів, що випускаються поверхнею зразка під дією електронного пучка, проводилися за допомогою дисперсного енергетичного спектрометра LZ-5 з обробкою отриманих результатів, включаючи кількісний аналіз з урахуванням всіх похибок, у мінікомп'ютерній системі «Link-360».

Використання програми «Lintscan», що передбачає розбивку лінії сканування на 128 крапок з наступним кількісним хімічним аналізом, дозволяє реєструвати та обробляти рентгенівське випромінювання досліджуваного зразка. За допомогою цієї програми можна зафіксувати характерні діапазони енергії (як правило, співпадаючі з лініями досліджуваних елементів або домішок), управляти розгорткою растрового електронного мікроскопа і збирати інформацію про відносний вміст елементів вздовж певної лінії з наступною обробкою і роздруковкою результатів досліджень.

1.3.6. Визначення анізотропії орієнтації матеріалів

Напряму впорядкованості структури завжди можна охарактеризувати функціями зсуву, повороту і зрушення періодичності, тобто відповідно функціями $f(x,y,z)$, $f(\alpha,\beta,\gamma)$ і $P(x,y,z)$. Всі ці характеристики, що розкривають ступінь організації структури, проявляються в спектрі і можуть бути зареєстровані і якісно оцінені при скануванні вузького електронного променя по поверхні, що аналізується. Фур'є-аналіз отриманого спектра проводився за допомогою програми SIA 1.00, адаптованої до більшості сучасних комп'ютерів. У даній програмі аналізується двовимірний Фур'є-спектр. Різні ділянки структури по-різному відбивають скануючий промінь, що й спричиняє зміну відбитого сигналу.

Дана програма працює у двох режимах. У першому режимі кількісно оцінюється рівень анізотропії і орієнтації блоків структури щодо головних діючих напруг за допомогою авто кореляційного та спектрального аналізу фрактограм поверхні.

У другому режимі якісно по ширині і складності фрактограми оцінюються: складність структурного стану (кількістю коефіцієнтів у

рівнянні Фур'є), ступінь анізотропії головних діючих напруг і кількісна оцінка ступеня впорядкованості структури на поверхні тертя (фазовий аналіз). З теорії фазового аналізу відомо, що кожна фаза має нормальний розподіл за оптичною щільністю. При цьому кожній фазі відповідає певний компонент структури. По математичному очікуванню і величині середньої потужності оптичної щільності встановлюється приналежність спектральної щільності до певної із фаз досліджуваної структури.

При прямому скануванні електронного променя по поверхні зображення визначається кут між віссю інерції і віссю абсцис кожного з елементів зображення. При зворотному скануванні для зазначених геометричних ознак розраховується гістограма довжин хорд елементів зображення для кожного з виділених на зображенні кутових діапазонів (від 0 до 180° з інтервалом 10°) (рис. 1.5). Гістограму розраховують шляхом підрахунку числа потраплянь випадкової величини (у даному випадку – довжин осей інерції елементів зображення) у задані розряди. Статистичний аналіз орієнтації елементів зображення узагальнений головним вектором орієнтації елементів зображення щодо обраного напрямку сканування, сполученого з віссю абсцис.

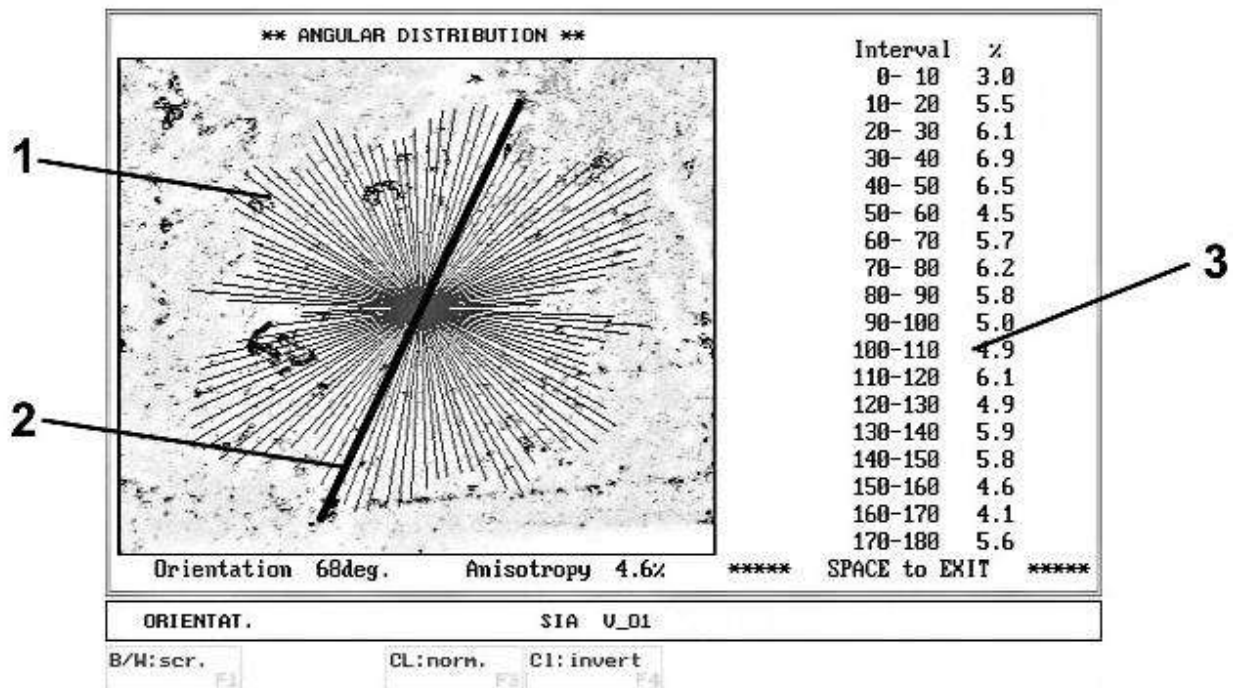


Рис. 1.5. Гістограма орієнтації елементів зображення, побудована за допомогою SIA 1.00, де 1 – довжини хорд елементів зображення для кожного кутового діапазону; 2 – головний вектор орієнтації структурних елементів зображення; 3 – кількість блоків структурних складових для кожного кутового діапазону, %

Аналіз складності структурного стану і реологічних особливостей поверхні тертя проводили за двовимірним дифракційним спектром. Він визначає усередині розміри структурних складових, відстань між ними, концентрацію, довжину між фазних границь і дозволяє досліджувати анізотропію структури в цілому, пов'язану з анізотропією оптичних, механічних і інших властивостей.

Результати порівняльного аналізу гістограм поверхні при однакових збільшенні і напрямку сканування на електронно-растровому зображенні дозволяють оцінювати характер пакування і розмір елементів структури, робити порівняльну оцінку анізотропії досліджуваних поверхонь за шириною гістограми і кількості максимумів на ній.

Одночасно з аналізом анізотропії поверхні проводився якісний аналіз її текстури за фоновими ознаками: яскравість, розмір, форма, просторова орієнтація (може бути випадковою, з парною взаємодією між ознаками, що характеризують текстуру, та ін.). Текстуру можна описати декількома ознаками: дрібнозерниста, грубозерниста, гладка, гранульована, безладна, лінійчаста і т. д. Текстура поверхонь формується під впливом зовнішніх силових факторів і мікрометалургійних процесів. Текстури характеризують орієнтацію напружень по границях структурних складових.

1.3.7. Електронно-мікроскопічний аналіз

Для дослідження процесів структуроутворення нових матеріалів на субмікронному рівні застосовували методи електронної мікроскопії з використанням для цієї мети електронних мікроскопів просвічуючого типу (емісійний) і електронний мікроскоп комбінованого типу (для просвічування та сканування) JEM-1250/1000 (Японія), EM-200 (м. Суми).

За допомогою електронного мікроскопа здійснювали вивчення тонкої структури матеріалів та утворених плівок вторинних структур (плівок тертя матеріалів).

Використання електронної металографії, особливо мікроскопу JEM-1250/1000, який забезпечує високу розрізняльну здатність по полю 0,1 нм (розділення точок на відстані 0,1 нм), дозволило спостерігати структуру матеріалів і плівок тертя на атомарному рівні та аналізувати кристалічну структуру за допомогою електронної мікродифракції у тій самій точці (шляхом простого переключення приладу на іншій режим). Картинки електронної дифракції (електронограми) представляють собою зображення з окремих точок. Оскільки у дифракції приймають участь полікристали, то утворюються кільця Дебая-Шерера, тобто одержується полікристалічна

електронограма. Аморфні структури при дослідженні плівок тертя давали на електронограмах розмитий кільцевий фон.

Для розшифрування електронограм, тобто при вирішенні питання наявності тої чи іншої фази та визначення її кристалічної структури, порівнювали експериментальні дані про міжплощинні відстані (d_m – починали з максимальної) та інтенсивності ліній з табличними. Якщо у межах похибки експерименту дані співпадали, то наявність фази було ідентифіковано, якщо не співпадали за максимальну відстань d_m – приймали інше значення і операцію повторювали.

По суті така електронограма є збільшеним зображенням плоского перетину зворотної решітки кристалу. Тому, при експериментальних розрахунках d_m використовували формулу:

$$d_m = L \cdot \lambda / r,$$

де L – постійна приладу;

λ – довжина хвилі електронів;

r – відстань від центрального рефлексу до обраного рефлексу на електронограмі або радіус кільця на кільцевій електронограмі полікристала.

Постійну L визначають при калібруванні. Розраховуючи d_m , що відповідають кільцевим рефлексам, та оцінюючи симетрію дифракційної картини, індиціювали (визначали індекси Міллера) ці рефлекси (кільця) і тим самим встановлювали структуру і параметри дослідженої фази. Найбільша точність, яку можна одержати, використовуючи дифракцію від обраної ділянки, складає $\approx 0,1\%$ (як правило $0,5 \dots 1\%$).

Дуже важливу інформацію про досліджувані матеріали гетерофазного складу давала методика вивчення тонкої структури за допомогою реплік (частіше вуглецевих) одно- або двохступінчастих, а також різновидність цієї методики - вуглецеві репліки з екстракцією. Зразок травили до і після напилення вуглецю ($\delta = 20 \dots 30$ нм) таким чином, щоб одна фаза (як правило матриця) розчинювалась швидше іншої (або інших). При цьому частинки виділень другої фази екстрагувались реплікою. Оскільки положення цих частинок фіксовано у шарі вуглецю, їх розподіл у репліці точно відповідає розподілу у зразку.

Дослідження тонкої структури композиційних матеріалів виконували також за допомогою метода тонкої фольги: метал зтоншували до товщини, що прозора для електронів. Гранично-допустима товщина залежить від атомного номеру металу та прискорюючої напруги. Так, у наших експериментах товщина фольг з матеріалів на основі порошоків-відходів сталей становила $1,5 \dots 2,0$ мкм при $V = 1000$ кВ та до $0,8$ мкм при $V = 200$ кВ; для матеріалів з порошоків-відходів силуміну – $3,5$ мкм при $V = 1000$ кВ і до $1,2$ мкм при $V = 200$ кВ; для матеріалу на основі нікелевого сплаву

EP975 – для відповідних значень напруги 2,0 мкм та 0,9 мкм. Мікроскоп EM-200, для порівняння, має прискорюючу напругу 200 кВ, а JEM – 1250/1000 – 1250 кВ.

В результаті одержання тонких фольг також ідентифікували другі фази з використанням описаного вище методу дифракції електронів, причому в окремих випадках здійснювали аналіз частинок з діаметром ~ 100 нм.

1.3.8. Дослідження теплопровідності матеріалів

Температурний чинник є таким, що визначає розвиток тих або інших фізико-хімічних процесів в зоні тертя, пов'язаних із структурно-фазовими змінами в поверхневих шарах тертя, окиснювальними процесами в змащувальній плівці, на поверхнях, що труться, тощо.

Тому такі теплофізичні характеристики як теплопровідність підшипникових матеріалів зумовлюють величини температур в зоні тертя, і, отже, інтенсивність протікання фізико-хімічних процесів. Звідси – важливість завдання по дослідженню теплофізичних характеристик матеріалів.

Одним з простих і доступних методів визначення теплопровідності є метод трьох точок, вживаний в Інституті машинознавства АН Росії. Метод полягає в наступному. Дві пластинки розміром 50 мм x 90 мм x (5...20) мм, одна з яких є еталонною (тобто її теплопровідність як функція температури наперед відома), а інша випробовувана, поміщаються між холодильником і нагрівачем і притискаються одна до іншої з визначеним достатнім для щільного прилягання зусиллям. Розташування пластинок нагрівача, холодильника, а також розміщення вимірювальних термопар показано на рис. 1.6.

Регулюючи нагрів, досягають встановлення постійного теплового потоку, тобто постійності температур T_1 , T_2 , T_3 . Потім, заміряв ці температури, обчислюють теплопровідність випробовуваного матеріалу за формулою:

$$\lambda_x = \frac{\delta_u (\lambda_s \cdot \lambda_u)}{\delta_s} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_3} \right), \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)},$$

де λ_s – теплопровідність еталонного матеріалу; λ_x – теплопровідність зразка; λ_u – теплопровідність нагрівача; δ_u – товщина випробовуваної пластини; δ_s – товщина еталонної пластини; T_1 – температура нагрівача; T_2 – температура зразка; T_3 – температура еталона.

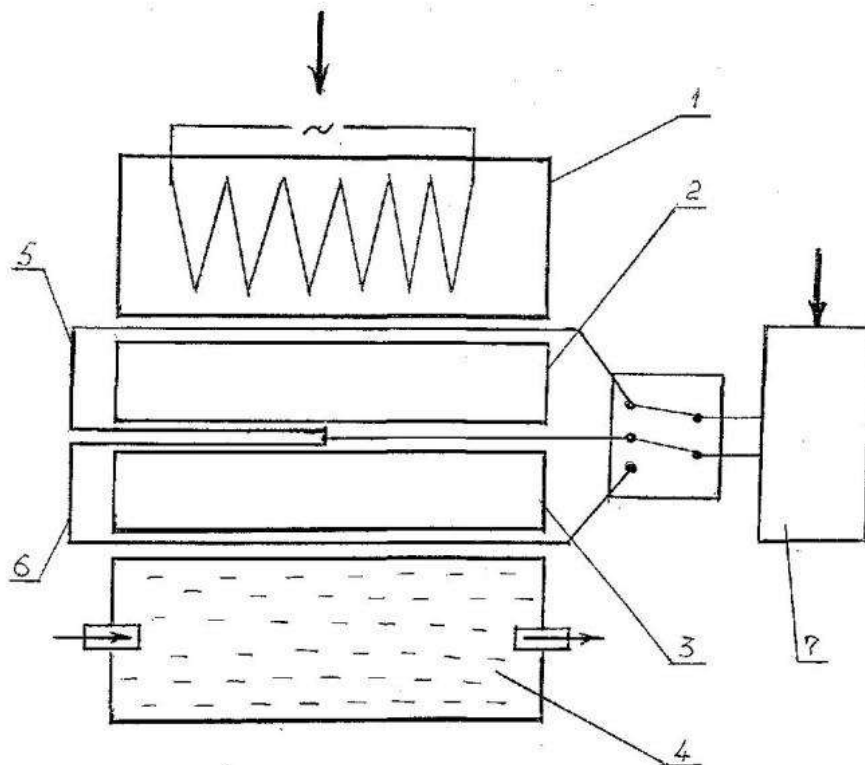


Рис. 1.6. Схема приладу для визначення теплопровідності матеріалу, де 1 – нагрівач; 2 – зразок, що досліджується; 3 – матеріал з відомою теплопровідністю; 4 – холодильник; 5, 6 – термопарі; 7 – вимірювальний потенціометр

Дослідження отриманих даних теплофізичних вимірів полегшує вибір раціональних умов експлуатації натурних вузлів тертя, працюючих при високих швидкостях і температурах. Крім того, використання цього методу визначення теплопровідності при дотриманні всіх умов дозволяє надати більш повну характеристику матеріалів, які використовуються в вузлах тертя машин та механізмів.

1.4. Дослідження параметрів якості поверхні

Якість поверхні – це комплексний показник, що характеризується структурною будовою, фізико-механічними й геометричними параметрами поверхневого шару.

1.4.1. Дослідження фізико-механічних параметрів поверхні

До фізико-механічних параметрів належать: твердість, деформаційне зміцнення (наклеп), залишкові напруження.

При визначенні фізико-механічних характеристик було виготовлено стандартні зразки для проведення випробувань на твердість згідно з ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу» і для проведення випробувань для визначення механічних властивостей матеріалу відповідно до ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Під дією зовнішнього впливу поверхневий шар деталей при зношуванні може зазнавати різноманітних змін, які зумовлені деформацією та підвищенням температури контакту. У процесі деформування матеріал зміцнюється і його твердість підвищується. З погляду експлуатації деталей більший інтерес викликає твердість поверхневого шару.

У лабораторних умовах мікротвердість за Віккерсом травлених шліфів вимірювалася стандартним способом за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3. Як індентор було застосовано алмазну пірамідку з квадратною основою і двограним кутом при вершині 136° при навантаженнях 20 та 50 г протягом 10 с. Точність вимірювання окуляр-мікрометра АМ9-3 на приладі ПМТ-3М становить $\pm 0,5$ поділки шкали барабана або, з урахуванням масштабу збільшення, з точністю до 0,15 мкм. Найбільша основна похибка окуляр-мікрометра на всьому діапазоні вимірювань становить ± 2 мкм відповідно до паспорта. Шліф встановлюється і закріплюється на предметному столику притискними лапками або тонким шаром пластини.

Оцінка мікротвердості проводилася за формулою:

$$H_{\mu} = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad (1.1)$$

де P – навантаження на індентор (точність визначення маси гирі вагою 50 г становить $\pm 0,1$ мг) в кг;

d – середнє арифметичне довжини обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм.

Величина діагоналі відбитка визначається за формулою

$$d = Mc, \quad (1.2)$$

де M – кількість поділок на шкалі барабана мікрометра;

c – ціна маленької поділки вимірювального барабана окулярного мікрометра, яка дорівнює 0,3 мкм у приладі ПМТ-3.

Мікротвердість визначалась за таблицею різних навантажень по ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Випробовування виконувались на трьох однаково оброблених зразках і розраховували середнє значення цих вимірювань. Для визначення мікротвердості зразків, що досліджувалися, здійснювали 14 – 16 вимірювань (рис. 2.5). Значення мікротвердості обчислювали за середнім арифметичним значенням результатів виміру діагоналі відбитків.

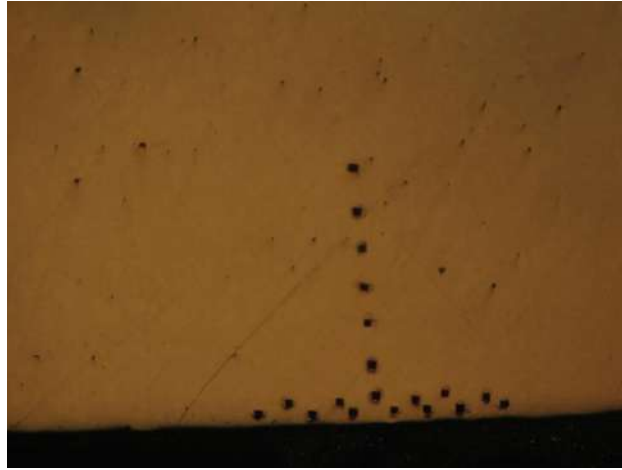


Рис. 1.7. Зразок з одержаними відбитками, $\times 100$

Коефіцієнт зміцнення $K_{зм.}$ розраховувався як співвідношення найбільшого значення мікротвердості після комплексної технології $H_{во+хш}$ до мікротвердості основи $H_{осн.}$:

$$K_{зм.} = \frac{H_{во+хш}}{H_{осн.}} \quad (1.3)$$

Для визначення механічних характеристик проводили статичні розтягання циліндричних зразків на універсальній досліджуваний машині TIRAtest-2300 згідно з ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования».

На принтері виводилась інформація для даного зразка, а на потенціометрі будувалися криві розтягання в координаті $P = f(\Delta l)$, які при необхідності перебудовуються в системі координат $\sigma = f(\Delta \varepsilon)$, де

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{P}{F}, \\ \varepsilon &= \frac{\Delta l}{l} 100\%, \end{aligned} \quad (1.4)$$

де σ – нормальне напруження;

ε – поздовжня деформація;

P – поточне значення зусилля розтягування;

F – початкова площа поперечного перерізу зразка;

Δl – значення видовження зразка при розтяганні;

l – базова довжина зразка, яка відповідно до ГОСТ 1497-84 «Металлы.

Методы испытаний на растяжение» визначаються відношенням $l = l_0 + d_0$, де

l_0 – початкова розрахункова довжина.

Модуль пружності розраховуємо за формулою

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_0}{\Delta l \cdot F_0}. \quad (1.5)$$

Відносне подовження після розтягування дорівнює

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%, \quad (1.6)$$

де l_k – кінцева розрахункова довжина.

Обидві частини зразка прикладають щільно одна до одної й визначають l_k .

Дослідження проводились при кімнатній температурі 20 °С зі швидкістю розтягання 1,4375 мм/хв.

1.4.2. Дослідження мікроструктури

Важливу роль у формуванні експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання відіграє структура, яка забезпечує кінцеві механічні властивості.

За допомогою експериментальних досліджень визначають мікроструктура матеріалів. Також при утворенні на поверхні ЧРМР з подальшим хромуванням досліджувалась глибина приповерхневого шару, який було зміцнено. Для цього використовують методи оптичної металографії із застосуванням фотомікроскопа віддзеркаленого світла Neophot-32, який дає можливість досліджувати травлені та нетравлені мікрошліфи та фотографувати їх зі збільшенням до $\times 1000$.

Шліфи готували зі зразків, що за всіма характеристиками подібні до деталей, які досліджуються. Зразки було оброблено при відповідних режимах. Зразки спочатку шліфували із застосуванням дрібнодисперсних абразивів різної зернистості (від 500 до 2500), таких як шліфувальні порошки (M20, M14), потім зразки полірували речовиною з додаванням суспензії з оксиду алюмінію, хрому на горизонтально-полірувальному крузі, який покритий сукном.

Для вивчення структури поверхневих шарів для досліджуваних металів застосовували травлення шліфів у 5 %-му розчині азотної кислоти (HNO_3) в етиловому спирті (96 %).

Металографічний метод також застосовували для вимірювання товщини хромового покриття на металографічних шліфах поперечного розрізу зразків. Виготовлення і підготовка шліфів проводилась згідно з ГОСТ 9.302-88 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покртия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля». Проводили п'ять замірів на відрізку 5 мм. Під час досліджень покриття завтовшки до 20 мкм збільшування було 500 – 1000-кратне, завтовшки від 20 до 100 мкм – 400 – 500-кратне, понад 100 мкм – 100 – 200-кратне. Відносна похибка методу $\pm 0,8$ мкм для покриття завтовшки до 25 мкм і ± 10 % – для покриття завтовшки понад 25 мкм.

1. 5. Дослідження параметрів геометрії поверхні

Профілометрія (англ. Profilometry) – процес вимірювання («зняття») профілю перетину поверхні в площині, перпендикулярній до неї і орієнтованої в заданому напрямку.

Графічне зображення профілю, знятого в ході профілометрії, називається профілограмою.

Інформація, що отримується в ході обробки профілограм, використовується для розрахунку стандартних параметрів і дозволяє виробляти якісну і кількісну оцінку шорсткості досліджуваних поверхонь.

Безліч профілограм, знятих з певним кроком і послідовно розташованих в тривимірній системі координат, дає наочне уявлення про топографію поверхні.

Реєстрація профілограм, а також отримання тривимірного зображення поверхонь твердих тіл може проводитися приладами контактного або безконтактного типу.

Прилади, призначені для цього, називаються профілометрами або профілографами.

У приладах контактного типу копіювання профілю здійснюється шляхом переміщення голки по шорсткою досліджуваної поверхні.

До приладів безконтактного типу відносяться оптичні та растрові електронні мікроскопи, а також прилади, що використовують для сканування поверхні монохроматичне (зокрема, лазерне) випромінювання.

Шорсткість поверхні – сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками на базовій довжині.

Вимірюється в мікрометрів (мкм).

Шорсткість відноситься до мікрогеометрії твердого тіла і визначає його найважливіші експлуатаційні властивості.

Перш за все зносостійкість від стирання, міцність, щільність (герметичність) з'єднань, хімічна стійкість, зовнішній вигляд.

Залежно від умов роботи поверхні призначається параметр шорсткості при проектуванні деталей машин, також існує зв'язок між граничним відхиленням розміру і шорсткістю.

Вихідна шорсткість є наслідком технологічної обробки поверхні матеріалу, наприклад, абразивами.

В результаті тертя і зношування параметри вихідної шорсткості, як правило, змінюються.

1. 5. 1. Параметри шорсткості

Вихідна шорсткість є наслідком технологічної обробки поверхні матеріалу. Для широкого класу поверхонь горизонтальний крок нерівностей знаходиться в межах від 1 до 1000 мкм, а висота - від 0,01 до 10 мкм.

В результаті тертя і зношування параметри вихідної шорсткості, як правило, змінюються, і утворюється експлуатаційна шорсткість.

Експлуатаційна шорсткість, відтворена при стаціонарних умовах тертя, називається рівноважною шорсткістю.

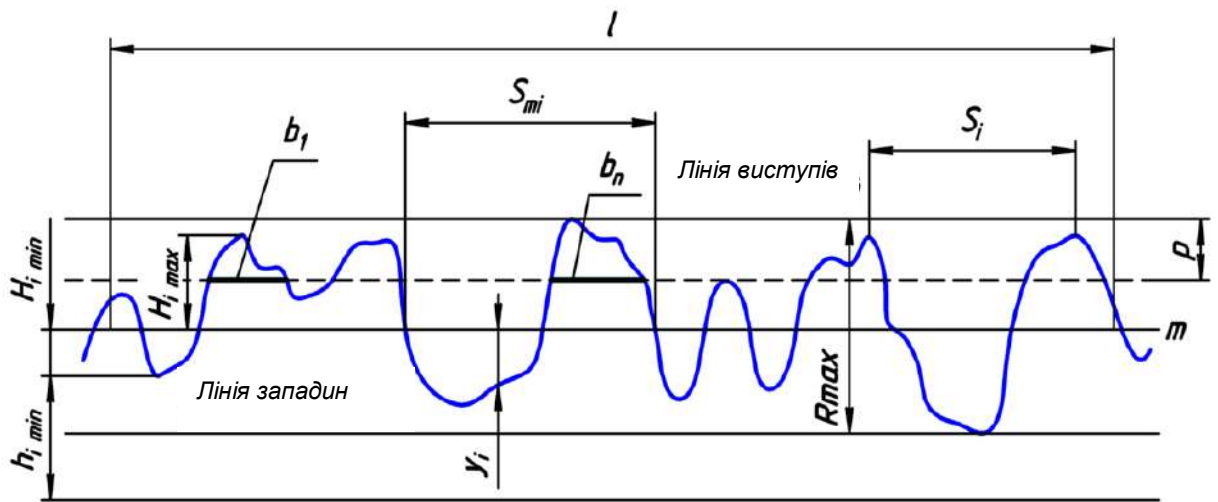


Рис. 1. 8. Нормальний профіль і параметри шорсткості поверхні (рис. діючий)

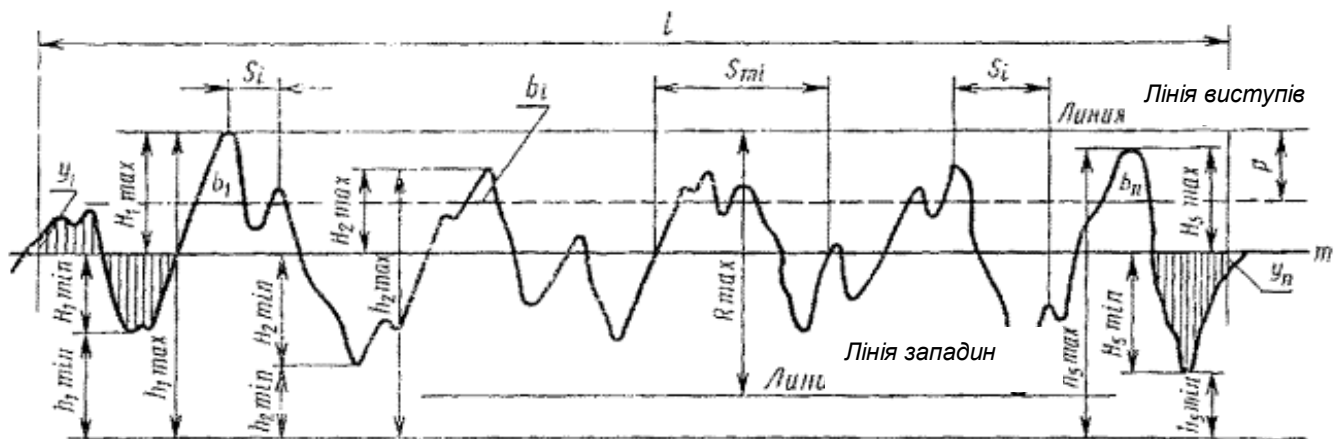


Рис. 1. 9. Нормальний профіль і параметри шорсткості поверхні (у ред. до 2017 р., див. $h_i \max$).

На рис.1. 9 схематично показані параметри шорсткості, де: l — базова довжина; m — середня лінія профілю; S_{mi} — середній крок нерівностей

профілю; S_i — середній крок місцевих виступів профілю; H_{imax} — відхилення п'яти найбільших максимумів профілю; H_{imin} — відхилення п'яти найбільших мінімумів профілю; h_{imax} — відстань від найвищих точок п'яти найбільших максимумів до лінії, що паралельна середній і не перетинає профіль; h_{imin} — відстань від нижчих точок п'яти найбільших мінімумів до лінії, паралельної середньої і не перетинає профіль; R_{max} — найбільша висота профілю; y_i — відхилення профілю від лінії m ; p — рівень перетину профілю; b_n — довжина відрізків, що відсікаються на рівні p .

R_a — середнє арифметичне з абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

Або

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

R_z — сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів профілю і глибин п'яти найбільших западин профілю в межах базової довжини l

$$R_z = \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right) / 5$$

R_{max} — найбільша висота профілю.

S_m — середній крок нерівностей;

S — середній крок місцевих виступів профілю;

tp — відносна опорна довжина профілю, де p - значення рівня перетинів профілю з ряду 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 %:

$$tp = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l}$$

Ra , Rz і $Rmax$ визначаються на базовій довжині l , яка може приймати значення з ряду 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм.

Параметр Ra є переважним і тому найбільш поширеним і застосованим.

Показник шорсткості поверхні - це одна з головних технічних характеристик якості виробу, призначеного для роботи в жорстких умовах, які передбачають сильний знос матеріалу виготовлення.

Від рівня шорсткості буде залежати як загальна якість роботи продукції - її експлуатаційні параметри, так і тривалість використання.

Показник шорсткості дуже важливий, наприклад, для двигунів внутрішнього згоряння, інших аналогічних вузлів і механізмів з великою кількістю рухомих деталей і елементів, таких як друкарське і постдрукарське обладнання.

Під час експлуатації на робочих поверхнях таких механізмів відбуваються безперервні процеси, що роблять негативний вплив на структуру і цілісність матеріалу:

- утворенню сколів, тріщин і задирок різної величини;
- механічний знос матеріалу;
- ерозія металу, його часткове змінання.

Підвищити ж технічні та експлуатаційні характеристики виробу, поліпшити якість його роботи, а також продовжити термін придатності істотно допомагає додаткова технологічна обробка - шліфування.

Від неї залежатиме рівень шорсткості поверхні, який і вимірюється профілометрами.

Подібні виникають дефекти можуть надавати на якість роботи механізму навіть більший вплив, ніж сильний перегрів або удари, і, відповідно, швидше викликати його деформацію. Та й сам перегрів металу найчастіше виникає через надмірне тертя, причиною якого стає зайва шорсткість поверхні окремого елемента.

Тому саме шорсткість в значній мірі впливає на такі технічні показники матеріалів, як:

- стійкість до утворення корозії;
- загальна зносостійкість;
- допустимий коефіцієнт тертя.

1. 5. 2. Прилади для визначення шорсткості

Профілометр - прилад для вимірювання шорсткості поверхні.

Для вимірювання шорсткості застосовуються контактні і безконтактні профілометри.

Профілометри виготовляються у багатьох країнах, зокрема, у Німеччині, Японії, Великій Британії, в Україні і у багатьох інших.



Рис. 1.10. Контактний профілометр Mitutoyo JIS2001 (Японія)

У контактних приладах, як щуп застосовується алмазна голка, яка переміщається по певній лінії (трасі) щодо поверхні.

Нерівності викликають механічні коливання голки, в результаті яких формується електричний сигнал, пропорційний розмірам нерівностей.

До безконтактних методів вимірювання шорсткості відносяться оптичні (тіньової проекції, світлового перетину і інтерференційні) і лазерні (метод зсуву частоти випромінювання).

Більшість сучасних стандартів, в тому числі ГОСТ 19300 і ГОСТ 2789, були розроблені саме для контактних методів вимірювань.

Контактні профілометри мають ряд переваг. Вони забезпечують високу точність завдяки малому радіусу кривизни алмазної голки.

При дослідженні забруднених поверхонь з використанням безконтактної технології профілометри можуть видавати спотворені значення внаслідок сканування не шорсткості поверхні, а її забруднень.

Таким чином, за принципом роботи профілометри поділяються на контактні і безконтактні пристрої.

Контактні прилади оснащені спеціальним сталевим щупом з твердим наконечником. Він визначає рівень шорсткості, переміщаючись по поверхні виробу, і видає показники на екран, встановлений в корпусі приладу.

Безконтактні або оптичні профілометри визначають рівень шорсткості деталі за допомогою оптичного датчика і лазера, який також, досліджуючи поверхню, виводить отримані дані на спеціальний мініатюрний монітор.

Розглянемо докладніше обидва різновиди профілометрів, особливості їх роботи і головні технічні характеристики.

Для наочного прикладу розглянемо один з найбільш поширених контактних профілометри - прилад з цифровим відліком моделі-296.

Він є типовим представником пристроїв в цьому класі вимірювальної техніки, робота яких заснована на індуктивному перетворенні сигналу.



а



б

Рис. 1.11. Контактні профілометри: а) профілометр дисплейний; б) профілометр моделі-296

Профілометр з цифровим відліком моделі-296

Цей вимірювач призначений для визначення рівня шорсткості тільки плоских поверхонь. Конструктивно контактний профілометр складається з таких елементів:

- сталевий щуп з твердим, як правило, алмазним наконечником;
- пристосування для переміщення щупа;
- перетворювач рівня шорсткості;
- цифровий перетворювач і підсилювач електричного сигналу;
- дисплей або мініатюрний монітор;
- зворотні датчики для управління щупом, напрямки його руху;
- перемикач режимів вимірювання;
- реле установки тимчасового інтервалу.

Подібні апарати в основному використовуються для визначення шорсткості поверхонь в лабораторних і цехових умовах.

Але, крім них, також існують і мобільні або портативні профілометри контактної дії, що мають невеликі габарити. Наприклад, вимірювальний прилад моделі TR-100 з п'єзоелектричним перетворювачем.



Рис. 1.12. Прилад моделі TR-100

Незважаючи на те що цей профілометр працює за таким же принципом, як і попередні моделі, його функціонал дозволяє визначати рівень шорсткості не тільки на плоских, але і на опуклих і увігнутих поверхнях.

Підстроювання показів вихідної величини або індикації в моделі TR-100 здійснюється за рахунок спеціального вузла, додатково вбудованого в основну робочу схему пристрою.

Крім того, профілометр TR-100 має і більш широкий діапазон вимірювання - від 0,05 до 50 мкм. Його ж істотний мінус в порівнянні з лабораторними або цеховими апаратами - більш низька точність визначення (різниця між моделями становить приблизно 10-12%).

На відміну від контактних моделей профілометри з використанням безконтактної технології мають ширші можливості.

Тому сьогодні вони отримали набагато більшого поширення, частіше використовуються на виробництві.

Їх головні переваги - можливість дистанційного сканування, а також функція оперативної передачі даних і автоматичний вивід інформації на монітор комп'ютера або принтер для подальшого роздрукування.

Допустима ж віддаленість або дистанція від досліджуваної поверхні буде залежати від конкретної моделі вимірювача.

Як і у випадку з контактними моделями, безконтактні апарати також бувають двох основних видів - стаціонарні і портативні.



Рис. 1.13. Безконтактний лазерний профілометр

Безконтактний стаціонарний лазерний профілометр з функцією запису отриманого результату включає в себе такі елементи:

- посадкова плита зі спеціальними пазами, в яких фіксується досліджуваний матеріал або виріб;
- спеціальна лазерна головка для сканування поверхні;
- оптичний пристрій з первинними вимірювальними перетворювачами - особливий датчик або сенсор;
- направляючий канал для передачі хвилі - хвильовод;
- комп'ютеризований вузол з відповідним призначенням для користувача інтерфейсом для управління приладом і підключення до нього додаткових реєструючих пристроїв.

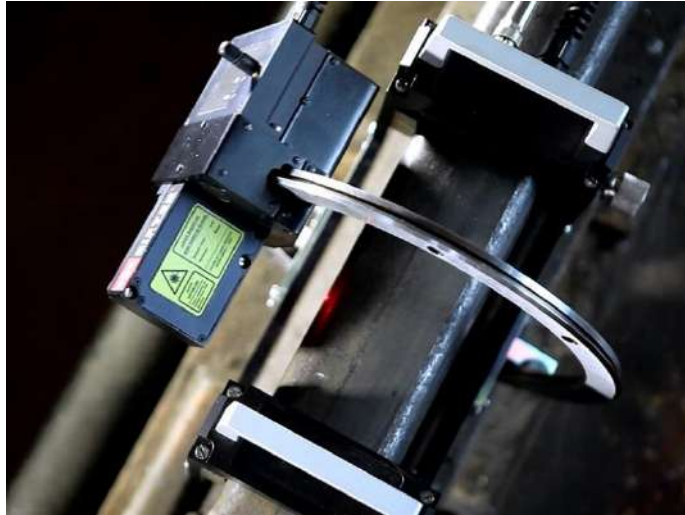


Рис. 1.14. Безконтактний оптичний профілометр

Функціонал безконтактного оптичного профілометра дозволяє визначати і виводити на монітор дуже великий, а в більшості випадків вичерпний обсяг необхідної інформації.

Докладні дані допомагають максимально точно встановити рівень шорсткості поверхні і необхідність її подальшої обробки.

Отримані відомості включають в себе такі важливі показники, як:

- профіль ділянки сканування - поздовжній і поперечний;
- максимально допустима точність вимірювання конкретної поверхні;
- дискретність (переривчастість) вимірювального кроку приладу;
- похибка відліку в момент сканування, а також можлива загальна сумарна похибка.

Крім основного функціоналу, в таких профілометри передбачена можливість проводити запис отриманих результатів на спеціальний термодрукуючий рулонний папір.

Сам запис виконується у вигляді профілограми, завдяки чому прилад можна також використовувати як повноцінний профілограф.

Управління ж і контроль сканування здійснюється в окремому діалоговому режимі, це дозволяє проводити повторне вимірювання рівня шорсткості не на всьому виробі, а тільки на необхідних ділянках.



Рис. 1. 15. Стационарний оптичний профілометр MICROMESURE SURF

Як приклад портативного або мобільного безконтактного оптичного профілометра розглянемо одну з найпопулярніших моделей такого типу пристроїв - вимірювач німецького виробництва Mahr MarSurf PS1.

У цьому компактному апараті керуючий сигнал передається у відповідну схему за допомогою спеціального оптичного датчика. Випадкові ж мимовільні коливання (періодичні часткові зміни) дистанції між досліджуваної поверхнею і зчитуючим приймачем апарату компенсуються за рахунок автоматичної системи калібрування кроку вимірювання.



Рис. 1.16. Безконтактний оптичний профілометр Mahr MarSurf PS1

Профілометр (рис. 1.16) оснащений зручним цифровим дисплеєм і спеціальним висувним стилусом безконтактного дії. Діапазон вимірювання рівня шорсткості в переносній моделі Mahr MarSurf PS1 коливається від 5 до 15 мікрометрів.

Вибір типу вимірювача буде прямо залежати від типу досліджуваної поверхні і призначення, складності виробу, що перевіряється.

Стаціонарні контактні і безконтактні профілометри дозволяють одержувати більш точну і детальну оцінку рівня шорсткості матеріалу.

Шорсткість твердих поверхонь, наприклад, деталей з високовуглецевої сталі, краще вимірювати апаратами з алмазним щупом.

Виконувати оперативну або часткову оцінку якості обробки матеріалу зручніше портативним переносним приладом.

Оптичні безконтактні профілометри розраховані тільки на сканування поверхонь очищених матеріалів - пиломатеріалів і забруднення можуть істотно спотворити результат.

У специфічних виробничих умовах для перевірки таких поверхонь рекомендується використовувати контактні профілометри з твердими алмазними наконечниками, інакше показник шорсткості буде невірним.

1.6. Методика дослідження експлуатаційних властивостей

Якість, експлуатаційна надійність деталей поліграфічних машин, механізмів, вузлів тощо залежить від відповідних властивостей деталей. Статична і динамічна поверхнева міцність, статична і втомна міцність, опір крихкому руйнуванню, задиро- і зносостійкості, опір руйнуванню від втоми, фізичні, корозійні та інші властивості матеріалів належать до основних факторів, які визначають надійність і довговічність машин.

Дослідження експлуатаційних властивостей здійснювалося на зразках оброблених шліфуванням, вібраційним обкатуванням (нанесений ЧРМР синусоїдального типу, в якому немає перетину нерівностей), хромуванням і комплексною технологією.

1.6.1. Методика дослідження зносостійкості

Аналіз процесів до зношування показує, що зносостійкість матеріалів визначається багатьма чинниками й поєднанням властивостей тертьових матеріалів; якістю контактуючих поверхонь (чистота поверхні, змащування); характером руху (ковзання, кочення, удари, плинність); швидкістю взаємного переміщення; рівнем навантаження; відведенням відділених частинок (продуктів зношування) або наявністю частинок якогось іншого матеріалу, який ускладнює тертя, тощо.

Тому з науково-технічного та практичного погляду важливим показником працездатності деталей поліграфічного обладнання є висока антифрикційність (найнижчі значення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування матеріалів).

Під час дослідження зносостійкості було змодельовані умови тертя й геометрія реальних пар вузлів поліграфічного обладнання. Таким чином для циліндричних зразків імітували тертя зовнішніх поверхонь циліндричних елементів. При цьому навантаження, кількість ходів, швидкість, змащування та інші параметри брали згідно з режимами експлуатації реальної пари.

Випробування виконувалися при «сухому» терті. Ці дослідження проводилися на циліндричних зразках зі сталі 45 після шліфування, після вібраційного обкатування, після хромування, а також після вібраційного обкатування (ЧРМР синусоїдального типу, в якому відсутній перетин нерівностей з елементами ввігнутої форми) з подальшим хромуванням.

Стальні деталі при терті ковзання зазвичай працюють із чавунними, бронзовими і сталевими деталями; при терті кочення – переважно з чавунними і сталевими деталями.

Для випробування на зносостійкість використовують токарні верстати (наприклад) 16К20, частота обертання 125–315 об/хв, навантаження від 5Н до 2,5 МПа в парі з контртілом з матеріалу Бр.АЖ-9-4 за схемою контакту площина-площина відповідно до ГОСТ 23.211-80 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии». Дані режими відповідають реальним умовам роботи.

Сутність методу полягає в тому, що циліндричний рухливий зразок (контрзразок), який стикається з нерухомим циліндричним зразком при заданому тиску, приводиться у зворотно-обертальний рух із заданою амплітудою і частотою. Контрзразок кріпиться в центрах токарного верстата, а в різцетримачі кріпиться пристрій, у якому замість інструмента встановлено простий захват зі зразком, який досліджуємо.

Величина зношування оцінюють масовим методом – зважування зразка до і після випробування – з використанням лабораторних електронних вагів AXIS AD50 (точність визначення маси становить 0,0005 г) через кожні 20 хв випробування протягом 300 хв, а далі через кожні 2 год протягом 45 год.

Інтенсивність зношування характеризується як об'єм матеріалу, який видаляється з одиниці номінальної поверхні на одиничному шляху тертя. За втратою маси обчислювався показник інтенсивності зношування I , кг/м²:

$$I = \frac{\Delta m}{s}, \quad (1.7)$$

де Δm – втрата маси, кг;

s – площа поверхні тертя зразка, м².

1.6.2. Дослідження корозійної стійкості

Для оцінки корозійної стійкості металевих покриттів використовуються кілька методів. Перший метод – це оцінка руйнування за втратою маси зразка за певний час із певної площі покриття – ваговий показник. Для його визначення використовують занурення зразка повністю або частково в агресивне середовище і витримку в ньому впродовж певного часу. Після цього зразок виймають і оцінюють втрату маси за час проведеного дослідження. Недоліком цього методу є тривалий час випробування, необхідність точного зважування для покриттів, що руйнуються з малою швидкістю. Крім того, отримана швидкість корозії за цим методом – це середнє значення швидкості за досліджуваний період.

Другим методом є вимірювання поляризаційного опору. Поляризаційний опір – обернена величина швидкості корозії. Його вимірюють за допомогою спеціальних пристроїв – індикаторів поляризаційного опору. Для цього методу необхідна наявність двох електродів з досліджуваного матеріалу, які жорстко закріплені в обоймі й занурені в корозійне середовище. На електроди накладається поляризація зовнішнім електричним струмом і вимірюється поляризаційний опір електродів у часі. Отриману величину за допомогою коефіцієнтів перераховують у швидкість корозії.

Наприклад, для прискорених випробувань використовують метод поляризаційних кривих. Він полягає в отриманні вольт-амперних залежностей досліджуваних зразків у корозійному середовищі й оцінці за ними значень корозійного потенціалу та швидкості корозії у струмових одиницях, які можуть бути перераховані в масові або глибинні показники корозії.

Електрохімічні дослідження проводять в скляній трьохелектродній електрохімічній комірці з виносним електродом порівняння. Як робочий електрод було використано досліджувані зразки з робочою поверхнею площею $0,5 \text{ см}^2$. Неробочу частину електрода ізолюють за допомогою кислотостійкого лаку. Як допоміжний електрод використовують платину. Щоб зменшити вплив газовиділення на допоміжному електроді на основний процес, катодний і анодний простори було розділено напівпроникною перегородкою. Як електрод порівняння використовують хлорсрібний електрод ($E^0 = + 0,222 \text{ В}$), отримані значення потенціалів перераховували відносно нормального водневого електрода.

Готують найбільш ефективний електроліт для хімічного полірування цього металу. Дослідження проводять в розчинах сірчаної кислоти концентрацією $0,5 \text{ моль/л}$. Зразок занурюють в електроліт і витримують певний час.

Поляризаційні виміри проводять з використанням потенціостата ПИ-50-1.1, на який за допомогою програматора ПР-8 задають розгортку потенціалу 1 мВ/с і проводять реєстрацію зміни струму в часі. Схему для отримання вольт-амперних залежностей наведено на рис. 1.8.

Отриманні значення потенціалів перераховували у водневу шкалу, а значення сили струму – у величини густини струму. За отриманими значеннями будували поляризаційні криві в координатах потенціал – логарифм густини струму. До анодної і катодної ділянок кривої будувалися дотичні, і на перетині визначалася густина струму корозії.

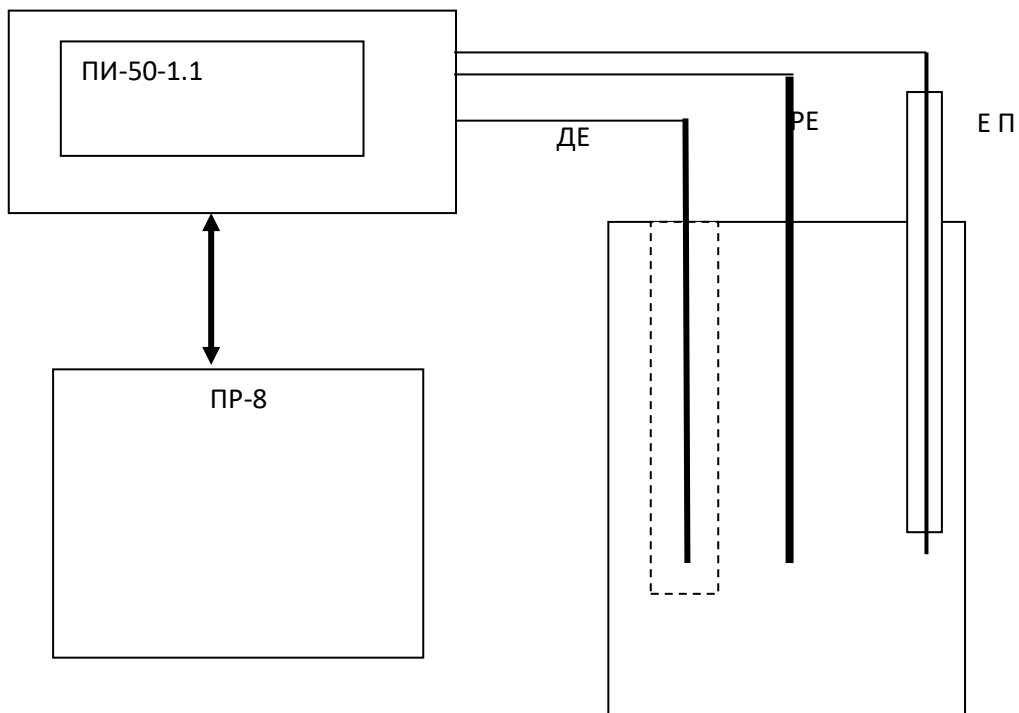


Рис. 1.17. Схема для отримання вольт-амперних залежностей, де ДЕ – допоміжний електрод – платина; РЕ – робочий електрод (досліджуваний зразок); ЕП – електрод порівняння

1.7. Контроль якості покриття

Якість хромованих покриттів визначається по загальному вигляді, товщині шару, міцності зчеплення.

Зчеплення металевих частинок з основою відбувається за рахунок механічного зчеплення, можливої адгезії. Експериментально встановлено, що зчеплення залежить передусім від підготовки поверхні і властивостей нанесеного шару хрому та основного матеріалу. Випробування міцності зчеплення служить для того, щоб встановити, чи забезпечує цей спосіб

підготовки поверхні деталі під напилення достатню міцність зчеплення покриття з основним металом.

Міцність зчеплення покриття визначається шліфуванням його абразивним кругом. Дослідження міцності зчеплення виконують на круглошліфувальному верстаті (типу 3М151) з режимами різання, наведеними в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Режими круглого зовнішнього шліфування хромованих поверхонь під час досліджування міцності зчеплення

№ з/п	Шорсткість, Ra, мкм	Подача		Швидкість деталі, м/хв	Число зачисних заходів
		поперечна, мм/подв.х	поздовжня, мм/об		
1	0,08–0,16	0,005–0,01	3–6	15–30	5–30
2	0,16–0,32	0,01–0,015	6–10	15–30	5–30
3	0,32–0,63	0,01–0,02	10–15	30–60	1–5
4	0,63–1,25	0,03–0,04	20–30	30–60	1–5

Контрольні запитання

1. Що таке механізм тертя і зношування матеріалів?
2. Структура та пористість матеріалів. Що це таке?
3. Що таке метод металографічного дослідження?
4. Що таке фізико-механічні випробування?
5. Що таке триботехнічні дослідження матеріалів?
6. Що таке рентгено-фазовий аналіз поверхонь деталей?
7. Яка методика дослідження процесу тертя?
8. Що таке анізотропія орієнтації матеріалів?
9. Як здійснюється електронноскопічний аналіз поверхонь деталей?
10. Що таке триботехнічні властивості?
11. Як аналізують стан поверхонь тертя?

РОЗДІЛ 2. ОБРОБЛЕННЯ ЗМІЦНЕННЯМ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН ТА МЕХАНІЗМІВ

2.1. Зміцнення металевих поверхонь деталей методами поверхневого пластичного деформування

2.1.1. Вібраційні методи обробки

Одним із найбільш універсальних методів зміцнення поверхневих шарів металу з одночасним утворенням на поверхні регулярних мікрорельєфів є метод вібраційного накатування, який ґрунтується на тонкому пластичному деформуванні поверхневих шарів і складному відносному переміщенні оброблюваної деталі й деформувального елемента. За рахунок одночасного незалежного варіювання значень великої кількості параметрів режиму вібраційного накатування стає можливим утворення регулярних мікрорельєфів різних видів. При цьому майже необмежено змінюються і регулюються значення як стандартизованих, так і нестандартизованих геометричних параметрів якості поверхні.

Особливості процесу вібраційного накатування є такі:

- незалежне регулювання кроку і висоти нерівностей, що неможливо забезпечити під час різцевої і абразивної обробки;
- незалежне регулювання напрямку канавок або виступів повністю нового мікрорельєфу;
- утворення мікрорельєфів з радіусами заокруглень виступів і заглиблень, на один-два ступеня більшими, ніж при відомих способах обробки, з малими кутами нахилу – похилими нерівностями, з малою довжиною ліній профілю; при цьому кількість виступів і заглиблень нерівностей на одиниці площі можна розраховувати і витримувати з потрібною точністю.

Способи утворення регулярних мікрорельєфів за цільовим призначенням поділяють на дві групи:

1. Способи, за допомогою яких на поверхні утворюється частково-регулярний мікрорельєф (ЧРМР),
2. Способи, що дозволяють утворювати повністю новий регулярний мікрорельєф (ПРМР).

У першому випадку на поверхні утворюються безперервні або дискретно розміщені заглиблення (табл. 2.1), між якими залишається вихідна шорсткість; у другому — повністю новий мікрорельєф з однаковими за формою, висотою і взаємним розміщенням нерівностями.

Під регулярним розуміють такий мікрорельєф, ступінь регулярності нерівностей якого за висотою, формою і взаєморозміщенням забезпечує достатню для інженерних розрахунків точність лінійних та інших параметрів мікрогеометрії і залежних від них експлуатаційних властивостей поверхонь, що перевищують щонайменше на один порядок точність подібних розрахунків для шорстких поверхонь. У табл. 2.1 наведено класифікацію найбільш широко використовуваних способів утворення заглиблень на поверхнях деталей машин і приладів. Розглянемо лише ті, що утворюються внаслідок поверхневого пластичного деформування.

Таблиця 2.1

Класифікація способів утворення заглиблень

Вид заглиблень	
Дискретні	Безперервні
Свердління за розміткою або в кондукторі	Проточування кругових і гвинтових канавок
Вихрове точіння	Проточування канавок складної форми за допомогою копірних пристроїв
Вихрове фрезерування	Фрезерування канавок складної форми за допомогою копірних пристроїв
Вібродинамічне накатування	Накатування профільним роликком
Травлення через трафарет	Вібраційне накатування Травлення після вібраційного накатування

Вібродинамічне накатування. Процес утворення регулярно розміщених заглиблень ґрунтується на холодному пластичному деформуванні. Особливістю його є поєднання розкочувальної дії, характерної для більшості способів поверхневого пластичного деформування (ППД), з ударною. У результаті частка залишкової деформації зростає, що приводить до більш значного зміцнення як за ступенем, так і за глибиною залягання зміцненого шару металу.

Режим ударного вібронакатування визначається такими параметрами: зусиллям ударного вдавлювання інструмента (кульок, бойків сферичної форми), частотою обертання заготовки, подачею деформувального елемента і його діаметром. Варіюючи значення цих параметрів, можна утворювати різні системи заглиблень, що відрізняються кількістю на одиницю площі оброблюваної поверхні, площею, відносно номінальної площі, формою і глибиною заглиблень та взаємним розміщенням. Отже, керуючи утворенням заглиблень, можна створювати системи як з частково перетинаючими одна одну лунками та лунками, що не торкаються, так і з повністю перетинаючими вихідну поверхню і отримувати на поверхнях не тільки ЧРМР, а й ПРМР.

Спосіб ударного вібронакаткування застосовують тільки на універсальних металообробних верстатах: токарних і фрезерних. Він відносно універсальний і продуктивний. До недоліків слід віднести дискретний характер утворюваних заглиблень, що погіршує умови протікання мастил, односторонній динамічний вплив на заготовку і елементи верстата, що обмежує можливість його застосування для обробки мало- і нерівножорстких деталей, призводить до зниження жорсткості верстатів, появи шуму.

Іншим є **спосіб вібродинамічного накатування**, оснований на динамічному зміцненні поверхонь кулями, вільно встановленими в круглих пазах, радіально розміщених по колу диска, що швидко обертається. Тиск куль на оброблювану поверхню створюється відцентровою силою диска (що обертається зі швидкістю до 30 м/с), під дією якої кулі вдаряють по заготовці й обжимаються нею; відбувається пружний контакт деформувальних елементів – куль з оброблюваною поверхнею. Зусилля вдавлювання регулюється зміненням натягу, який залежить від відстані між кулями й оброблюваною поверхнею. Закріплена віброголовка здійснює переміщення вздовж осі заготовки, яка обертається, осциляційний рух в тому ж і зворотному напрямках. Сполучення динамічного впливу на заготовку зі складним відносно неї переміщенням деформувальних елементів має інтенсифікувати процес пластичної деформації, підвищити продуктивність обробки.

Режим вібродинамічного накатування визначається такими параметрами: частотою обертання диска з кульками, подачею, кількістю подвійних ходів, амплітудою. Складна кінематика процесу дозволяє значно знизити зусилля, які прикладаються до заготовки, хоча потрібно врахувати однобічний вплив, особливо під час обробки маложорстких деталей типу вісь і валів.

Накатування профільним роликком. Цей спосіб ґрунтується на перенесенні мікрорельєфу інструмента-ролика на заготовку за схемою «вдавлювання» або «на прохід». Мікрорельєф видавлюються на вузькій ділянці поверхні деталі, не більшій за ширину ролика. За схемою «на прохід» можна обробляти поверхні необмеженої довжини.

Перевага такого способу – висока продуктивність, однак йому властиві й суттєві недоліки: для видавлювання заглиблень різного виду (за розміром, формою, взаємним розміщенням) необхідно створювати ролики з різним мікрорельєфом (досить дорогий і складний у виготовленні інструмент); під час роботи роликами навіть відносно невеликого діаметра (0,04...0,05 м) через велику площу контакту із заготовкою для видавлювання мікрорельєфу порівняно малої глибини (10...12 мкм) необхідно прикласти значні зусилля, що неприпустимо при обробці мало- і

середньожорстких деталей; стійкість роликів, особливо під час обробки сталей, мала; обробка термічно зміцнених деталей неможлива. Через ці недоліки рентабельність застосування цього способу обмежена.

Вібраційне накатування (вібронакатування). Цей спосіб найбільш поширений з усіх вібраційних способів зміцнення поверхонь пластичним деформуванням. Спосіб застосовують для обробки зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь, плоских і торцевих, а також фасонних поверхонь. Схему обробки поверхонь різної форми показано на рис. 2.1.

Частіше вібраційне накатування використовують для обробки зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь. Такі параметри визначають режим вібронакатування: частота обертання заготовки; подача деформувального елемента за один оберт заготовки; кількість осциляцій деформувального елемента; амплітуда осциляцій; діаметр заготовки; зусилля вдавлювання деформувального елемента; радіус сфери деформувального елемента.

Менш поширена і майже не вивчена віброобробка плоских поверхонь, яка здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв і віброголовок, переважно на вертикально-фрезерних, координатно-розточувальних та стругальних верстатах. Ці пристрої дещо складніші за конструкцією, що обумовлено необхідністю надавати інструменту крім осциляційного руху, ще й обертний або коливальний рух.

Вібраційне накатування плоских поверхонь здійснюють за двома кінематичними схемами:

1. Рядкова обробка з дискретною поперечною подачею деформувального елемента по ширині заготовки.

2. З перекриттям оброблюваної поверхні по всій ширині за один прохід.

Недоліки першої схеми обробки – відносно низька продуктивність (за один подвійний хід оброблюється вузька ділянка поверхні) і труднощі, пов'язані з необхідністю збіжності синусоїдальних нерівностей, що утворюються деформувальним інструментом при кожному ході столу верстата. Щоб уникнути цих недоліків доцільно застосовувати віброголівки, що працюють за другою схемою.

Одним з найбільш важливих параметрів ЧРМР є відносна площа поверхні (F_H), яка найбільш повно визначає майже всі експлуатаційні властивості поверхонь, насамперед фактичну площу контакту поверхні твердого тіла з іншою поверхнею або з фазою (газ, рідина), маслоємність поверхні, здатність утримати від винесення на поверхню контакту чужорідні частки.

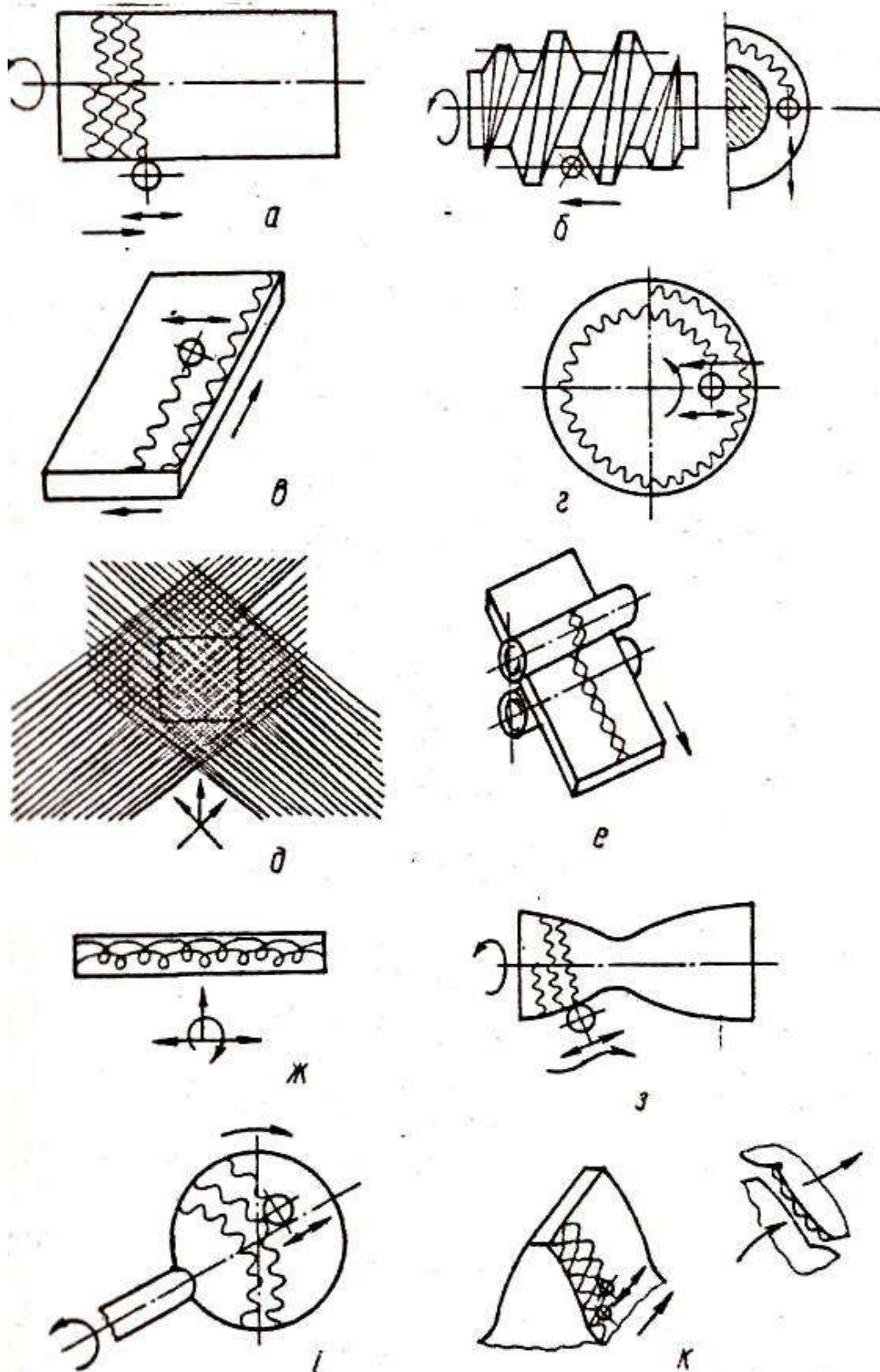


Рис. 2.1. Схеми вібраційного накатування поверхонь різної геометричної форми: *a* – циліндрична, *б* – гвинтувальна, *в, д, е, ж* – плоска, *з* – профільна, *и* – сферична, *к* – евольвентна

Оздоблювально-зміцнювальна обробка плоских поверхонь з утворенням на поверхні нерівностей чотирикутного типу дає змогу обробляти деталі, ширина поверхні яких становить близько 0,05 м. Для обробки деталей, ширина яких виходить за межі вказаного розміру, або для одночасної обробки кількох деталей одного типорозміру (двох, трьох направляючих, кількох планок) за один прохід розроблено технологічний процес отримання на поверхні нерівностей, розміщених по циклоїді. Принципова відмінність такого мікрорельєфу – розташування нерівностей циклоїдного типу по колу. Після проходження ділянки деталі довжиною, що дорівнює діаметру кола, нерівності починають накладатись, це не лише заважає визначати геометрію мікрорельєфу, але й може викликати переміщення поверхні, її лущення та інші небажані явища в місцях перетину нерівностей при оптимальних, з погляду одноразового проходу деформувального елемента, зусиль.

Оздоблювально-зміцнювальна обробка з отриманням на поверхні нерівностей циклоїдного типу підвищує зносостійкість деталей на 30 %, у дев'ять разів знижує трудомісткість порівняно з протиранням.

Експериментально показано на рис. 2.2 і 2.3 отримані геометричні залежності параметрів мікрорельєфу від зусилля вдавлення при різних радіусів деформувального елемента.

Параметри поверхні з регулярним мікрорельєфом можна контролювати за допомогою пристроїв (апаратний метод) і без них (безапаратний метод). До методів апаратного контролю належать щупове профілографування і профілометрування а також оптичні методи.

Особливості апаратного методу:

- вимірювання параметра та висоти елемента;
- вимірювання параметра та відносної опорної поверхні;
- вимірювання параметрів і кутів напрямку розміщення елементів.

Останнім часом широко застосовують у промисловості безапаратний контроль. З усіх методів безапаратного контролю найбільш поширений контроль технологічного процесу обробки поверхні. Це обумовлено його простотою, високою надійністю і економічністю, можливістю неруйнівного контролю мікрогеометрії майже будь-яких поверхонь, в тому числі і важкодоступних. Суть цього методу полягає в тому, що контролюється не мікрогеометрія поверхні, а технологічний процес, всі умови і режим обробки контрольованої поверхні. Послідовність обробки, її умови і режим повинні бути виявлені на основі ретельно виконаного, частіше всього експериментального (рідше теоретичного) дослідження з встановленням всіх факторів і численних значень параметрів режиму, які тією чи іншою мірою визначають мікрогеометрію, а здебільшого і фізико-механічні параметри та параметри якості поверхні. Всю цю інформацію

отримують під час нормування якості поверхні, що встановлена експериментальними дослідженнями.

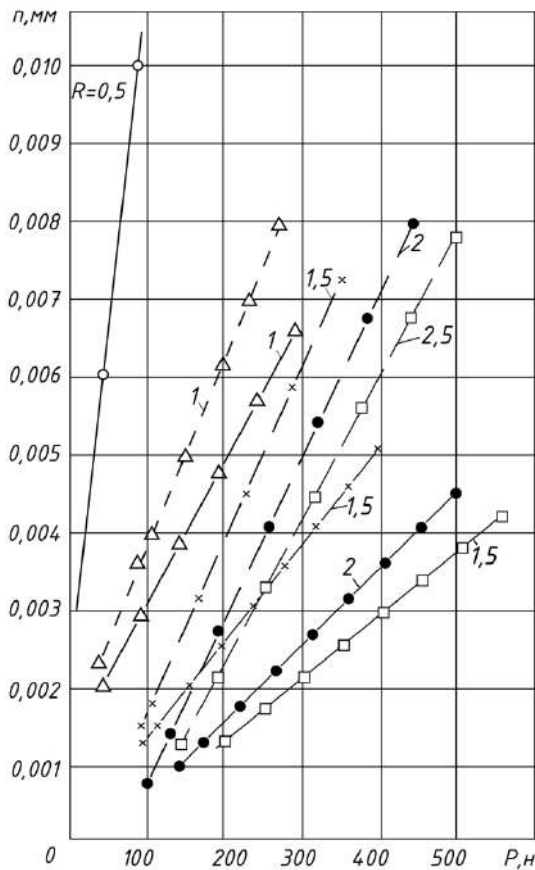


Рис. 2. 2. Залежність глибини канавки від зусилля вдавлювання при різних радіусах деформувального елемента _____ – сталь 20X HRC 60–62, _ _ _ _ – сталь 45 HRC 50–52

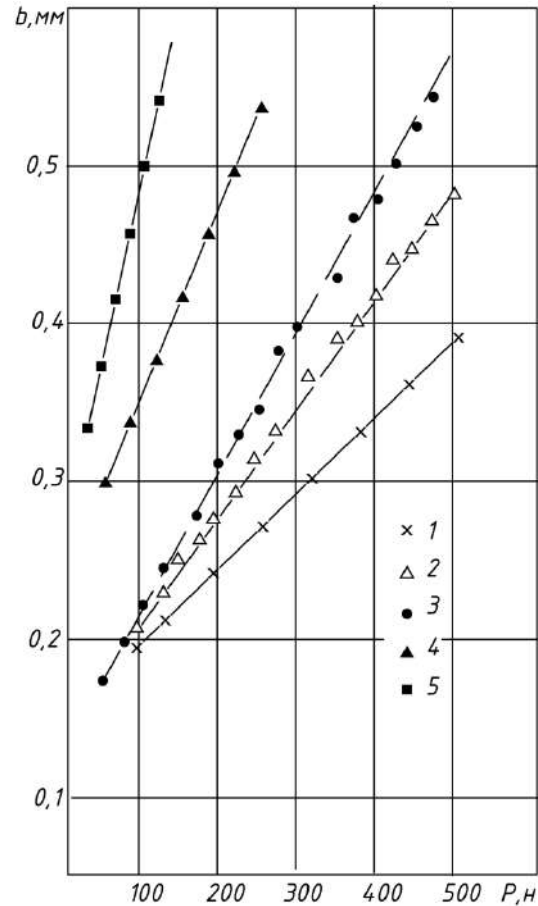


Рис. 2. 3. Залежність ширини канавки від зусилля вдавлювання при різних радіусах деформуючого елемента: 1 – сталь 20X HRC 60–62, 2 – сталь 45 HRC 50–52, 3 – сталь 20X HRC 45–46, 4 – СЧ 25 НВ 190–210, 5 – Бр05Ц5С5 HRC 75–85

Параметри поверхні з регулярним мікрорельєфом контролюють за допомогою пристроїв (апаратний метод) і без них (безапаратний метод). До методів апаратного контролю належать щупове профілографування і профілометрування а також оптичні методи.

Особливості апаратного методу:

- вимірювання параметра та висоти елемента;
- вимірювання параметра та відносної опорної поверхні;
- вимірювання параметрів і кутів напряму розміщення елементів.

Останнім часом широко застосовують у промисловості безапаратний контроль. З усіх методів без апаратного контролю найбільше поширений контроль технологічного процесу обробки поверхні. Це обумовлено його

простотою, високою надійністю і економічністю, можливістю неруйнаційного контролю мікрогеометрії майже будь-яких поверхонь, в тому числі і важкодоступних. Суть цього методу полягає у тому, що контролюється не мікрогеометрія поверхні, а технологічний процес, всі умови і режим обробки контрольованої поверхні. Послідовність обробки, її умови і режим повинні бути виявлені на основі ретельно виконаного, частіше всього експериментального (рідше теоретичного) дослідження з встановленням всіх факторів і численних значень параметрів режиму, які тією чи іншою мірою визначають мікрогеометрію, а в більшості випадків і фізико-механічні параметри та параметри якості поверхні. Таку інформацію отримують під час нормування якості поверхні, що встановлена експериментальними дослідженнями.

Якщо неможливо достатньо визначити параметри якості поверхонь з регулярним мікрорельєфом безапаратним методом, використовують апаратний. Так, для визначення міцності з'єднання двох електропровідних тіл з регулярним мікрорельєфом можна скористатись не руйнуючим способом контролю площі контакту двох тіл. Цей метод відноситься до інтегрального методу контролю поверхні.

Суть методу контролю площі двох тіл полягає в тому, що на контактуючі поверхні цих тіл наносять однаковий регулярний мікрорельєф. Еталонний зразок отримують шляхом плавлення аналогічних контрольованому об'єкту тіл. Сплавлення поверхонь, що контактують, забезпечує практично 100 %-ву площу контакту двох електропровідних тіл завдяки молекулярній взаємодії матеріалів, з яких вони виготовлені. Потім контрольований виріб і еталонний зразок підключають паралельно до затискачів джерела електричного струму і вимірюють.

2.1.2. Вигладжування алмазом та іншими надтвердими матеріалами

Вигладжування полягає в пластичному деформуванні оброблюваної поверхні ковзанням по ній інструментом-вигладжувачем. При цьому нерівності поверхні, які залишились від попередньої обробки, згладжуються частково або повністю, поверхня набуває дзеркального блиску, підвищується твердість поверхневого шару, у ньому утворюються стискувальні залишкові напруги, змінюється мікроструктура і формується направлена структура-текстура. Після вигладжування поверхня залишається чистою, не шаржованою осколками абразивних зерен, що звичайно буває при процесах абразивної обробки. Таке сполучення якостей вигладженої поверхні характеризує її високі експлуатаційні властивості – зносостійкість, опір втомленості тощо.

Вигладжування можна уявити як процес тертя, що має перебіг в умовах пружно-пластичної деформації однієї з поверхонь. Оскільки твердість інструмента значно перевищує твердість оброблюваної поверхні, мікронерівності алмазного наконечника начебто «впресовуються» в оброблювану поверхню, вириваючи допоміжну локальну пластичну деформацію приконттактних шарів металу. У разі відносного переміщення поверхонь характер руйнування зв'язків є пластичним, і для пояснення механізму взаємодії можуть бути використані основні положення теорії тертя. По-перше, щільний контакт поверхонь і високі тиски в зоні деформації сприяють проявленню сил адгезії, які приводять до мікросхвачування поверхонь. При відносному зміцненні поверхонь буде відбуватиметься руйнування містків схвачування з одночасним утворенням нових. Очевидно, руйнування містків схвачування здійснюється по оброблюваній поверхні з налипанням часток металу на інструмент. Однак природні і синтетичні алмази, які служать інструментальним матеріалом, мають позитивні фізико-механічні властивості, й через це перешкоджають налипанням більшості матеріалів оброблюваних деталей.

По-друге, під час взаємодії контактуючих поверхонь відбувається дряпання оброблюваної поверхні мікроступами поверхні інструмента. Переміщення кожного мікроступу інструмента супроводжується пластичним відтисненням прилеглих часток металу: чим більша висота мікронерівностей інструмента, тим глибше вони укорінюються в оброблювану поверхню. Крім відмічених двох основних факторів тертя, які впливають на формування шорсткості оброблюваної поверхні (молекулярне схвачування і механічне зміцнення мікронерівностей), діє ще багато інших факторів, наприклад, змащування і вплив різних проміжних речовин, які утворюють роздільний шар екрануючої поверхні контакту; висока температура, що зумовлює інтенсивне окислення поверхонь у зоні тертя тощо. При цьому найбільше значення у формуванні якості поверхні деталі має шорсткість поверхні інструмента.

Якість поверхні деталі під час вигладжування характеризується геометричними (мікрогеометрія, хвилястість) і фізико-механічними параметрами (мікротвердість, мікроструктура, напружений стан). Хвилястість при вигладжуванні дещо (несуттєво) зменшується, а мікрогеометрія набуває зовсім іншого характеру: різко зменшується висота мікронерівностей, а самі мікронерівності мають згладжену, заокруглену форму з великим радіусом заокруглення вершин і з великою опорною поверхнею.

Параметрами процесу вигладжування, що впливають на шорсткість, є зусилля вигладжування, подача і радіус робочої частини інструмента.

Залежність шорсткості поверхні від сили вигладжування якісно однакова для деталей з різних матеріалів. Під час збільшення сили вигладжування шорсткість зменшується, а для визначеної її величини змінення шорсткості припиняється. Це можна пояснити тим, що при малих навантаженнях інструмент контактує з оброблюваною поверхнею по вершинах нерівностей, опорна площа яких мала. Внаслідок цього на поверхні контакту розвиваються значні тиски, які перевищують межу текучості матеріалу і викликають інтенсивну пластичну деформацію нерівностей. Зі зростанням сили вигладжування збільшується глибина впровадження і зростає площа контакту інструмента з оброблюваною поверхнею. У процесі пластичної деформації поверхневий шар металу значно змінюється, що збільшує опір поверхні пластичній деформації, тому зменшення шорсткості уповільнюється із збільшенням тиску. Залежно від матеріалу величина сили вигладжування знаходиться у відповідних межах, коли початкові нерівності повністю згладжуються й утворюється шорсткість, що зумовлено самим процесом вигладжування (величиною подачі). Надалі збільшення сили вигладжування збільшує величину пластичних деформацій, висота нерівностей зростає порівняно з найменшою, поверхневі шари руйнуються, і з'являються тріщини.

Оптимальна величина сили вигладжування для деталі з загартованих сталей

$$P = 0,013 HV - \left(\frac{D \cdot R}{D + R} \right)^2,$$

де P – оптимальна сила вигладжування, Н;

HV – твердість оброблюваної поверхні за Віккерсом, $\text{Н/м}^2 \times 10^7$ (під час вимірювання твердості за Брінеллем або Роквелом ці числа твердості переводяться за допомогою довідкових таблиць у твердість за Віккерсом);

D – діаметр оброблюваної поверхні, мм;

R – радіус сфери робочої частини алмаза, мм.

Оптимальна величина сили вигладжування для матеріалів невисокої і середньої твердості

$$P = 0,008 HV - \left(\frac{D \cdot R}{D + R} \right)^2.$$

Зусилля вигладжування більше 200–250 Н для деталей з високоміцних матеріалів і більше 100–150 Н для матеріалів середньої твердості, погіршує перебіг процесу, знижує стійкість інструмента і може призвести до перенаклепу поверхні. Потрібна величина радіуса залежить від твердості оброблюваного матеріалу заготовки і допустимої величини зусилля. Основним критерієм вибору величини радіуса є твердість матеріалу оброблюваної заготовки. Для деталей з м'яких сталей і кольорових сплавів радіус сфери інструмента повинен становити 2,5...3,5

мм. Для деталей з матеріалів середньої твердості – 1,5...2,5 мм. Для деталей з високоміцних сталей ($HRC > 60$) становить 1,0...1,5 мм.

Не менший вплив на якість шорсткості має подача. Якщо подача знаходиться в межах від 0,02 до 0,10 мм/об шорсткість зростає, при цьому величина залишкової пластичної деформації зменшується. Найменша шорсткість досягається при подачі 0,02...0,04 мм/об; якщо подача нижче від 0,02 мм/об, шорсткість не змінюється або зростає порівняно з оптимальною, що можна пояснити перенаклепом поверхневого шару. Зменшення вихідної шорсткості під час вигладжування з подачею більшою 0,08...0,10 мм/об, несуттєве, і тому процес вигладжування стає малоефективним.

Шорсткість залежить від кількості робочих проходів i вигладжуваного інструмента. Із збільшенням кількості i до 2...3 шорсткість зменшується незначною мірою, оскільки повторні робочі проходи здійснюються вже по зглаженій і зміцненій поверхні. Якщо $i > 4$, можливий перенаклеп поверхневого шару; шорсткість при цьому дещо збільшується, тому під час вигладжування доцільно призначати один робочий хід. Швидкість вигладжування майже не впливає на величину шорсткості. Під час змінювання швидкості від 16 до 120 м/хв величина шорсткості майже не змінюється. Зростання швидкості вигладжування від 120 до 200 м/хв призводить до невеликого збільшення шорсткості. За великих швидкостей (200 м/хв і більше) унаслідок перегріву алмаз сильно зношується. В цьому випадку необхідно охолоджувати зони контакту алмазу з оброблюваною поверхнею. На якість вигладжування суттєво впливає також процес охолодження. Дія МОР проявляється у створенні зон, що легко деформуються, зменшенні коефіцієнта тертя та ін. При вигладжуванні заготовок з чорних металів і сплавів рекомендується застосовувати індустріальне масло І-20А, а з кольорових металів і сплавів – гас. Застосовують також спеціальні суміші МОР і поверхнево-активних речовин (ПАР).

Шорсткість вигладженої поверхні залежить від вихідної шорсткості. Заготовки із загартованих сталей ефективно вигладжувати за вихідної шорсткості не більше $R_a = 1,25$ мкм. Вигладжування з оптимальними режимами за $R_a = 0,08$ – $1,25$ мкм дає стабільне зменшення шорсткості в 4...5 разів. При вигладжуванні заготовок з загартованих сталей з вихідною шорсткістю $R_a > 1,25$ мкм через неповне згладування нерівностей шорсткість зменшується тільки в 1,5...2 рази, тобто застосування алмазного вигладжування неефективне. Під час вигладжування заготовок з незагартованих сталей, бронзи, алюмінію та інших аналогічних матеріалів встановлено, що можна ефективно вигладжувати поверхні з вихідною шорсткістю $R_a = 2,0$ мкм.

У разі зниження вихідної шорсткості ступінь її згладжування зменшується. Менший ступінь згладжування буде під час вигладжування поверхонь, що мають нерівності притупленої форми, наприклад хонінгованих, полірованих, обкатних роликів.

У результаті алмазного вигладжування розмір деталей може змінюватись на 3...5 мкм. Для більшості деталей це в межах допуску на розмір. Під час вигладжування більш точних деталей необхідно враховувати зміну розміру.

Важливими характеристиками мікрогеометрії поверхні: відносна опорна довжина профілю t_p , відносна опорна частина площі t_f і радіус заокруглення мікронерівностей під час алмазному вигладжування r – більш сприятливі, ніж при інших кінцевих методах обробки (табл. 2.2).

Таблиця 2. 2

Характеристика мікрогеометрії поверхні заготовок, оброблених різними оздоблювальними методами

Метод обробки	R_a , мкм	Радіус заокруглення мікронерівностей, мкм	Опорна частина	
			профілю, t_p	площі, t_f
Алмазне вигладжування	0,16	1000	30	15
	0,08	1500	45	20
	0,04	2500	70	70
	0,02	3500	87	50
Суперфінішування	0,08	350	25	80
	0,04	450	35	14
Полірування	0,16	200	18	5
	0,08	300	22	8
	0,04	400	30	15
Тонке шліфування	0,16	70	4	1,5
	0,04	100	7	2,0

У процесі алмазного вигладжування, як і під час обробок деталей іншими методами ППД, у тонкому поверхневому шарі здійснюються складні фізичні процеси, зумовлені пластичною деформацією, нагріванням тощо. Зокрема, збільшується кількість дефектів кристалічної ґратки, здійснюються деякі структурні перетворення, наприклад, для загартованих сталей – розпад залишкового аустеніту і перетворення його в мартенсит. Внаслідок цього збільшується питомий об'єм деформівного металу, який прагне розширитись, але шари, що лежать нижче, перешкоджають цьому. Так з'являються стискувальні залишкові напруження, які підвищують експлуатаційні властивості деталей.

Глибина залягання стискувальних напружень залежно від матеріалу оброблюваної заготовки і режимів вигладжування становить 0,15–0,4мм, величина напружень – до 1,2 ГПа.

Пластична деформація під час алмазного вигладжування викликає зміцнення поверхневого шару металу: збільшуються твердість, межа пружності і текучості, але зменшується його пластичність. Зміцнення поверхневого шару пов'язане із зміцненням кристалічної структури металу. Зерна металу дробляться і утворюється дрібнозерниста структура, при цьому збільшується кількість викривлень кристалічної ґратки – дислокацій. Дислокації перешкоджають переміщенню окремих частинок кристалів по площинах ковзання, а подолання опору дислокацій викликає значно більші напруження, ніж це необхідно в незагартованому металі. Внаслідок цього зростає міцність пластично деформованого металу. Величина сили вигладжування визначає ступінь пластичної деформації і значно впливає на характеристики зміцнення поверхневого шару.

Зазвичай максимальну мікротвердість має безпосередньо поверхня вигладженої деталі. Зі збільшенням глибини мікротвердість зменшується і на глибині 0,2...0,4 мм стає рівною вихідній. Зі збільшенням сили вигладжування мікротвердість досягає максимуму за $P = 160...230$ Н. У разі надмірного збільшення вигладжування може виникнути перенаклеп, що зумовлює появу мікротріщин і зниження мікротвердості поверхні. Мікротріщини також з'являються під час вигладжування з невеликими силами, але малими значеннями подачі (менше 0,02 мм/об) і кількості робочих проходів (більше 5...8). При оптимальних режимах алмазного вигладжування вірогідність руйнування поверхневого шару виключається. Температура вигладжування при звичайних режимах не перевищує 150...300 °С, причому вона різко знижується із збільшенням глибини. На глибині 0,1...0,3 мм від поверхні температура знижується до вихідної, однак під час вигладжування з великими силами, коли величини сил тертя і виділення тепла зростають, можливе значне підвищення температури поверхневого шару. У нормальних умовах вигладжування температура поверхневого шару значно нижча від температури рекристалізації, і нагрівання несуттєво впливає на мікроструктуру поверхневого шару. Отже, під час вигладжування виключені структурні і фазові перетворення, які зумовлені дією тепла в процесі обробки (припикання, повторне загартування і відпуск), характерні для методів обробки різанням.

Під дією пластичного деформування поверхневого шару змінюється його фазовий склад. Після шліфування заготовок з загартованих сталей склад залишкового аустеніту в поверхневому шарі може збільшуватися до 30...40 %. Залишковий аустеніт, що виникає в поверхневому шарі деталей з загартованих сталей після шліфування, є небажаною структурною

складовою. Він знижує опір контактної втоми і зносостійкість. У результаті рентгеноструктурних досліджень фазового складу поверхневого шару встановлено, що у процесі алмазного вигладжування відбувається інтенсивний розпад залишкового аустеніту. Із зростанням сили вигладжування кількість розпадів збільшується. Так, при вихідному 30 відсотковому вмісту залишкового аустеніту вигладжування з зусиллям 320 Н викликало практично повний його розпад. Зменшення подачі і збільшення кількості робочих проходів при вигладжуванні знижують кількість залишкового аустеніту. Розглянуті показники дозволяють правильно визначити параметри вигладжування: силу P , радіус інструмента R , подачу S , швидкість обробки V , кількість робочих проходів t .

Гладка блискуча поверхня, отримана під час вигладжування, зумовлює виявлення неозброєним оком розміщених на ній дрібних тріщин завширшки 1–3 мкм та інших дефектів, які не видно на шліфованій або полірованій поверхні.

На шліфованій поверхні добре видно багато впадин і виступів, що чергуються, орієнтованих у напрямку обробки. На вигладженій поверхні помітні лише окремі мікронерівності, які залишились після шліфування. Справді, вигладжена поверхня має вигляд гладкої, блискучої і більш світлої порівняно з шліфованою.

Ефективність вигладжування значною мірою залежить від характеристик деформувального інструмента, який повинен мати такі властивості: велику твердість, високу межу міцності на стиснення, здатність до опору стирання, низький коефіцієнт тертя по металу, велику теплопровідність і теплоємність, добру оброблюваність. Найкраще ці вимоги задовольняє алмаз.

Крім нього, такі якості, але меншою мірою, має синтетичний корунд (рубін і лейкосапфір), мінералокераміка, тверді сплави і загартовані інструментальні сталі. Алмаз має найбільш сприятливі фізико-механічні властивості порівняно з іншими матеріалами: він у шість разів твердіше за тверді сплави, у 10 – за інструментальні сталі. Для виготовлення вигладжувачів використовують природні і синтетичні алмази. Алмази, розміром більше 3 мм, у вигляді полікристалів отримали називають «балас» і «карбонадо».

Стійкість природних і синтетичних кристалів алмаза приблизно однакова і становить під час обробки деталей з загартованих сталей і високоміцних матеріалів близько 100 км, для чавуну – 50...70 км, для м'яких матеріалів і матеріалів середньої твердості – до 200 км і більше. У перерахунку на машинний час ця робота становить від 10 до 30 год. Форма заточки інструмента наступна: сфера, бокова поверхня циліндра, ділянка

тора, конус, диск, однополосний гіперболоїд обертання, рівна площадка або площадка великого радіуса, яка переходить в конус або сферу. Найбільш поширені вигладжувачі сферичної та циліндричної форм, що випускаються серійно. Радіус сфери вигладжувачів передбачений в межах від 0,5 до 4 мм. Вигладжувачі з сферичною робочою поверхнею використовуються для вигладжування зовнішніх, внутрішніх і торцевих поверхонь, з циліндричною – для вигладжування тільки зовнішніх поверхонь тіл обертання.

Вигладжувачі з тороїдною робочою поверхнею застосовуються для вигладжування зовнішніх, внутрішніх і торцевих поверхонь. Залежно від способу впровадження алмазного інструмента в оброблювану поверхню розрізняють жорстке і пружне вигладжування. При жорсткому вигладжуванні інструмент закріплюють на верстаті так, як різець, і під час обробки він досягає заданої глибини, яка становить 3...7 мкм. Такий вид вигладжування застосовують обмежено внаслідок високих вимог до точності геометричної форми деталі, а також до жорсткості системи ВПД. Пружне вигладжування є більш простим і зручним способом для використання у виробництві. Основною перевагою пристроїв з пружним елементом навантаження є забезпечення стабільного зусилля вигладжування незалежно від похибок встановлення і точності геометричної форми заготовки. Конструкція таких пристроїв дозволяє регулювати силу вигладжування в широкому діапазоні. За типом системи навантаження пристрої для вигладжування можуть бути механічними, пневматичними, гідравлічними, електромагнітними і комбінованими. Надзвичайно поширені пристрої з механічною системою навантаження як найбільш прості і зручні в експлуатації. За видом оброблюваної поверхні їх можна класифікувати таким чином: для циліндричних, глибоких, сферичних, профільних, торцевих, плоских, уривчастих поверхонь.

Технологія вигладжування деталей має кілька типових переходів:

- 1) установка і закріплення оброблюваної деталі із забезпеченням биття поверхні не більше допустимого;
- 2) підведення пристрою до оброблюваної поверхні з інструментом;
- 3) ввімкнення обертання деталі;
- 4) створення натягу величиною 0,1...0,5 мм;
- 5) ввімкнення подачі верстата і виконання процесу вигладжування;
- 6) відведення пристрою з інструментом;
- 7) зупинка верстата, розкріплення і зняття деталі.

Пристрій має бути відтарований, відрегульований, виставлений і налагоджений на вигладжування визначеної деталі із заданим зусиллям. Перед початком обробки деталь поливають мастильно-охолоджуючими речовинами.

Режими вигладжування найбільш поширених матеріалів наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Режими вигладжування для різних матеріалів

Оброблюваний матеріал	Твердість матеріалу	P, Н	S, мм/об	V, м/хв	Параметр шорсткості R_a , мкм	
					вихідний	якого досягають
15 X	HRC 58...62	170	0,05	90	0,32	0,08
20 (цементована)	HRC 50...52	150	0,07	140	1,25	0,32
40X	HRC 42...52	100	0,05	100	1,25	0,32
30	HB 170	135	0,05	40...90	2,5	0,32
45	HB 190	140	0,02	25...180	1,25	0,08
45	HRC 42...44	130	0,01	25...180	0,32	0,08
45	HRC 59...61	140	0,02	25...180	1,25	0,16
СЧ 21	HB 210	150	0,07	100	1,25	0,32
P6M5	HRC 60...62	140	0,04	100...120	0,63	0,16
12X18H9T	HB 200	130	0,02	100...120	1,25	0,32
12ХН3А	HRC 60...62	140	0,04	100...120	0,63	0,16
18ХГТ	HRC 60...62	140	0,04	100...120	0,63	0,16
38ХМЮА	HB 210	135	0,05	30...80	1,25	0,16
ШХ15	HRC 60...62	150	0,04	100–120	1,25	0,32
БрАЖ9-4	HB 238	110	0,05	25...180	2,5	0,32
Сплав Инвар Н32	HB 210	150	0,07	40	0,63	0,08
Сплав Д1Т	HB 210	80	0,03	100	0,63	0,04
Сплав АК6	HB 210	80	0,05	50	0,63	0,08
Сплав В95-Т1	HB 182	120	0,05	25...180	0,63	0,04
Сплав ЛС59-1	HB 168	100	0,05	25...180	2,5	0,32

2.1.3. Обкочування та розкочування

Обкочуванням та розкочуванням оброблюються циліндричні зовнішні та внутрішні, наскрізні та глухі, плоскі поверхні, галтелі ступінчастих, колінчастих та шліцьових валів, бокові поверхні черв'яків.

Обкочуються деталі машин, виготовлені з сирих і загартованих сталей, чавунів і кольорових сплавів. Обкочування здійснюється за допомогою роликів, кульок або інших деформувальних інструментів,

закріплених у пристроях на токарних, свердлильних, зубообробних та інших універсальних або спеціальних верстатах. Обкочування застосовують у всіх видах виробництва. Нині є значна кількість як універсальних, так і спеціальних конструкцій обкатного і розкатного інструментів і пристроїв, при доборі яких віддається перевага найбільш продуктивним з робочим елементом у вигляді ролика. Ролики контактують з оброблюваним виробом на більшій площі, ніж шарики, і тому обкатування ведеться з більшою подачею. Пристрої з кульками дозволяють створити більш інтенсивну пластичну деформацію при менших зусиллях обкочування. В зв'язку з цим кулькові розкатні і обкатні пристрої рекомендують для обробки деталей малої жорсткості або для обробки твердих матеріалів. Пристрої з обкатними кульками рекомендуються також для обробки малогабаритних поверхонь і отворів малого діаметра.

Усі розкатні і обкатні інструменти і пристрої можна розділити на три основні групи:

- для накочування і обкочування прямолінійних і фасонних пласких поверхонь;
- для обкочування зовнішніх циліндричних і фасонних поверхонь тіл обертання;
- для розкочування циліндричних і фасонних отворів.

Довжину твірної ролика циліндричної форми беруть від 2 до 5 см для обробки невеликих деталей і при високій жорсткості ВПД, але у будь-якому разі вона не має перевищувати потроєної величини подачі. Циліндричний ролик з обох боків має забірні конусні перехідні частини. Кут забірного конуса зазвичай становить 5° . Конус потрібно плавно заокруглити в місці переходу до циліндричної робочої частини. Під час обкочування нешироких поясків і кільцевих канавок циліндричні ролики можуть працювати тільки з радіальною подачею. Їх осі повинні розміщуватись під кутом приблизно 5° відносно заготовки. Під час такого повороту утворюється контакт ролика із заготовкою краплеподібної форми, що полегшує процес пластичної деформації і виключає утворення хвилястості за роликами. Циліндричні ролики звичайно потребують великих зусиль обкочування, і їх рекомендують використовувати під час обробки великих жорстких заготовок. За цих умов дуже ефективно встановлювати циліндричні широкі ролики у пристроях, які дозволяють ролику самоустановлюватись на раніше обробленій поверхні.

Ролики з конічною поверхнею за ефективністю займають проміжне положення між тороїдальними і циліндричними. Якщо кути конуса не великі (у межах від $1,5$ до $2,5^\circ$), досягається найбільша продуктивність, але зусилля вигладжування треба менше, ніж за такої самої продуктивності у

циліндричних роликів. Збільшення кута конуса більш ніж на 5° зменшує згладжуваний ефект, потребує зменшення подачі, але при цьому досягається зростання ступеня і глибини зміцнення обкочуваної поверхні.

Для забезпечення високої якості обкатки потрібне ретельне оздоблення робочої поверхні ролика, а також забірних поверхонь конічних і циліндричних роликів. Шорсткість для поверхонь не має перевищувати $Ra = 0,32 \dots 0,08$ мкм. Твердість роликів не має бути нижчою HRC 62...65. Ролики виробляють із швидкорізальних сталей ШХ15, ХВГ, 9Х, 5УНМ, У10А, У12А і наплавляються твердими сплавами, але можуть виготовлятися суцільними твердосплавними. Одним із важливих параметрів ролика будь-якої форми є його діаметр. Найчастіше цей діаметр, а також загальну ширину ролика вибирають з технологічних і конструктивних міркувань. Можна обрати діаметр ролика, виходячи з відношення діаметра обкочуваної деталі до діаметра ролика, що становить $1,5 \dots 2$. При обробці деталей діаметром до 75 мм це відношення можна збільшити до чотирьох. Щоб запобігти появі мікросліду на обкочуваній поверхні, це відношення не має бути цілим числом.

Зусилля обкочування практично може досягти величин $50 \dots 100$ кН за допомогою гідрофікованих пристроїв. Гідравлічні або пневмогідравлічні пристрої зручні ще тому, що ними можна обкочувати конічні поверхні. Необхідне зусилля обкочування у них підтримується звичайною пускорегулювальною апаратурою. Для обкочування маложорстких деталей використовують компенсаційні обкатні пристрої з двома-чотирма рівномірно розмішеними навкруги обкочуваної деталі роликами. Такі пристрої встановлюють на місце різцетримача верстата або на спеціальних направлених поряд з ним.

Розкатними головками обробляють як короткі отвори з радіальною подачею роликів, та і глибокі довжиною до 500 мм. Під час розкочування співвісно розмішених по довжині двох отворів, застосовуються дворядні розкатні головки. Якщо попередня обробка виконана не дуже якісно, то доцільно використовувати розкатні головки з розміщенням роликів на пружному елементі. Наявність пружного елемента дозволяє отримати більш рівномірне зміцнення розкочуваного отвору. В одиничних і дрібносерійних виробництвах використовують більш прості однороликові пристрої, які встановлюють в розточну державку, і ними виконують розкатування відразу після розточування отвору. Цей патрон закріплюється на борштанзі розточного верстата – утворюється розкатка з великим діапазоном регулювання. Вона застосовується для оброблення великих отворів.

Поширені комбіновані розточні інструменти для обробки звичайних і глибоких отворів, що містять різальний і розкатний інструменти.

Ефективність обкочування і розкочування залежить від режиму і характеру деформації, стану та якості матеріалу оброблюваної деталі, форми і розмірів деформівної поверхні, ступеня нагріву тощо. З названих факторів найбільшу роль відіграють ті, які визначають зусилля і кількість циклів деформування. З погляду підвищення виробництва, обробки та якості поверхні найкраще збільшувати до певної межі і стабільно підтримувати зусилля деформування, ніж збільшувати кількість циклів деформування.

На виробництві зусилля обкочування і розкочування у деяких випадках підбирають дослідним шляхом, для чого роблять декілька проходів із ступеневим збільшенням навантаження на ролик. На початку виконують прохід з невеликим навантаженням, під час якого робиться лише згладжування гребінців від попередньої операції. Далі добирають таке навантаження, за якого згладжування поверхні й зміна її розмірів практично припиняються. Потім навантаження збільшується до величини, за якої здійснюється перезміцнення – поверхня лущить, руйнується. Зменшивши на 10...15 % це навантаження, отримують вихідну величину зусилля обкочування для певних умов.

Другим за важливістю параметром обкочування і розкочування, що визначає кількість циклів деформування, є подача. Численні значення величин подач для тороїдальних роликів залежать від профільного радіуса ролика, необхідної і вихідної шорсткості поверхні і кількості роликів у розкатному або обкатному пристроях. Для отримання шорсткості поверхні $R_a = 2,5...1,25$ мкм під час обробки циліндричними роликами подачі беруть рівними $0,3B$, де B – ширина циліндричного пояса ролика.

Зі збільшенням швидкості обкочування скорочується час впливу деформівних напружень, це прискорює утворення більш зміцненої структури поверхневих шарів матеріалу, але разом з тим зменшує глибину зміцнення, а у зв'язку з підвищенням температури у зонах контакту понад $180...200^\circ$ інтенсифікуються процеси знеміцнення. Швидкість обкочування беруть від 0,2 до 2,5 м/с. Вона лімітується умовами безвібраційної обробки, бажаної продуктивності, а для комбінованого інструмента – швидкістю обробки різальним інструментом.

Рекомендується здійснювати обробку за один прохід, але за підвищених вимог до шорсткості обкатаної поверхні, а також заниженій жорсткості системи ВПД обробку здійснюють за 2...3 проходи. Інколи виконуються два проходи різними роликами. Під час першого проходу роликом з більшим радіусом R забезпечується згладжування поверхні, під час другого – досягається необхідне зміцнення поверхневих шарів роликом із значно меншим радіусом. Є емпіричні залежності, які пов'язують

отриману шорсткість поверхні і зміцнення діаметра обкочування вала з вихідною шорсткістю, якістю матеріалу вала і режимами обкочування.

Важливим параметром під час розкочування є натяг, тобто величина перевищення діаметра розкатки над діаметром отвору у заготовці. Практично величину натягу встановлюють дослідним способом і має становити 0,005...0,1 мм для розкаток діаметром 10...160 мм, причому числове значення натягу звичайно вище для більш в'язких матеріалів. Наприклад, якщо для в'язких сталей рекомендований натяг 0,025...0,05 мм при діаметрі розкаток 25...50 мм, то для більш твердих він має бути нижчим: 0,02...0,03 мм. Величина подачі роликів розкатних головок визначається з розрахунку 0,1...0,5 мм/об для одного ролика. Швидкість розкочування обирається так, як і під час обкочування.

Обкочування поверхонь всіх матеріалів, крім чавуну і міді, рекомендується вести з МОР. Так, для сталей можна використовувати машинне масло І-20, в яке інколи додають 2...3 % олеїнової кислоти, або суміш 50 % гасу з сульфоліном, а під час обкочування сплавів алюмінію – гас.

Отримала розповсюдження обробка плоских поверхонь накочуванням. Точність плоских поверхонь після накочування визначається переважно точністю попередньої обробки. Обробка їх кульковими і роликівими деформульним інструментом може здійснюватись на будь-яких стругальних і фрезерних верстатах.

Одноріликові й однокулькові оправки стискаються в супортах або головках, і їх подача здійснюється рухом стола вздовж або поперек оброблюваної площини. Багатокулькові головки закріплюють в шпинделях фрезерних верстатів і обертаються під час руху стола з закріпленою оброблюваною деталлю.

Після накочування одноріликовими оправками шорсткість поверхні становить $R_a = 0,63...0,08$ мкм, а багатокульковими головками – до $R_a = 1,25...0,16$ мкм.

Діаметри кульок залежно від потрібної точності і шорсткості, а також матеріалу деталей, що обкочуються беруть у діапазоні 12...32 мм, діаметри роликів і радіуси заокруглень їх робочих частин беруть відповідно 50...240 і 50...200 мм.

Для отримання мінімально можливої шорсткості поверхні обробка ведеться з подачею 0,05...0,2 мм за діаметра кульок 17...18 мм. У разі збільшення діаметра кульок подача дещо збільшується. Швидкість качання кульок для чавуну має неперевисувати 2,5 м/с, а для сталей – 3,5 м/с. За цього тиск кулька або ролика на чавунну поверхню не має перевищувати межі міцності чавуну (600...650 МПа). Під час обробки

сталевій поверхні цей тиск повинен перевищувати межу міцності оброблюваної сталі на 12...16 %.

Кульовий інструмент можна класифікувати за такими ознаками: характером оброблюваних поверхонь – для зовнішніх циліндричних, для внутрішніх циліндричних і для плоских; кількістю деформувальних елементів – однокульковий і багатоккульковий; характеру створення деформівної сили – пружний і жорсткий (деформівна сила у пружному інструменті створюється за допомогою тарованої пружини пневматичним або гідравлічним засобами, у жорсткому – завдяки натягу між інструментом та оброблюваною поверхнею). Кульковий інструмент використовують для обробки спеціальних або складнопрофільних поверхонь: сфер, галтельних переходів, жолобів підшипників тощо.

Твердість поверхні при обкочуванні підвищується для всіх матеріалів, і чим вища міцність оброблюваного матеріалу, тим більший оптимальний тиск обкочування. Твердість збільшується до глибини 2 мм, однак на глибині 1,0...1,5 мм твердість поступово знижується, кількість робочих ходів та швидкість обкочування несуттєво впливають на поверхневу твердість.

Розкочування. Для оброблення внутрішніх поверхонь застосовують сепараторні та безсепараторні пристрої, але в основному під час розкочування користуються пристроями сепараторного типу. Ролики (3...20 шт.) у них суцільні, розміщені по колу в гніздах спеціального сепаратора під кутом до осі оброблюваної поверхні.

Ролики найчастіше мають циліндричну та конічну форму, під дією опорної поверхні та осьової сили передня частина ролика входить в оброблювану поверхню під кутом (кут вдавлювання). Пристрої (розкатники) складаються з таких основних елементів: ролика, сепаратора, опорного конуса.

Найчастіше застосовують «жорсткі» розкатники, в яких регулюють не силу розкочування, а натяг, тобто різницю діаметрів розкатника і оброблюваної поверхні. Їх недолік – обмежена можливість регулювання діаметра при переналадці.

Пружні, або «копіювальні», розкатники оснащені у деяких випадках тарованим силовим елементом, мають ширший діапазон регулювання розміру, але конструкція їх складніша, а продуктивність менша, ніж у «жорстких». Тому їх доцільно використовувати для оброблення нежорстких деталей та у деяких інших випадках, коли сила оброблення обмежена. Використовувати багатороликові сепараторні розкатники економічно не вигідне та технічно важкоздійнюване під час оброблення внутрішніх поверхонь великого діаметра. У таких випадках краще використовувати безсепараторні одно-, дво- та трьохроликові пристрої

пружної дії. Залежно від характеру оброблюваних поверхонь сепараторні роликові пристрої можна поділити на дес'ять типів різної конфігурації, при цьому тільки перша та друга групи (циліндричні та конічні) нормалізовані. Параметри обробки, продуктивність та довговічність сепараторних розкатників залежать від форми деформувальних роликів. Ролики майже всіх форм дають краплеподібну пляму контакту. Найбільше використовують ролики першої – третьої груп, а ролики четвертої – восьмої груп застосовують рідко, їх складно виготовляти.

Ролики першої, другої групи виробляють із стандартних роликів (від підшипників), шліфують їх торці та закруглюють головки. Їх недоліки:

- через конічну форму роликів та опорних конусів кругові швидкості по довжині ролика різні, що викликає проковзування у зоні деформування та ву контакті з опорним конусом (це погіршує процес обробки та пришвидшує зношування роликів);

- ролики мають бути точно встановленні в гніздах сепаратора, що збільшує трудомісткість їх виготовлення, а контакт торців із сепаратором знижує довговічність (довговічність можна забезпечити способом встановлення кульок у гніздах сепараторів та коротких роликів по торцям основних роликів).

Ролики третьої групи мають сильно витягнуту пляму контакту; проковзування характерне і для них.

Особливістю роликів четвертої групи є відсутність у них проковзування, що пояснюється використанням пружної втулки.

Еліптична форма роликів п'ятої – шостої груп забезпечує сприятливу форму відбитку, їх недоліки:

- велика площа контактної зони потребує прикладення до ролика значних зусиль; обкочування в умовах зусиль супроводжується, по-перше, нагріванням інструмента та прискореним зношуванням роликів, сепаратора й опорного конуса, та, по-друге, зміною геометричної форми отвору з недостатньо жорсткими стінками;

- контурний еліпс ролика має параметри, які залежать від розмірів оброблюваного отвору, що ускладнює та здорожчує вироблення роликів; в умовах масового виробництва це не може бути перешкодою, бо оскільки затрати на їх виготовлення повністю компенсуються високою продуктивністю та довговічністю інструмента.

Фасонний ролик у формі «вісімки» (шоста група) використовують для обробки тонкостінних циліндрів або точних отворів з нерівножорсткими стінками. Мала площа контактної зони забезпечує можливість створення високого тиску за порівняно низьких зусиль, що характерно для деформування кулею. Недолік цих роликів – порівняно швидке зношування внаслідок малої площі опори.

Ролики восьмої групи у формі ввігнутого еліпсоїда мають максимальну площу контакту з опорним конусом та невелику площу контакту з оброблюваною поверхнею, тому вони мають високу стійкість і їх краще використовувати для обробки м'якожорстких деталей. Під час розкочування деталей особливо малої жорсткості велике значення має закріплення їх та інструмента.

Кращий спосіб закріплення деталі – підтиск її з торців постійним зусиллям. Закріплення розкатника має бути таким, щоб забезпечувалось його самоустановлення відносно отвору – це досягається плавним затиском або шарнірним з'єднанням.

2.1.4. Дорнування отворів

Дорнування є ефективним способом оздоблювально-зміцнювальної обробки отворів, що широко застосовується в промисловості. Під час дорнування підвищуються міцність пресових посадок і довговічність деталей, що мають концентратори напруг у вигляді поперечних отворів. Оздоблювально-зміцнювальна обробка дорнуванням дозволяє у деяких випадках виключити з технологічного процесу розгортання, хонінгування і термічні операції.

Дорнуванням можуть виконуватись не тільки оздоблювально-зміцнювальні, а й попередні операції обробки отворів у трубних заготовках перед наступною їх обробкою. При цьому пластичні деформації охоплюють всю товщину стінки оброблюваної деталі, діаметр отвору заготовок змінюється до потрібних розмірів, поліпшуються фізико-механічні властивості і оброблюваність матеріалу.

Дорнування використовується для обробки великих партій деталей. Найбільш часто ця операція слугує для отримання низької шорсткості поверхні. За вихідної шорсткості у межах $R_z = 40 \dots 6,3$ мкм, дорнуванням можна знизити шорсткість до $R_a = 3,2 \dots 0,8$ мкм, а у деяких випадках до $R_z = 0,8 \dots 0,2$ мкм. Точність після дорнування зростає до 6...9 квалітету.

Дорнуванню піддаються отвори у звичайних і важкооброблюваних сталях і сплавах, в чавунах і кольорових сплавах.

Якщо дорнування коротких отворів широко висвітлене у літературі, то застосування дорнування для глибоких точних отворів вивчено недостатньо. Загальноживаний у машинобудуванні технологічний процес виготовлення отворів 7...9 квалітету з шорсткістю поверхні $R_a = 0,63 \dots 0,08$ мкм і довжиною більше 25 діаметрів має досить трудомісткі операції: глибоке свердління, зенкування, чорнове і чистове розточування, передчасне й остаточне розкочування, або хонінгування. Щоб зменшити трудомісткість і покращити якість виробництва подібних деталей можна

використовувати технологічний процес обробки отворів, який складається із свердління однокромковим свердлом із внутрішнім відведенням стружки і наступного поверхневим дорнуванням.

Для покращення оброблення і відведення стружки різальна частина однокромкового свердла має мати не менше двох стружкоділильних уступів. Величина зсуву вершини свердла від осі не менше $0,1 D$, а діаметр нульового стержня не перевищує $0,3...0,5$ мм. Поріг, що має стружку на передній грані, розміщується під кутом $2...3^\circ$ до різальної кромки, що визначає величину подачі.

Великий вплив на величину відведення свердла, точність діаметра отвору і шорсткість оброблюваної поверхні мають калібрована та опорна напрямна свердла. Їх виготовляють із сплаву ВК6М. Довжина кожної направляючої становить не менше $0,5 D$, а зворотна конусність – не більш $0,02$ мм на 100 мм довжини. Діаметр цих напрямних звичайно беруть рівним діаметру каліброваної фаски, причому опорна напрямна розміщена у площині, перпендикулярній до передньої грані свердла.

Дотримання вказаних вимог при свердлінні отворів діаметром $D = 30...45$ мм і довжиною більшою $25 D$ в товстостінних циліндрах зі сталі 38ХМЮА дає можливість отримати точність у межах 9...11 квалітету при шорсткості поверхні $R_a = 2,5...1,25$ мкм. Відхилення осі від прямолінійності не виходить за межі половини допусків на розмір отвору.

Наступне дорнування забезпечує досягнення високої якості, продуктивності і точності, що досягається, лежить у межах 7...8 квалітету, шорсткість $R_a = 0,63...0,08$ мкм, а поверхневий шар зміцнюється в $1,5...2$ рази. Дорнування здійснюється на протяжному верстаті, модель якого вибирають у залежності від зусилля протягання, що визначається діаметром оброблюваного отвору і натягом. Величини натягу, залежно від діаметра отвору, беруть від $0,15$ до $0,4$ мм за вихідної шорсткості $R_z = 40...6,3$ мкм.

Із збільшенням натягу зростає зусилля дорнування, збільшується глибина деформівного шару і зменшується шорсткість обробленої поверхні. Зі збільшенням натягу понад $0,35$ мм шорсткість зростає, що пояснюється деформуванням металу не лише в радіальному напрямку, а й у напрямку руху інструмента, який під впливом сил тертя утворює на обробленій поверхні задирки, риски і нерівності.

Твердосплавними деформувальними кільцями дорну оброблюють отвори діаметром від 10 до 45 мм. Під час дорнування високопластичних сталей можна досягти пластичної деформації до 10% від діаметра оброблюваного отвору. Найкращі результати дорнування досягнуті за вихідної шорсткості $R_a = 2,5...1,25$ мкм і нижче. Дорнування отвору в товстостінних циліндрах великої довжини із сталей 38Х2МЮА і 45

забезпечує необхідну точність і шорсткість, однак на початку отвору вона дещо вища $R_a = 0,08 \dots 0,012$, а у кінці – $R_a = 0,012 \dots 0,022$ мкм.

Однією з основних умов, від якої залежить якість проведення дорнування, є встановлення правильних співвідношень натягу і параметрів вихідного стану отвору.

Від величини натягу багато в чому залежать не лише тягове зусилля і параметри оброблюваної поверхні, а й деформація всього тіла циліндра. Так, під час деформування циліндрів з товщиною стінки 32,5 мм і за натягівх 0,78; 0,46; 0,29 і 0,22 приріст зовнішнього діаметра відповідно становить 0,19; 0,05; 0,02 і 0,01 мм. Натяг на кожне деформуюче кільце має бути нерівномірним. На першому він має найбільшу величину, на наступних – меншу, а в кінці робочої частини дорну встановлюються два кінцевих кільця з діаметрами, рівними діаметру останнього кільця робочої частини. Перенесення 0,5...0,8 загального натягу на перше деформувальне кільце дозволяє здійснювати процес дорнування за один прохід.

Найбільш поширені і зручні багатозубцеві дорни, які складаються з набору твердосплавних кілець або суцільних багатотрубних блоків, зібраних на оправі.

Під час дорнування отворів невеликих діаметрів, коли конструктивно неможливо виготовити дорн збірним, його виготовляють суцільним із сталей ХВГ, 9ХС, ШХ15 або з швидкоріжучих сталей. Для дорнування отворів з кольорових сплавів як інструмент можна застосовувати загартовані кульки, вони порівняно дешеві і можна швидко замінити у разі зношування.

Стальні дорни загартовуються до максимальної твердості HRC 62...64. Для підвищення стійкості на їх робочі поверхні напилюють тверді покриття, або їх азотують чи хромують. Хромовані дорни в більшості випадків піддають електролітичному сульфідуюванню, яке підвищує їх стійкість, за рахунок чого суттєво знижується собівартість дорнування.

Кільця збірних оздоблювально-зміцнювальних дорнів виготовляють із твердих сплавів ВК6, ВК8, ВК15М та ін. Розмірна стійкість їх значно вища порівняно із стійкістю дорнів, виготовлених із швидкорізальної сталі.

Для в'язких металів рекомендована швидкість дорнування отворів циліндрів великої довжини становить 0,03...0,08 м/с, для менш пластичних – 0,08...0,12 м/с.

Під час дорнування найкращими мастилами є свиріп'яна, лляна, конопляна, рицинова олія тощо.

Для обробки мало- та середньовуглецевих сталей при порівняно невеликих натягах (відносний оптимальний натяг до 0,006 мм) застосовують такі мастила: масло індустриальне або веретенне, емульсію та ін.

Під час оброблення більш міцних сталей і за більших натягів добрі результати дають мастила, які складаються із суміші мінерального масла з деякими сортами олій, олеїнової кислоти, милами та ін., а також мінеральні оливами з наповнювачами – графітом, сіркою, тальком. Досить добрі результати дає застосування дисульфїту молібдену у порошку або в суміші з мінеральною оливою (у співвідношенні 2:1).

Для чавунних деталей рекомендують використовувати очищений гас, який забезпечує хорошу чистоту обробленої поверхні.

Алюміній та алюмінієві сплави добре оброблюються із змащенням мильною водою, сумішшю мінеральних олій і жирів (ланолін, сало) з додаванням (до 30 %) мінеральних олів з наповнювачами (графіт). Для сплавів на основі міді застосовують мінеральні оливи або емульсію.

Після виконання операції дорнування не менш важливим і складним під час оброблення глибоких отворів є перевірка отриманої геометричної форми, розмірів отвору і шорсткості. Значні труднощі виникають при замірах шорсткості поверхні отворів циліндрів великої довжини. Шорсткість таких отворів найбільш зручно вимірювати за допомогою зліпків, знятих з його поверхні з наступним замірюванням на подвійному мікроскопі або профілометри-профілографі. Матеріал, застосований для виготовлення зліпків, повинен добре заповнювати всі нерівності циліндра, швидко і без усадки застигати, мати достатню міцність і твердість. Найбільш повно цим вимогам відповідає самозастигаюча пластмаса на основі акрилових смол, яку отримують змішуванням порошку (полімеру) і рідини (мономеру). Полімер складається з 78 % порошку поліметилметакрилату емульсійного, 20 % полістиролу, 1,35 % оксиду цинку і 0,5...0,7 % пероксиду бензолу. Мономером служить метиловий ефір метакрилової кислоти з додаванням 0,005 % гідрохінону для попередження самополімеризації і регулювання швидкості полімеризації. Перед накладанням зліпка на контрольовану ділянку, отвір циліндра ретельно знежирюють спиртом. Зняття зліпка здійснюється за допомогою спеціального пристрою.

Проштовхування або протягування дорну в отворі з великим або меншим натягом завжди супроводжується тертям ковзання за високого контактного тиску. У таких умовах у напрямку руху дорну утворюється згладжений текстурований поверхневий шар. В ньому сильно виражені пластичні деформації зсуву, які викликають підвищення мікротвердості й зміцнення поверхневих шарів, залишкові напруження стиснення і, в деяких випадках, подрібнення зерен. Фізико-механічні властивості і стан утвореного дорнуванням поверхневого шару суттєво відрізняються від якостей основного матеріалу оброблюваної деталі і залежать від оброблюваного матеріалу, загальної величини натягу, кількості

деформівних елементів, товщини стінки деформуючої деталі й застосованих мастильних матеріалів.

У процесі дорнування найбільший вплив на точність обробленого отвору і фізико-механічний стан його поверхневого шару справляють загальний натяг і кількість деформувальних елементів кілець. Гранично можливу точність дорнування 6...7 квалітету можна отримати дорнами, що працюють тільки з малими натягами. Натяги повинні зменшуватись від початкового до кінцевого деформувального елемента. Попередня обробка отвору має бути не грубіша 8 квалітету для того, щоб зменшити коливання натягів, а сумарна величина натягу для різних діаметрів повинна становити 0,025...0,15 мм. Під час дорнування точних отворів необхідно забезпечити загальну деформацію у межах 0,5...1 % за кількості деформувальних елементів 5...7 для вуглецевих і низьколегованих сталей. За таких умов дорнування, шорсткість може перебувати у межах $R_a = 1,25...0,05$ мкм.

Коли на операціях, які передують дорнування отримують значний за глибиною дефектний шар із невисокою точністю розміру, тоді дорн повинен працювати з такими натягами, щоб кожне деформувальне кільце виконувало однакову деформацію у межах 1...2 %. Таке дорнування у жорстких деталях може забезпечити 8...11 квалітети при шорсткості $R_a = 1,25...1,0$ мкм.

Наведені величини точності і шорсткості стосуються дорнування деталей типу втулок з рівномірною за довжиною шорсткістю. Успішно впроваджують дорнування для виправлення похибок з нерівномірною жорсткістю. Нерівномірність жорсткості деталі за довжиною отвору виражається коефіцієнтом K , рівним співвідношенню максимальної і мінімальної товщини стінок деталі. Цей коефіцієнт коливається в межах від 1,5 до 7. Для триелементних дорнів підбирають величину натягу для різних комбінацій K і вихідні похибки можна суттєво знизити похибку форми оброблюваного отвору. При цьому забезпечуються висока точність діаметрів отворів і суттєве зниження вихідної шорсткості. Під час формування будь-яких отворів для досягнення необхідної точності і шорсткості потрібна експериментальна перевірка достатності вибраної величини натягу, а отже, і діаметрів деформувальних і калібруючих кілець дорну. Дорнування звичайно є останньою операцією під час обробки точних отворів.

Зростання мікротвердості, що супроводжує структурні зміни в деформівному шарі, проявляється відразу ж після проходу перших деформувальних елементів. Ступінь максимального зміцнення коливається для різних сталей від 30 до 160 %. Для легованих сталей 10, 20, 45, У8А приріст твердості дорівнює відповідно HV 150, 160, 170, 175, а глибина впливу дорнування – 1,0; 1,65; 0,4; 0,3 мм. Для високолегованих сталей

38ХМЮА і Х18Н10Т твердість дорівнює відповідно НV 90 і 30, а глибина зміцнення – 0,3 і 1,0 мм. Зростання мікротвердості, величини і глибини зміцнення в поверхневому шарі підвищує експлуатаційні показники деталей машин, підданих дорнуванню.

Дорнування отворів у жорстких деталях з малими натягами і в деталях середньої жорсткості утворює залишкові напруження стискання. Для деталей із вуглецевих сталей 10, 20, 45 і У8А при натягах 0,05 і 0,1 мм на один деформувальний елемент кількісні значення стискувальних напружень дорівнюють відповідно 18, 25, 32, 38 і 14, 20, 25, 35 МПа. Максимальні стискувальні напруження сягають глибини кількох десятих часток міліметра від поверхні отвору. Зі збільшенням кількості деформувальних елементів дорну за однакової на кожний елемент величині натягу величина залишкових напружень підвищується. Чим більша міцність оброблюваного матеріалу і кількість циклів деформації, тим на більшій глибині виникають залишкові напруження (від 1 до 3,5 мм). За натягу на кожний деформувальний елемент, що перевищують 0,4 мм, у поверхневому шарі з'являються несприятливі для експлуатації домішкові напруження, їх величина збільшується зі зростанням натягу. Про знак залишкових напружень можна судити за результатами вимірювання діаметра отвору після дорнування. Підвищити якість поверхні у ході дорнування можна до визначеної межі, яка характеризується луценням поверхні у результаті перезміцнення. Перезміцнення виникає після деякої критичної кількості циклів деформації. Кожен цикл деформації відповідає одному кільцю дорна. Ця кількість циклів визначається залежністю

$$n_k = \frac{0,28HB}{\delta^{0,65}},$$

де HB – твердість матеріалу;

δ – товщина стінки оброблюваної деталі.

Ця формула справджується під час роботи з натягами на деформувальні елементи у межах від 0,03 до 0,4 мм.

Підвищення точності й зміцнення поверхонь після дорнування дає суттєві результати у виробництві. Під час виконання операцій дорнування підвищується ресурс роботи деталей; знижуються витрати запасних частин; до 30 % підвищується продуктивність праці внаслідок виключення з технологічного процесу операцій чистового розгортання, хонінгування, термічної обробки.

2.1.5. Дробоструминне зміцнення

За допомогою пневмодробоструминних і дробометних процесів зміцнюють, а також очищують деталі будь-якої геометричної форми, і при цьому не потрібна їх строга орієнтація у просторі. Введення в дробоударне зміцнення МОР дозволяє зробити процес більш тонкорегульованим і стабільним. Дробоструминне зміцнення легко піддається автоматизації.

Деформуючим елементом на пневмодробноструменевих дробометних пристроях є звичайний дріб. Його класифікують за типом матеріалу – чавунний, сталевий, скляний, рублений з дроту, кульки від підшипників; за діаметром – від 0,025 до 4...5 мм; за точністю – допуск від 0,4 (для дроби) до 0,02 мм (для кульок від підшипників); за геометрією – довільна в литого дроби і правильної форми у кульок. Для зміцнення кольорових сплавів рекомендується застосувати алюмінієвий або скляний дріб.

З найбільш типових дробометних пристроїв, що використовуваних у промисловості, відомий пристрій моделі ДУ-1 і його модифікації. В основу пристрою ДУ-1 покладено механічний принцип розкидання дроби швидкообертливим потоком з вертикальним розміщенням осі його обертання. Пристрій складається з трьох головних частин: робочої камери, сепаратора й елеватора. Дріб засипають у завантажувальний бункер елеватора, потім піднімають елеватором у бункер живильного пристрою ротора, з якого він попадає через дросель на лопаті ротора, котрі надають дроби швидкості до 70 м/с. Деталі опиняються у струмені дроби, зміцнюються. Відпрацьований дріб падає в нижній збірник елеватора. В процесі вільного падіння дріб зустрічається з струменем повітря, уламки дроби малої маси зносить у бункер відходів.

Недоліками дробометного зміцнення є нагрівання деформівної поверхні від ударів твердих дробинок, які летять з великою швидкістю, невисока щільність і рівномірність потоку дроби, що відображається на однорідності і суцільності зміцнення. Ці недоліки частково ліквідовані в установках дробометного типу, які здійснюють зміцнення мікрокульками діаметром 0,1...0,2 мм. Мікрокульки подаються зверху у внутрішню порожнину вала роторного колеса і розкидаються щільним струменем через радіальні отвори або щілини, набуваючи під дією відцентрових сил швидкості 40...100 м/с. Застосування мікрокульок замість дроби дозволяє більш тонко регулювати ступінь зміцнення у важкодоступних місцях, наприклад у западинах зубців.

Зміцнення й очищення великих і важких деталей в умовах важкого машинобудування виконується в дробоструминних камерах форсункою, якою керує одягнений у відповідний автономний скафандр оператор або спеціальний робот. Отже, для зміцнення потрібен кулястий міцний дріб.

Щоб дріб не деформувався у момент удару, твердість його має бути вищою від твердості оброблюваного матеріалу, але з підвищенням твердості дробу зростає його крихкість, що призводить до розколу дробу, пошкодження зміцнюваної поверхні та знижує ефективність процесу.

Легування чавуну, з якого виробляють дріб, нікелем, хромом та міддю підвищує якість дробу. Наприклад: введення в чавун 0,3...0,5 % міді підвищує міцність дробу на ударних випробуваннях на 20...50 %. Відпал дробу також позитивно впливає на його якість. Головний недолік чавунного дробу – його підвищена крихкість та велика витрата під час дробоструминної обробки. Так, витрата чавунного дробу на один ротор дробоструминної установки, що призначена для зміцнення ресор, за швидкості 70...80 м/хв сягає 50 кг. Нині замість дробу з відбіленого чавуну використовують сталевий дріб, який загартовують за $t = 860...900$ °C з наступним низькотемпературним відпуском за $t = 180...220$ °C протягом 1,5...2 год. Він має високу стійкість (витрата його у 30 разів менша, ніж чавунного).

Чим вища динамічна міцність, однорідність за розмірами і твердість дробу, призначеного для дробоударної обробки, тим кращі його технологічні якості. Якість дробу зазвичай характеризується його динамічною міцністю, тобто здатністю витримувати удари об оброблювану поверхню, не руйнуючись. Практика показує, що витрати сталевих дробу в 30...60 разів менші, ніж чавунного, і, не звертаючи на те, що сталевий дріб дорожчий від чавунного в 4...5 разів, видатки на сталевий дріб у 8...10 раз менші, ніж на чавунний. Максимальна швидкість чавунного дробу лімітується його міцністю і найчастіше не перевищує 90 м/хв. Застосування сталевих дробу дозволяє збільшити швидкість в 1,5...2 разу порівняно із швидкістю чавунного дробу.

На практиці застосовують дріб діаметром 0,4...2,0 мм. Чим менший діаметр дробу, тим нижча шорсткість обробленої поверхні. Під час зміцнення деталей з концентраторами напруг на робочій поверхні кращі результати отримують під час обробки дробом, радіус якого відрізняється від радіуса концентраторів напруг типу гантелей, надрізів або канавок. За невеликих концентраторів напруг застосовують дріб з радіусом, більшим від радіуса концентратора напруг. У цьому разі зона впливу концентратора напруг не виходить за межі глибини зміцненого шару. Якщо концентратор напруг глибокий, слід застосувати дрібний дріб з радіусом, меншим від радіуса концентратора напруг. Сталевий і чавунний дріб має різне розсіювання за розмірами, формою і твердістю, що значно впливає на якість поверхні. Цих недоліків позбавлений, наприклад, спосіб гідродробоударного зміцнення: робоча суспензія містить стандартні сталеві кульки зі стабільними геометричними якісними параметрами.

Методи обробки матеріалів поділяють на дві групи – обробка сухим дробом та обробка дробом із МОР. Під час сухої дробоударної обробки, коли удари дробу слідує один за одним з великою частотою, перші удари відчищають поверхню не тільки від окалини чи окисної плівки, але й від чужорідних молекулярних часток, роблячи її ювенільною. Цей процес проходить в умовах сухого тертя.

Гідродробоструминне зміцнення проходить в умовах гідродинамічного тертя, бо у зоні удару завжди є прошарок мастильного матеріалу, та поверхня дробинки вкрита МОР.

Кожний з методів обробки характеризують кілька параметрів:

- спосіб передавання дробу кінематичної енергії;
- швидкість польоту дробу (1...100 м/с).

Характеристика дробу: його матеріал (чавун, сталь, скло чи матеріал деталі); метод виробництва, діаметр, форма.

Під час обробки дробом шорсткість оброблюваної поверхні підвищується незначно, а при деяких методах та режимах обробки можливе і зменшення шорсткості.

Під час обробки дробом відбувається прямий удар, коли куля входить у тіло, а не ковзає по ньому. Створюється тертя, яке є тертям удару.

Удар кульки по плоскій поверхні тіла, вкритого плівкою МОР, з енергією E_y складається із кількох окремо закінчених етапів її руху (рис. 2.4) і формування лунки глибиною h :

- подолання кулькою товщини h_p плівки рідини $h_1 = 0$;
- входження кульки на глибину h_2 ;
- додаткове входження кульки на глибину h_3 ;
- відскок кульки на відстань h_4 ; енергія пружнонапруженого металу передається кульці, і вона витрачає енергію на розрив тимчасового зв'язку з поверхнею;
- продовження відскокування кульки, яка витрачає енергію на подолання сил молекулярного зчеплення з рідиною, на поверхні залишається лунка глибиною $h = h_5$.

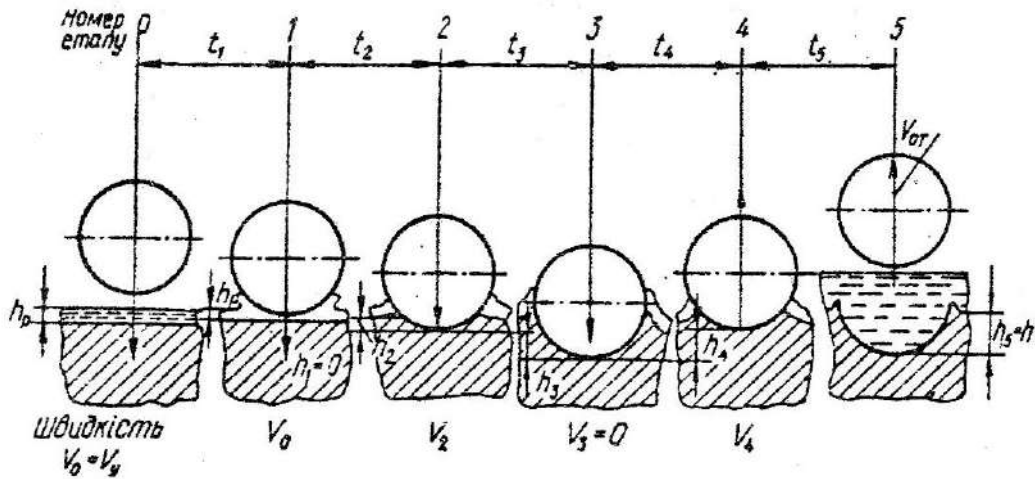


Рис. 2.4. Етапи взаємодії робочого тіла з поверхнею, що оброблюється дробом

Рівняння балансу енергій має вигляд

$$E_y = E_{пл.д} + E_{тр} + E_p + E_{хв},$$

де $E_{пл.д}$ – енергія, витрачена на пластичне остаточне деформування (створюється лунка);

$E_{тр}$ – енергія, витрачена на тертя без мастильного матеріалу й адгезійне зчеплення;

E_p – енергія, пов'язана з введенням МОР при гідродробоструменевої обробки, витрачена на руйнування рідинної плівки під час входження кульки і на подолання зчеплення з нею при її відриві;

$E_{хв}$ – хвильова енергія, що поширюється у глибину металу.

Рівняння балансу енергії показує, що під час гідродробоструменевої обробки порівняно з дробоструминною додатково витрачається енергія E_p на подолання рідинної плівки, але водночас різко зменшується така складова, як $E_{тр}$.

Очевидно, що $E_{тр} > E_p$.

У результаті, не враховуючи $E_{хв}$ оскільки воно має мале значення, отримуємо:

$$E_{пл.д} = E_y - (E_{тр} + E_p).$$

Корисна енергія $E_{пл.д}$ зміцнення обробкою дробом характеризується кінцевим ефектом – створенням лунки; за відносної E_y ця енергія під час гідроструменевої обробки більша, ніж при дробоструменевої обробці:

$$E_{пл.д.г} > E_{пл.д.с}.$$

Коефіцієнт корисної дії удару = $E_{пл.д}/E$, відповідно, $\eta_{у.с}$, $\eta_{у.г}$, тобто ККД удару під час гідродробоструменевої обробки буде більший, ніж під час дробоструминної обробки.

Зміцнення сухим дробом здійснюються на дробоструменевих та дробометних установках. У дробоструминних установках дробу надається кінетична енергія у дробоструминному соплі стисненим повітрям, що подається через повітряну форсунку, в дробометних установках – у відцентровому дробометному колесі.

Головні ознаки зміцнення сухим дробом: простота конструкції установки, бо використовується централізована система подачі стиснутого повітря, яка є на підприємствах; концентрований струмінь дробу, який має можливість обробити важкодоступні місця деталей; можливість отримання високих швидкостей польоту дробу; можливість сепарації дробу струменем повітря; не має потреби промивання деталі після зміцнення.

Недоліки зміцнення сухим дробом: жорсткий удар дробинки по деталі при великих швидкостях польоту викликає високі локальні температури, наприклад, при зміцненні сталі миттєва температура може перевищувати 650 °С.

Залишкові напруження тиску мають максимальне значення на якійсь відстані від поверхні.

При дробоструменевому зміцненні шліфованих поверхонь, цементованих і загартованих деталей шорсткість підвищується у середньому на 1...2 мкм; при зміцненні деталей з покращеної сталі, з титанових та алюмінієвих сплавів шорсткість підвищується на 2,5...5 мкм. У багатьох випадках відбувається активно перенесення частинок дробу на поверхню деталей, що зменшує їх корозійну стійкість, особливо деталей, виконаних з матеріалу на незалізній основі.

Режим зміцнення характеризується значною нестабільністю, що пояснюється таким чином: великим допуском на діаметр дробу (наприклад, для діаметра дробу 0,5...0,8 мм чи 0,8...1 мм допуск становить близько 1/3 діаметра дробинки); підвищеним зношуванням дробу внаслідок сухого тертя, яке призводить до помітного зменшення дробу вже протягом однієї зміни безперервної роботи установки (для чавунного дробу – більшою мірою, для сталевого – меншою), що знижує стабільність процесу, бо енергія удару пропорційна діаметру дробу у третьому ступені. Крім цього, установки для дробоструминної обробки мають ряд експлуатаційних недоліків, пов'язаних із швидким зношуванням сопла та інших елементів.

Головні переваги гідродробоструминного зміцнення в порівнянні з дробоструминним: залишкові напруження тільки стискувальні і, як правило, мають максимальні значення на деякій глибині. Порівняно низький параметр шорсткості поверхні залишається ($R_a = 1,25...0,16$ мм), високий ($R_a = 10...1,5$ мкм) може зменшуватись до $R_a = 2,5...1,25$ мкм.

Мікрогеометрія поліпшується, бо радіуси заокруглення заглибин (лунок від дробу) і виступів, що визначають опорну поверхню, збільшуються.

Виключене перенесення на оброблювану поверхню матеріалу робочих тіл у зв'язку зі зниженням температури у зоні контакту та ізоляцією поверхневого шару деталі рідинною плівкою.

Але установки гідродробоструминного зміцнення складні, дорого коштують та потребують більш високих витрат під час експлуатації.

Вибір параметрів обробки дробом. Основні параметри процесу обробки дробом:

- робоче середовище (матеріал, характер та розмір робочих тіл, склад рідини);
- відстань від зрізу сопла до зміцнюваної поверхні, кут і діаметр факела дробу;
- швидкість руху робочого середовища;
- тривалість процесу.

Склад робочого середовища вибирають у відповідності з обраним методом обробки. Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні регулюють у межах можливостей установки, залежно від матеріалу оброблюваної деталі і заданого ступеня зміцнення. Із зменшенням цієї відстані підвищується інтенсивність зміцнення, але одночасно зменшуються діаметр факела дробу та площа оброблюваної поверхні.

Час зміцнення обчислюють за формулою

$$t = \frac{7,6 \cdot l \cdot d \cdot \sqrt{H}}{K_i \cdot V \cdot m \cdot \sin^2 g},$$

де l – відстань від сопла до оброблюваної поверхні;

d – діаметр дробу;

H – твердість оброблюваного матеріалу;

K_i – коефіцієнт, що враховує кількість ударів, які необхідні для заданого ступеня зміцнення ($i \geq 8$);

V – швидкість дробу;

m – маса дробу, що викидається за одиницю часу;

g – кут між струменем дробу та оброблюваною поверхнею.

Під час гідродробоударного зміцнення як МОР рекомендують використовувати мінеральне трансформаторне масло, яке нетоксичне, пожежонебезпечне, має гарну текучість, незначно впливає на режим у разі зміни температури, порівняно дешеве, воно може застосовуватись збезводненим. Крім нього, можна також застосувати масло «Індустріальне-12», приладове МВП тощо.

Гідродробоударне зміцнення здійснюється на гідравлічних дробоударних пристроях ежекторного типу з одно- або багатоканальними форсунками.

Для будь-яких способів дробоструминної обробки на ступінь зміцнення впливають швидкість дробу під час контакту з оброблюваною поверхнею; розмір, якість та витрати дробу; тривалість обробки; напрям струму дробу – кут атаки; щільність, з якою дріб покриває оброблювану ділянку поверхні; відстань оброблюваної поверхні від місця вильоту дробу і фізико-механічні властивості металу оброблюваної деталі. Шорсткість поверхні до обробки дробом майже не впливає на ефективність зміцнення і зазвичай не контролюється. Від перерахованих технологічних факторів залежать шорсткість поверхні, глибина зміцнення і залишкові напруги.

Дробоструминне зміцнення дуже зручне для обробки деталей і інструмента складної конфігурації: розміри деталей не змінюються і залишаються у межах поля допуску.

Під час пневмодробоструминної обробки шорсткість поверхні залежить від режимів обробки, якості дробу і вихідного стану поверхні. Топографія зміцненої поверхні характеризується сполученням слідів механічної обробки і численних дрібних лунок, які утворюються від ударів дробинок, а також окремих рисок, викликаних впливом на поверхню розколотих дробинок з гострими краями. При цьому профіль мікронерівностей, що утворюються, стає більш пологим з відносно великим радіусом виступів і западин, він краще утримує масло, однак наявні риси можуть слугувати концентраторами напруг.

Погіршення мікрогеометрії через утворення лунок найбільш помітне за низької вихідної шорсткості, $R_a = 0,16...0,30$ мкм, і часі наклепу елемента поверхні 1...2 хв. У разі більш тривалого пневмодробоструминного деформування шорсткість поверхні дещо зменшується, але не досягає вихідного значення. За підвищеної вихідної шорсткості ($R_a = 0,42...0,85$) обробка дробом дещо її знижує. Дробометна обробка, зазвичай підвищує шорсткість поверхні і стає помітним її окислення, викликане розігрівом.

Значне погіршення мікрогеометрії поверхні викликає дробометне зміцнення мікрокульками. Малий розмір кульок і висока швидкість їх польоту сприяють утворенню мікропрофілю поверхні з гострими виступами і западинами, які служать концентраторами напружень. Шорсткість поверхні при цьому підвищується тим більше, чим вона нижча на вихідній поверхні.

Спосіб гідродробоструменевого зміцнення дозволяє для низки сталей знизити вихідну шорсткість (табл. 2.4).

Це пояснюється використанням більш якісного деформувального тіла – полірованих, однакового діаметра куль, що летять з високою швидкістю у середовищі мінерального масла. Однак встановлено, що на пристроях гідродробоструменевого зміцнення на зразках, які мають малу шорсткість вихідної поверхні, за час зміцнення, менший від 2 хв, збільшуються мікронерівності. Це пояснюється тим, що спочатку кульки, вдаряючись об зміцнювану поверхню, накладають на неї свої розрізнені відбитки. Зі збільшенням часу зміцнення відбитки накладаються один на один, 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 початку зміцнення. Пояснюється це тим, що при перших же ударах у процесі деформації зменшується висота нерівностей, і енергія удару повністю йде на деформування, не поширюючись на глибину металу. У подальшому поява окремих лунок на зміцнюваній поверхні із вже деформованими нерівностями призводить до деякого підвищення шорсткості. Найбільш доцільний час зміцнення з метою отримання мінімальної висоти нерівностей знаходиться у межах 3...6 хв. Подальше зміцнення не знижує висоти нерівностей.

Таблиця 2.4

Зміна шорсткості під час дробоударної обробки

Матеріал	Твердість, HRC	Вихідна шорсткість R_a , мкм	Шорсткість після обробки R_a , мкм	
			Пневмодробоструминна обробка	Гідродробоструминна обробка
BT3-1	27...36	0,32...0,16	2,5...1,25	0,63...0,16
18X2H4BA	38...40	0,63...0,32	5...2,5	1,25...0,63
12X2H4A цементована	60...62	1,25...0,63	2,5...1,25	1,25...0,63
60C2Г	42...44	2,5...1,25	10...2,5	2,5...0,63
Д16Т	–	5...1,25	10...2,5	2,5...1,25
20ХН3А цементована	58...60	5...2,5	5...2,5	2,5...1,25

Усі способи дробоструминного зміцнення за оптимальними режимами підвищують мікротвердість поверхні й утворюють у поверхневому шарі стискувальні залишкові напруження. Так, під час обробки загартованої до HRC 50...51 сталі 35X2МФА-Ш встановлено значний вплив способів дробоударної обробки на фізико-механічні характеристики поверхні та поверхневих шарів.

Якщо вихідна шорсткість поверхні шліфованих зразків $R_a = 0,72$ мкм, то після дробометної і гідродробоударної обробки вона становить

0,16...2,5 мкм. Обробка поверхні такими способами викликає майже однаковий приріст поверхневої твердості й глибини зміцненого шару.

Після шліфування у поверхневому шарі спостерігаються розтягувальні залишкові напруження, максимальна величина яких сягає 320 МПа і перебуває на глибині залягання 0,05 мм.

Дробометна і гідродробоударна обробки утворюють у поверхневому шарі близькі за величиною і глибиною залягання стискувальних залишкових напружень, однак треба зазначити, що під час гідродробоударної обробки утворюються більш високі значення залишкових напружень на поверхні.

Максимальна величина ступеня зміцнення визначається переважно не стільки способом дробоструминного зміцнення, скільки якість матеріалу. Наприклад, зміцнення цементованої загартованої сталі 13ХЕНВМ2Ф-Ш з однаковою кінетичною енергією дробу $E = 40$ кДж/м утворює в цементованій шарі за всіх способів дробоударної обробки високий рівень залишкових стискувальних напружень. Їх максимальна величина майже не залежить від способу зміцнення і становить приблизно 1000 МПа. Спосіб зміцнення впливає переважно на глибину поширення максимальних залишкових напружень і їх величину біля поверхні. Вирішальний вплив на поширення залишкових напружень, а також глибину і ступінь зміцнення мають діаметр дробу і швидкість його польоту.

Найбільшу твердість поверхні та майже граничну глибину зміцнення забезпечує обробка дробом поверхні протягом 4 хв за $E = 80$ кДж/м². Більш тривалий час пластичного деформування викликає незначне збільшення глибини зміцненого шару. Деформаційне зміцнення супроводжується також зміною всього комплексу механічних якостей, підвищенням характеристик міцності за деякого зниження показників пластичності.

Утворення дробоструминним методом стискувальних залишкових напружень можливе і в твердих сплавах. Залишкові напруження першого роду, що виникають у результаті обробки твердих сплавів поверхневим пластичним деформуванням, впливають на їх міцність. Дослідження на контрольних пластинах із сплаву Т15К6 показали, що у результаті обробки дробом в поверхневому шарі твердого сплаву з'являються значні стискувальні залишкові напруження, які поширюються на глибину близько 0,1 мм.

У результаті зміцнення поверхневого шару і поліпшення форми мікрорельєфу після всіх способів дробоструминної обробки і особливо після гідродробоструминної, дещо знижується інтенсивність зношування деталей машин. Усі способи дробометної обробки поліпшують характеристики міцності деталей і збільшують довговічність їх роботи в

експлуатації. Так, зубчасті колеса, виготовлені із сталі марки 15ХГН2ТА, після зміцнення дробом підвищують свою довговічність на 15...20%.

Дробоструминна обробка знижує експлуатаційні поломки виробів з твердого сплаву. Так, у зміцнених різців в 1,8...2 разу зменшилась кількість руйнувань і дрібних викришувань. При цьому стійкість збільшилась у 1,1...1,8 разу. Дробоструминну обробку можна рекомендувати тільки для нового інструмента, тобто застосувати її один раз, наприклад для підвищення довговічності таких складних за формою деталей, як спіральні пружини. Середня міцність втоми пружин, що пройшли дробоструменевою обробку з наступним відпуском, збільшується в чотири рази.

Дробоструминну обробку застосовують для багаторазового підвищення довговічності й надійності зварних вузлів різних машин, особливо тих, що працюють в умовах вібрації. Таке зміцнення рекомендують також для деталей з кольорових сплавів. Воно упереджує їх розтріскування, що в десятки разів підвищує довговічність їх роботи у корозійних середовищах. Перспективним є поєднання дробоструминної обробки з іншими. Так, наприклад за рахунок хіміко-термічної і дробоструминної обробки колінчастих валів швидкісних двигунів межа їх витривалості збільшується на 60 %.

2.1.6. Електро механічна пластична обробка

Процес електро механічної обробки металу може бути реалізований у двох основних видах – електро механічним згладжуванням (ЕМЗ) та електро механічною висадкою (ЕМВ).

Суть електро механічної пластичної обробки (змащення) (ЕМО) полягає у тому, що на оброблювану деформувальним інструментом поверхню одночасно впливають тиск інструмента і тепло, що виникає у результаті проходження електричного струму між інструментом та деталлю. Це викликає зміцнення за рахунок поліпшення як фізико-механічних властивостей поверхневого шару, так і параметрів мікрорельєфу самої поверхні, при цьому інструментом може слугувати нерухомо закріплена пластина з тороїдальною поверхнею, або ролик, що обертається.

Одним з найбільш поширених способів електро механічного зміцнення є обробка роликками, що обертаються, бо стійкість їх набагато вища, ніж пласких пластин. Деформувальний ролик виготовляють з швидкорізальної сталі Р6М6 твердістю HRC 62...64 і шорсткістю $R_a = 0,1...0,4$ мкм. Електро механічне пластичне зміцнення циліндричних деталей здійснюється на токарних верстатах, силовим пристроєм при цьому

виступає зварний трансформатор змінного струму ТСД-1000, який дозволяє плавно змінювати силу струму від 0 до 800 А за робочого навантаження 1,5...2 В. Сила струму і вторинна напруга регулюються в залежності від площі контакту, вихідної шорсткості та вимог до якості поверхневого шару. Оброблювана деталь обертається з швидкістю Y , м/с, а інструмент здійснює поступальний рух уздовж оброблюваної деталі (S – подача ролика, мм/об, i – кількість ходів). Тиск згладжування P , Н забезпечується маховичком поперечного супорту верстата.

Тепловиділення за цього виду обробки відбувається внаслідок тертя між інструментом та оброблюваною деталлю, а також проходження через неї електричного струму і деформації металу у поверхневому шарі. У результаті такого комбінованого впливу структура в поверхневому шарі являє собою подрібнений мартенсит. За рахунок виділення карбідної фази поверхневий шар на глибині 0,2...0,25 мм дещо знеуглецьовується. Кількість карбідних включень і їх дисперсність із збільшенням зусилля обкатки 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, утворення дислокаційних бар'єрів, створення вторинних фаз, що викликає подрібнення мартенситних голок у загартованій структурі.

Доцільним є зміцнення на глибину не більше 0,75...1,0 мм, бо деформувальний вплив інструмента на більш глибокі шари не викликає змін у структурі металу і не відрізняється від звичайного загартування. Під час обробки обертним роликком глибина зміцнення поверхневого шару з похибкою 10...15 % дорівнює

$$h = \frac{K \cdot B \cdot I \cdot U}{V},$$

де B – ширина контакту ролика з деталлю, мм;

K – коефіцієнт, що визначає частину зміцнення, зумовленого теплотою, що виділяється під час проходження струму (для умов обробки площин з глибиною зміцнення 0,4...1,6 мм коефіцієнт $K = 3,1 \cdot 10^{-6}$);

U – напруга, В.

Наприклад, для сталі 45 залежність глибин обробки наведено в табл. 2.5.

Зміна твердості за глибиною поверхневого шару під час електромеханічної обробки залежить від режимів обробки, тиску, вмісту вуглецю у сталі. Так, зміцнення сталей 45, У10 за $I = 600$ А; $Y = 0,05$ м/с; $S = 0,2$ мм/об; $P = 0,7$ кН дозволяє отримати відносне збільшення твердості сталі 45 в 2,7 разу, а У10 – у 3,8 разу, тобто зміцнення сталей з великим вмістом вуглецю більш ефективне.

Таблиця 2.5

Вплив параметрів режимів обробки на змінюваність поверхневого шару

Основні параметри режиму обробки				Глибина зміщеного шару h , мм
I , А	U , В	V , м/с	P , МПа	
325	4,5	0,012	0,6	0,43
330	5,0	0,012	0,6	0,52
410	5,4	0,09	1,6	0,72
440	6,0	0,012	0,6	0,74
520	6,2	0,009	1,6	1,04

У результаті електромеханічного пластичного зміцнення зубців зубчастих коліс із сталі 40Х з вихідною шорсткістю $R_z = 16...30$ мкм на режимах в інтервалах: $I = 850...1650$ А; $P = 1,6$ кН; $Y = 0,003...0,02$ м/с; $S = 1,1...1,3$ мм/дв.хід показали, що найбільша твердість HV 800...840 та найменша шорсткість $R_a = 0,63...0,32$ мкм, отримані для режимів обробки: $I = 1650$ А; $Y = 0,012$ м/с; $P = 3,6$ кН; $S = 0,7$ мм/дв. хід, при цьому товщина зубців змінилась не більше ніж 0,04 мм.

Цей вид обробки застосовується також для зміцнення напрямних верстатів, які заздалегідь оброблені до $R_z = 20...6,3$ мкм.

Обробку рекомендується проводити на поздовжньо-стругальному верстаті з використанням твердосплавного деформувального ролика. Сполучення теплового впливу з поверхневим пластичним деформуванням знижує шорсткість до $R_a = 0,63...0,16$ мкм, збільшує радіуси її заокруглення до 800...1000 мкм, підвищує фізико-механічні властивості поверхневого шару. Зносостійкість направляючих станин підвищується у 1,7...2,5 разу.

Розглянемо кілька способів електромеханічної обробки – зміцнення деталей за допомогою електромеханічної обробки із застосуванням легуючих роликів.

Під час електромеханічного осаджування металу здійснюється осаджування поверхневого шару оброблюваних циліндричних деталей на величину до 0,5 мм діаметра. Електромеханічне згладжування дозволяє знизити шорсткість поверхні до $R_a = 0,16...0,32$ мкм. Опорна поверхня, створювана під час електромеханічного згладжування, на 35...45 % більша за опорну поверхню, створювану точінням та шліфуванням. Оскільки у процесі електромеханічного згладжування поряд із зменшенням шорсткості оброблюваної поверхні відбувається її зміцнення за рахунок високих швидкостей тепловідводу в глибину деталі, створюваний при цій обробці на сталевих деталях твердий, стійкий проти зношування поверхневий шар являє собою безструктурний мартенсит, який

утворюється під високим тиском. Цим методом обробки також підвищують стійкість проти зношування конструкційних, нормалізованих та поліпшених сталей у кілька разів (максимально – у 12) залежно від умов тертя пар, стійкість проти зношування сірого чавуну – у 2,5 разу. При цьому можливе підвищення меж витривалості (випробування на чистий вигин) на 30...40 %. З метою поширення технологічних можливостей електромеханічної обробки та створення на зміцнених поверхнях (зношування до 0,2 мм на діаметр) зносостійкого та корозійностійкого покриттів в Інституті надтвердих матеріалів НАН України (Київ) було розроблено технологію та установку, що забезпечують у процесі зміцнення легування поверхонь елементами, які входять до складу композиційних твердих сплавів групи КХН і ВНК.

З метою створення технологічного оснащення було проведено стійкісні випробування композиційних роликів з різних твердосплавних інструментальних матеріалів, які використовують під час електромеханічної обробки.

Рекомендовані такі композиційні твердосплавні матеріали: для виготовлення роликів – КНТ-16+TiN, ВКС+TiC, КНТ-16+TiC+TiN+TiNC, КНТ-16; для легуючих роликів – КХН-15Р, КХН-15ПР, ВНК20-Г2, ВНК-20.

Випробування на зношування зміцнених зразків проводилися на машині тертя 2070 СМТ-1 в умовах використання індустріального масла, а саме І-50А. Аналіз випробувань на зносостійкість зразків конструкційних та інструментальних сталей (СТ3, 40Х, 45, У8), зміцнених за розробленою технологією, показав, що у другому випадку сумарне зношування менше у 2,0...2,5 разу, а коефіцієнт тертя $F_{уст}$ у 1,5...2,0 рази більше, ніж під час електромеханічної обробки.

Установка, яка застосовувалася під час обробки, являє собою токарний верстат, у патроні якого закріплена зміцнювана деталь. З двох боків до деталі підведені легованими та вигладжівними роликами. За рахунок обертання деталі ці ролики зміцнюють всю поверхню деталі, при цьому виділяється тепло внаслідок тертя між інструментом і оброблюваною деталлю та проходження через неї електричного струму, який подається на інструмент із джерела струму по силових шинах, і деформації металу в поверхневому шарі. Для зменшення температури у зоні обробки деталі існує система охолодження.

Таким чином, суть комбінованої електромеханічної обробки полягає у тому, що за електромеханічного згладжування у робочу зону протилежно вигладжуваному інструменту (ролику, пластині) вводиться легований ролик, що забезпечує у процесі зміцнення легування оброблюваної поверхні елементами, які входять до її складу. Комбінована

електромеханічна обробка конструкційних та інструментальних матеріалів забезпечує можливість цілеспрямованого отримання наперед заданих якісних та кількісних характеристик поверхневого шару деталі.

Розроблюється ще кілька методів обробки. Один з них – електромеханічна обробка поверхонь деталей металевими щітками. Багато способів зміцнення деталей потребують ретельної підготовки до оброблюваних поверхонь – знищення бруду, оксидів, окалини тощо. Такі процеси трудомісткі, маловиробничі, в ряді випадків потрібні складні системи.

Розроблений у Львівському політехнічному інституті електромеханічний спосіб очищення та зміцнення поверхонь виробів не має вказаних недоліків, зміст його полягає в обробленні поверхонь деталей дисковою секційною щіткою в умовах підключення змінного електричного струму частотою 50 Гц (одна фаза – до інструмента, друга – до оброблюваної деталі). Конструктивна особливість щітки – чергування струмопровідних та очисних секцій.

У результаті обертання струмопровідних секцій щітки та їх контакту з оброблюваною поверхнею (рис. 2.5) створюється електрична дуга. За силою струму 30...150 А температура стовпа дуги досягає 5500...6000 К. Від теплового впливу відбуваються миттєвий розплав та часткове випаровування поверхневих продуктів корозії і прокатної окалини. У колодуговій зоні, де температура нагріву поверхні деталі значно нижча (300–800 К), відбувається розтріскування шару бруду та часткове його відокремлення від основного металу. Ізольовані від електричного струму очисні щіточні секції, довжина дротяного ворсу яких на 2...5 мм більша, ніж струмопровідних секцій, прибирають частинки окалини, іржі, бруду з поверхні деталі.

У результаті впливу на поверхневий шар деталі послідовно двох фізичних факторів (термічного та динамічного) відбувається зміцнення поверхневого шару металу. Численні удари дротяних елементів щітки у сполученні з нагрівом поверхні зумовлюють її пластичне деформування та підвищення мікротвердості.

До особливостей теплотворення та термічного процесу відносять: наявність двох основних джерел тепла (електричної дуги та дротяного ворсу); локальний нагрів, що супроводжує динамічний вплив очисних елементів; короткочасний, вимірюваний частками секунди, термічний цикл (нагрів, витримка, охолодження); висока швидкість охолодження у результаті інтенсивного відводу тепла у середині деталі та поверхневого обдуву, викликаного аеродинамічними властивостями інструмента.

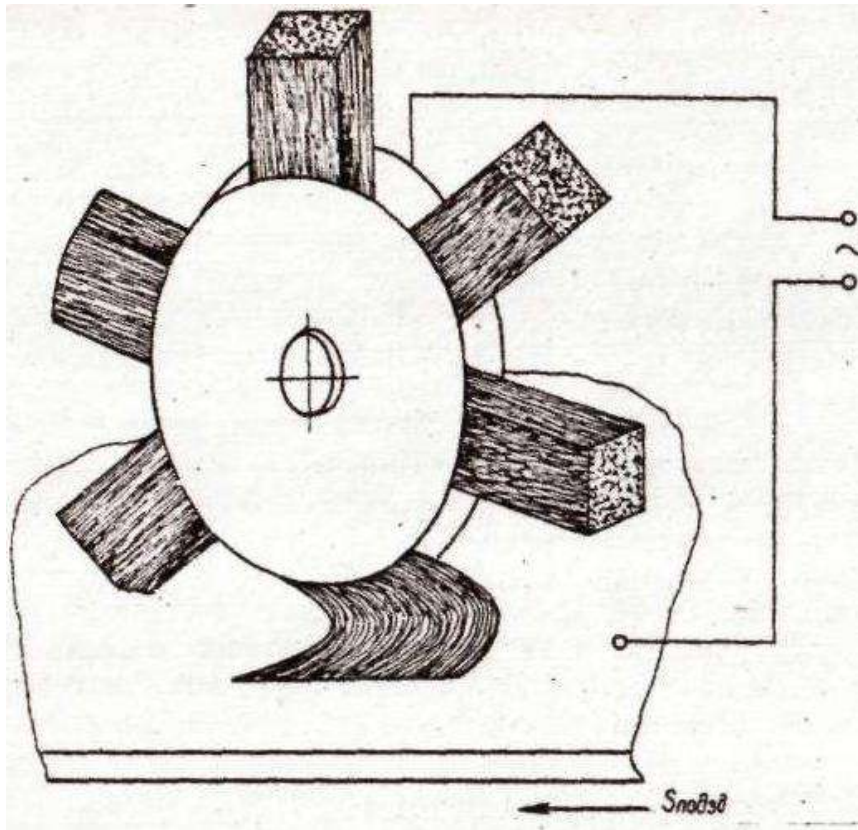


Рис. 2.5. Схема оброблення поверхні металу електромеханічним способом (металевими щітками)

Таке періодичне чергування нагріву та охолодження попереджує утворення припінання у зоні обробки, зміни мікроструктури поверхневого шару металу та його зміцнення. Поряд з цим різкий перепад температур дозволяє руйнувати твердий монолітний шар прокатної окалини.

Зміцнення поверхні металу під електромеханічної обробки щітками зумовлене подрібненням структури, частковим подрібненням зерен аустеніту під деформування, що сприяє зменшенню кількості мартенситних голок.

Якщо ми знаємо значення температурного поля і динамічного посилення, то можна прогнозувати характер структурно-фазових перетворень у поверхневому шарі матеріалу та його властивості. У результаті досліджень з використанням методу планування експерименту, проведених на досліджуваних зразках з листового прокату (сталь 20, 45, чавун СЧ-18), була отримана емпірична формула залежності температури T оброблюваної поверхні від зусилля P_y притиску щіткового ворсу, повздовжньої подачі S зразку та сили струму I :

$$T = K_0 \frac{P_y^{0,32} \cdot I^{0,85}}{S^{0,86}},$$

де K_0 – коефіцієнт, що характеризує початкове становище оброблюваної поверхні;

$$P_y = 0,063 \cdot \frac{V^{7,64} \cdot h^{1,5(1,7+\ln V)}}{Z^{0,84(7\ln V + 1 + 9\ln B)}} \cdot \frac{B^{4(0,80,3\ln V + 0,15\ln h)}}{L^{0,83(1,942,5\ln h + \ln B + 6,4\ln Z)}}$$

V – кругова швидкість обертання щітки, м/хв;

h – натяг (величина зближення дротяного ворсу з поверхнею обробки), мм;

B – ширина щіткового ворсу, мм;

Z – кількість секцій, шт.;

L – виліт проволоки.

Цей спосіб електромеханічної обробки забезпечує шорсткість оброблюваної поверхні $R_a = 1,3 \dots 0,8$ мкм. Він характеризується високою продуктивністю процесу.

Електромеханічна обробка також застосовується на кінцевих операціях обробки покриття на відновлених поверхнях для поліпшення їх якісних характеристик, для відновлення зношених поверхонь валів та осей машин з одночасним їх зміцненням.

У процесі зношену поверхню піддають електромеханічному обкочуванню фасонним твердосплавним роликком з утворенням на поверхні профільних гвинтових канавок, при цьому ролик, що видавлює метал, утворює на краях канавок гвинтові виступи і вони збільшують діаметр зношеної поверхні. Потім здійснюється електромеханічне обкочування, або електромеханічне вигладжування поверхні деформувальним циліндричним твердосплавним роликком (вигладжувателем), що не обертається, до необхідного діаметра.

За рахунок деформування виступів бокових сторін гвинтових канавок утворюються гвинтові напівзачинені канали, які впливають на зносостійкість і довговічність роботи відновлених поверхонь.

Електромеханічна обробка зношених у результаті фретинг-корозії поверхонь дозволяє не тільки відновити геометричні розміри, точність ремонтованих деталей, а й зміцнити поверхневий шар, утворити умови, які перешкоджають розвитку фретинг-корозії, що збільшує фретинг-стійкість оброблених даним способом поверхонь порівняно з обробленими звичайними способами у 1,5...2 разу. За рахунок наявності залишкового рельєфу у вигляді напівзачинених канавок знижується інтенсивність дії фретинг-корозії внаслідок виводу продуктів зношування з зони контакту двох поверхонь. Особливо ефективний залишковий рельєф за наявності в ньому мастила. Залишковий рельєф і поліпшення фізико-механічних властивостей поверхневого шару знижують ефект фретинг-корозії, дещо підвищують міцність втоми, а також зменшують концентрацію напружень від напрусування.

2.1.7. Зміцнення карбуванням

Зміцнення карбуванням застосовують для обробки великих і важких деталей і особливо галтелей великих валів. Цей процес здійснюють способом направлено ударного впливу на оброблювану поверхню за допомогою спеціального бойка.

Направлений удар бойка допомагає застосовувати карбування для зміцнення внутрішніх кутів, шпонкових канавок, шліцьових валів, галтелей, канавок, виточок, фасок отворів різних деталей складної конфігурації, що їх не можна піддати зміцненню способом обкочування або дробоструменевої обробки. Карбуванням можна зупинити розвиток тріщин втоми, а також ліквідувати експлуатаційні концентратори напружень у вигляді задирок, подряпин, корозійних раковин тощо.

Робочу частину бойка виготовляють у вигляді сфери або іншої фасонної поверхні у відповідності з формою зміцнюваної поверхні. Бойок може бути виготовлений складеним, у цьому випадку робочою частиною є куля або ролик.

Ступінь і глибину зміцнення поверхневого шару характеризують енергія удару, а також крок карбування, що визначається кількістю ударів на один лінійний міліметр обробки. Енергія удару залежить від потрібних параметрів зміцнення. На крок карбування впливають рух бойка, швидкість руху оброблюваної деталі і кількість проходів. Ці параметри треба поєднувати так, щоб забезпечити крок карбування у межах 0,1...0,2 мм для невеликих і 0,4...1,5 мм для великих деталей. Процес карбування здійснюється під час змащування зони контакту машинним маслом, наприклад, «Індустріальне-30». Під час карбування залишкові напруження можуть складати 600...800 МПа, ступінь зміцнення – 30...50 %, глибина – до 1,0...2,0 мм, довговічність деталей збільшується в 1,5 рази і більше.

Застосування карбування рекомендується для збільшення міцності втоми зубців великих шестерень. Застосування карбування для зміцнення цементованих і загартованих до твердості HRC 58...60 зубців шестерень коробки передач, наприклад, тракторів, дозволяє збільшити їх довговічність майже в шість разів. За цього карбували галтелі біля ніжки зуба за допомогою пневматичного молотка. Бойок виготовлювали із швидкорізальної сталі, і він мав твердість HRC 62...64. У процесі карбування дно галтелей осідало до 0,02...0,04 мм.

Карбування застосовують для зміцнення заглибин великомодульних зубчастих коліс тепловозів. Зубчасті колеса, відлиті зі сталі 40ХНТ після механічної обробки різанням піддають загальній термічній обробці – загартуванню при температурі 850 °С у маслі і відпуску при температурі 650 °С. Після загальної термічної обробки робоча частина зубців

загартовується з нагрівом НВЧ. Карбування їх заглибин здійснюється за кількістю ударів бойка 1200 на хвилину з подачею столу фрезерного верстата 300 мм/хв при двох проходах по радіусах і одному по дну заглибин. Зусилля пружини до удару дорівнює 400 Н. Бойок здійснює у напрямку утворення дорожки чотири удара на 1 мм довжини.

Порівняння втоми некарбованих зубчастих коліс за заглибиною і карбованих показали для останніх збільшення межі витривалості на 33 %. Твердість у результаті зміцнення карбуванням збільшується з НВ 260 до НВ 350.

Карбування від вібруючого ролика, деталей великих багатоопірних колінчастих валів зі сталі 34ХН1М, значно підвищує їх витривалість. Обкатування вібруючим роликом галтелей чавунних валів діаметром 175 мм підвищує більш як у два рази їх несучу спроможність. Встановлено, що зміцнення вібруючим роликом значно збільшує міцність втоми деталей, які мають різьбу. Пластична деформація вібруючим роликом у зоні заглибин різьби, які є концентраторами напружень, для різьб діаметром 70...215 мм і кроком 8 мм і більше, підвищує несучу спроможність різьбових деталей, що працюють при змінних навантаженнях на 80...280 %.

Для деформаційного зміцнення шліцьових валів застосовують обкатку або карбування роликами і пневматичними ударниками. Пристрій для обкатки закріплюють у різцетримачі верстата. Він має два ролики, що встановлюються самі на осі по заглибинах зміцнюваних шліців, що дозволяє обкочувати вали різних діаметрів. Пружини пристрою, розраховані на граничну силу 30 кН, знижують шорсткість контакту роликів з деталлю.

Для карбування шліцьових валів використовують пристрій з дворוליковою голівкою. Карбування, як і обкатка роликами шліцьових валів виконується на токарному верстаті при нерухомій деталі і поздовжньому переміщенні супорта. Профіль галтелей шліців у результаті деформації дещо викривлений. При обкатці зусиллям 18 кН шліців півосей екскаваторів, виготовлених з покращеної сталі 34ХН1М, загартованих нагрівом НВЧ, деформація незначна і перебуває у межах, встановлених розмірами креслення. Оптимальним є карбування з енергією удару 21 Дж і подачею, що забезпечує від 10 до 20 ударів на 1 мм довжини зміцнюваної поверхні. Після зміцнення основ поверхнево незагартованих шліців карбуванням або обкаткою роликами довговічність збільшується від 52000 до 315000 циклів.

Поверхневе загартування з нагрівом НВЧ застосовують переважно для підвищення контактної міцності шліців, сприяє збільшенню їх міцності згинання. Але шліци після поверхневого загартування нерівномічні по довжині: краї загартованої ділянки як біля торця вала, так і поблизу межі

загартування послаблені. Після карбування довговічність шліців на межі загартування підвищується в 2...3 рази.

Карбування значно підвищує міцність втоми зварних з'єднань. Воно здійснюється за допомогою пневматичних молотків з бойками у вигляді пучка сталевих дротів діаметром 2...3 мм, при цьому глибина загартованого шару досягає 0,5 мм. Межа витривалості зварних конструкцій у результаті карбування, здійснюваного в зоні зварювання, підвищується на 25...30 %. Зміцнення карбуванням суттєво збільшує міцність зварних з'єднань високоміцного чавуну, при цьому поверхнева твердість різних зон з'єднань збільшується неоднаково – основного металу на 7...19 % (з НВ 420 до 470), наплавки (електроди П4–4) – на 60 % (з НВ 200 до 320) і зони заповнення (електроди ІОНІ–13/45) – на 70...130 %. Під час карбування здійснюються згладжування піків твердості і більш рівномірний розподіл твердості між складовими зварного з'єднання. Зміцнення зони зварного шва збільшує межу витривалості в 2,5 разу, що складає майже 75 % межі витривалості основного матеріалу.

Карбування вирізняється динамічним характером навантаження з високою щільністю питомих витрат енергії. Таке навантаження може викликати значні деформації оброблюваних деталей. Ця особливість карбування знайшла своє застосування для утворення нових поверхонь способом нанесення рифлень, видавлюваних малих галтелей. Метод утворення рифлень поверхні призначений для збільшення опору зсуву контактуючих деталей одна відносно одної з метою підвищення жорсткості збірних конструкцій станин, рам та ін. При карбуванні контактуючих поверхонь удари бойком здійснюються таким чином, що на оброблюваній поверхні утворюються рифлення у вигляді борозенок. У результаті зміцнення у поверхневих шарах контактуючих деталей підвищується твердість і утворюються сприятливі стискувальні залишкові напруження, що нейтралізує шкідливий вплив контактної корозії і концентрації напружень на опір втоми контактуючих деталей.

Видавлювання галтелей радіусами 1...3 мм на глибину $h=0,2R$ потребує енергії бойка, що перевищує 30 Дж. У результаті зміцнення галтелей колінчастих валів межа витривалості підвищується з 149 до 213 МПа зі збільшенням h з 0,3 до 1,2 мм. Цей спосіб зміцнення дозволяє зменшити розміри галтельних ділянок, що дає змогу знизити питоме навантаження на підшипники і підвищити несучу здатність валів. Формування галтелей пластичним видавлюванням призводить до значного підвищення міцності втоми вала навіть за відносно малого вдавлення в шийку, а із збільшенням глибини вдавлення до $h = 1,2$ мм межа витривалості підвищується майже у три рази. Рекомендований радіус загартування галтелі $R = (0,01-0,50)d$, де d – діаметр вала.

2.2. Зміцнення металевих поверхонь термічними та кріогенними методами

2.2.1. Термічні методи зміцнення

До термічних методів зміцнення належать: відпал, нормалізація, загартування, відпуск, поліпшення, старіння, а також кріогенна обробка (табл. 2.6).

Відпал – нагрів деталі до заданої температури, витримку за цієї температурою і поступовим повільним охолодженням. Розрізняють такі види відпалу: рекристалізаційний, повний, неповний; відпал на зернистий перліт (сфероїдизація); ізотермічний; низькотемпературний, дифузійний (гомогенізація). Відпал поліпшує механічні властивості і вирівнює хімічний склад сталі, зменшує залишкові деформації, здійснює підготовку структури сталі для наступної термічної обробки і поліпшує оброблюваність її на верстатах.

Процес нагріву сталі на 30...50 °С вище $A_{с3}$, витримку при цій температурі і наступне охолодження на спокійному повітрі називають нормалізацією. Цей процес використовують для зняття внутрішніх напружень і поліпшення оброблюваності сталі.

Операцію, при якій доевтектоїдну сталь нагрівають на 20...30 °С вище $A_{с3}$, а евтектоїдну і заевтектоїдну сталі – на 20...30 °С вище $A_{с1}$ і після витримки за цієї температури швидко охолоджують у воді, маслі або на повітрі в залежності від складу сталі, називають загартуванням. Розрізняють такі види загартування: повне, неповне, з безперервним охолодженням, ізотермічне, ступінчасте, з охолодженням, у двох рідких середовищах, з обмеженим перебуванням в охолоджуючому середовищі, з самовідпуском, наскрізне, ненаскрізне, звичайне, чисте, світле, з обробкою холодом.

У результаті загартування отримують нерівномірні структури, бо швидке охолодження перешкоджає фазовим перетворенням. Після загартування сталь стає крихкою і твердою. Структура загартованої сталі складається з мартенситу, нерозчинених карбідів і залишкового аустеніту. Заевтектоїдну сталь не потрібно нагрівати до загартування вище A_0 , бо за такої температури відбувається перегрів і знижується якість технологічної оснастки. Вибір способу загартування залежить від якості сталі, необхідних властивостей і складності виробів.

Таблиця 2.6

Загальна характеристика основних процесів термічної обробки сталі

Термічна обробка	Умови нагріву	Охолодження	Призначення
Відпал першого роду			
Відпал гомогенізаційний ¹	На 150...300 °С вище точки А _{с3} , частіше 1100	Повільне (з піччю)	Для крупних фасонних відливок і зливок з легованої сталі з метою отримання однорідної (гомогенної) структури способом усунення (послаблення) дендритної ліквідації. Для зменшення можливості утворення флокенів, шиферності, карбідної ліквідації та інших дефектів після обробки під тиском і покращення механічних властивостей фасонних відливок
Відпал рекристалізаційний ²	Вище температури початку рекристалізації. Частіше 660...710 °С, витримка 3...6 год (осадка до 20 т)	Повільне до 550 °С (під ковпаком або муфелем)	Після холодної обробки під тиском (калібровка, прокатка, витяжка, штампування, волочіння тощо) як міжопераційна обробка для зменшення твердості і збільшення пластичності (зняття наклепу)
Відпал, що зменшує напруження	200...700 °С	Повільне	Для зняття залишкових напружень після лиття, зварювання, пластичної деформації або механічної обробки

¹ При гомогенізації утворюється велике зерно. Подрібнюють зерно наступним прокочуванням (ковкою) і термічною обробкою. Тривалість гомогенізації 80–100 год і більше. Замість відпалу зливок можна застосовувати гомогенізацію деформованої заготовки, збільшивши час нагріву перед останньою межею.

² Останній час після протягування (калібрування) сортового металу, а також для жерсті широко застосовують рекристалізаційний відпал з індукційним нагріванням.

Відпал другого роду			
Відпал повний ³	На 150...300 °С вище точки А _{с3}	Повільне до 500...550 °С, щоб забезпечити розпад аустеніту з невеликим переохолодженням. Швидкість охолодження в залежності від складу сталі, величини садки, форми і розміру ковки 15...150 °С – 1 г.	Для доевтектоїдних сталей з метою зменшення твердості, поліпшення оброблюваності зняття внутрішніх напружень, усунення або зменшення структурної неоднорідності, подрібнення зерен, підготовки структури сталі до наступної обробки
Відпал ізотермічний	На 150...300 °С вище точки А _{с3} (для доевтектоїдної сталі) або А _{с1} (для заевтектоїдної сталі)	Прискорене до температури найменшої стійкості аустеніту в перлітній області (частіше 650...680 °С), витримка при даній температурі для повного розпаду аустеніту і наступне відносно прискорене охолодження	Для прискорення відпалу невеликих осадок прокату або поковок з легованої сталі
Відпал неповний	В інтервалі температур А _{с1} і А _{с3}	Повільне до 500...650 °С	Для зниження твердості, поліпшення оброблюваності, зняття внутрішніх напружень
Відпал сфероїдизуючий (для сфероїдизації цементиту)	Деяко вище температури А _{с1} ⁴	а) 30...40 °С – 1 год до 600 °С і потім на повітрі; б) 20...30 °С – 1 год до 680 °С витримка для вирівнювання температури осадки та потім	Для інструментальних сталей з метою зниження твердості, поліпшення оброблення різанням, підготовки структури та остаточної термічної обробки і усунення залишкових напружень, а також для низько- та середньовуглецевих сталей (листи, прутки)

³ Застосування відпалу доцільне у разі, коли потрібна фазова рекристалізація для подрібнення зерна й усунення неоднорідності мікроструктури, що виникає у сталі після прокочування (ковки). Якщо необхідне лише зниження твердості, то рекомендується високий відпуск при 660–700 °С. Тривалість високого відпуску – 0,55–0,65 год на 1 т осадки.

⁴ Сталі, що мають близькі значення критичних точок і стійкість переохолодженого аустеніту для відпалу, об'єднують в одну групу. Їх піддають відпалу одночасно однією осадкою у печі.

		зниження температури до 600 30...40 °С – 1 год до 600 °С з тієї ж швидкістю, подальше охолодження на повітрі	перед холодним штампуванням або волочінням для підвищення пластичності.
Нормалізація			
Нормалізація (відпал нормалізаційний) ⁵	На 50...60 °С вище точки A_{c3} для евтектоїдної або A_{cm} для заевтектоїдної сталі	На спокійному повітрі	Для отримання дрібного зерна, рівномірного розподілу структурних складових, поліпшення оброблення низьковуглецевої сталі, усунення карбідної сітки у заевтектоїдній сталі перед сфероїдизацією, поліпшення механічних властивостей, зниження порогу холодноламкості
Загартування			
Загартування безперервне (в одному охолоджувачі)	На 30...50 °С вище точки A_{c3} для сталі доевтектоїдної або A_{c1} для заевтектоїдної сталі, або температури розчинення залишкових фаз у сплавах	Частіше швидке охолодження (вода, масло та інші середовища) для переохолодження аустеніту до мартенситної точки M_H . Швидкість охолодження повинна бути вище критичної	У сполученні з відпуском – для отримання високої твердості, зносостійкості, а також для отримання високих механічних властивостей.
Загартування переривисте (у двох	Те саме	Спочатку швидке охолодження у воді до температури дещо вище M_H з	Для інструмента з інструментальної сталі. Повільне охолодження в області температур утворення

⁵ Нормалізація збільшує вартість процесу обробки, і тому треба застосовувати всі можливі засоби на попередніх стадіях металургійної переробки, аби запобігти збільшенню зерна під час попередніх нагрівів і утворенню цементитної (карбідної) сітки у заевтектоїдній сталі. Для легованих сталей охолодження на повітрі призводить до часткового або повного загартування. Тому після їх нормалізації здійснюють високий відпуск, особливо, коли вироби мають невеликі розміри.

середовищах)		наступним більш повільним охолодженням у маслі. Витримка у воді протягом 1 с на кожні 5...6 мм діаметра (товщини)	мартенситу сприяє зменшенню залишкових напружень і деформацій (жолоблення)
Ступеневе загартування	Те саме	У розплавлених солях, що мають температуру дещо вище точки M_N . Витримка у розплавлених солях повинна забезпечити вирівнювання температури по перетину виробів, але не викликати розпад аустеніту. Остаточне охолодження – на повітрі або в іншому середовищі для загартування	Для загартування мілкового інструмента з вуглецевої сталі (У8, У10, У12, У13), більш великого з легованої сталі (Х, 9ХВГ, ХВГ, 9ХС тощо) і швидкорізальної сталі (Р18, Р12, Р9 тощо). Для зменшення напружень, деформацій (жолоблення) і попередження утворення тріщин
Ізотермічне загартування	Те саме	В розплавлених солях, що мають температуру дещо вище точки M_N (250...400 °С). Витримка у солях повинна забезпечити найбільш повний розпад аустеніту, частіше протягом 20...40 хв. Остаточне охолодження на повітрі	Поряд з мінімальними деформаціями для деяких конструкційних сталей (30ХГС, 30ХГСН2А, 30ХГСНМА тощо), для високої міцності, підвищення опору відриву та роботи розповсюдження тріщин. Під час ізотермічного загартування інструментальних сталей (6ХС, 5ХВС2, 9ХС, ХВГ тощо) твердість HRC 40...50 для підвищення пластичності, межі витривалості та опору зношування
Загартування самовідпуском	з На 30...50 °С вище точки $A_{с3}$ для сталі доевтектоїдної або точки $A_{с1}$ для заевтектоїдної сталі, або температури розчинення залишкових фаз у	У воді або маслі протягом часу, достатнього для прожарювання виробів на визначену глибину з наступним повільним охолодженням на повітрі для відпуску внаслідок вирівнювання температури по розтину за рахунок теплоти, що збереглась у внутрішніх шарах	Для місцевого загартування виробів, що мають нескладну конфігурацію, і при індукційному поверхневому загартуванні

	сплавах	виробів	
Загартування з обробкою холодом	Те саме	Загартування, що полягає в продовженні охолодження до температури M_H	Для підвищення твердості та стабільності розмірів. Рекомендують для сталей, в яких точка M_K лежить в області від'ємних температур
Відпуск			
Низький відпуск	150...250 °C	Повільне або прискорене охолодження	Для зниження внутрішніх напружень; збереження високої твердості і зносостійкості при підвищенні опору крихкому руйнуванню. Для різального та вимірального інструмента, після поверхневого індукційного загартування, після загартування нецементованих виробів тощо
Середній відпуск	350...500 °C	Те саме	Для пружин та ресор. Забезпечує високу межу пружності
Високий відпуск	500...680 °C	Повільне або швидке (масло, вода) для сталей схильних до зворотної відпускнуої крихкості	_____

Відпуск – процес нагріву і витримки загартованої сталі за температурою на 20...30 °С нижче критичної точки. Під час відпуску здійснюється перетворення мартенситу і залишкового аустеніту, у результаті чого зменшуються внутрішні напруження і крихкість, підвищуються в'язкість і пластичність сталі. У залежності від потрібних температур відпуск проводять у масляних або селітрових ваннах, у печах з примусовою циркуляцією повітря, а також у ваннах з розплавленим щолоком (світлий відпуск). Відпуск необхідно застосовувати до всіх загартованих деталей, крім тих, що пройшли ізотермічне загартування. Відпуск технологічної оснастки з вуглецевої та легованої сталей треба здійснювати переважно у рідких середовищах, бажано в розплавлених солях. Для забезпечення якісного відпуску великогабаритного інструмента складної форми (фрези, довб'яки, шевери та ін.) більш раціонально здійснювати уповільнений нагрів у печах з перемішуваною атмосферою або в атмосфері пари.

Поліпшення – процес, складовими частинами якого є загартування з наступним високим відпуском при 500...700 °С. Сталі поліпшують для отримання необхідного сполучення міцності та в'язкості. Поліпшення вуглецевої і легованої сталей проводять до загартування і відпуску, а швидкорізальної сталі та їх замітники – після обробки різальної частини інструмента.

Для поліпшення і зменшення деформації за наступної термічної обробки застосовують комбіновану термічну обробку – загартування у маслі з наступним відпалом. Такій обробці піддають заготовки, які використовуються для технологічної оснастки складної конфігурації, а також різбовий інструмент для горнової термічної обробки.

Старіння – процес відпуску сталі з метастабільною структурою в інтервалом температур 120...200 °С або при нормальній температурі. В процесі старіння відбувається зміння фізичних і механічних властивостей і структура набуває більш стабільного стану. Залежно від температурних умов розрізняють природне, що відбувається за нормальної температури і штучне, що здійснюється при підвищеній температурі (як правило, не вище 200 °С), старіння. За початковою структурою розрізняють старіння загартованої (або наклепаної) сталі, яке здійснюється для стабілізації форми та розмірів деталей і старіння (дисперсне твердіння) сталі, що має у структурі пересичені або тверді розчини.

Термообробкою загартовують свердла, зенкери, різці зі швидкорізальної сталі, фрези, плашки, протяжки, калібри, шаблони, штампи для гарячої штамповки тощо.

2.2.2. Кріогенні методи зміцнення

Вплив кріогенної обробки на структурні перетворення сталей і зміни їх фізико-механічних властивостей. У структурі загартованої сталі є деяка кількість м'якого залишкового аустеніту, що зумовлено її хімічним складом і режимом термообробки. У результаті цього знижуються твердість і міцність, погіршуються теплопровідність і магнітні властивості, змінюються розміри, погіршується якість поверхні деталі. Відпуск загартованої сталі з метою ліквідації або зменшення кількості залишкового аустеніту у більшості випадків неефективний. Для цього найбільш раціонально використовувати кріогенний метод (глибоке охолодження).

У процесі кріогенної обробки забезпечуються поліпшення механічних властивостей інструментів, у тому числі інструментів зі швидкорізальних сталей (підвищення їх зносостійкості і різальних властивостей), підвищення твердості і зносостійкості контрольно-вимірвальних інструментів, штампів і прес-форм, що виготовлюються з високовуглецевих і легованих конструкційних сталей, збільшення твердості корозійностійких сталей з підвищеним вмістом вуглецю, поліпшення якості поверхонь, які полірують або доводять, так як наявність м'яких аустенітних ділянок перешкоджає отриманню однорідної дзеркальної поверхні.

Особливості кріогенної обробки сталі, які потрібно врахувати: повторне охолодження загартованої сталі не поліпшує її якості, якщо при цьому не досягаються температури більш низької, ніж під час загартування; тривалість витримки за низької температури не має впливу на результати обробки; найбільші структурні зміни під впливом кріогенних температур здійснюються у сталях зі підвищеним вмістом залишкового аустеніту (високовуглецеві і леговані сталі, причому у легованих сталях більше залишкового аустеніту, ніж у вуглецевих); закономірності змін розмірів деталей у результаті аустенітно-мартенситних перетворень необхідно визначати дослідним способом для конкретного хімічного складу сталі у залежності від режимів попередньої термообробки і конфігурації деталей; під час обробки деталей особливо складної форми з нерівномірним розподілом маси рекомендується відразу після загартування застосовувати відпуск для зняття загартованих напружень; неможна безпосередньо після загартування здійснювати охолодження нижче нуля, бо в цих випадках збільшуються напруження і небезпека утворення тріщин; кріогенна обробка приводить до збільшення об'єму структурних складових при розпаді залишкового аустеніту.

Розпад залишкового аустеніту і перетворення його в мартенсит йде у визначеному інтервалі температур (табл. 2.7). Якщо загартування

здійснювати за зниженої температури, то аустеніт малонасичений киснем, його перетворення повністю закінчується при температурі нижче нуля і таке охолодження не викликає допоміжних перетворень. Якщо загартування здійснено за підвищеної температури, то у результаті його утворюється аустеніт з високою концентрацією вуглецю і легуючих елементів. При охолодженні сталі, загартованої за підвищеної температури, нижче нуля здійснюється перетворення аустеніту в мартенсит, що наближається до температури кінця мартенситного перетворення.

Таблиця 2.7

Розпад залишкового аустеніту і перетворення його в мартенсит

Кількість вуглецю, %	Початок перетворення, M_n , °C	Початок перетворення, M_k , °C
0...0,3	350	-200
0,3...1,17	180	-140

На кількість залишкового аустеніту має вплив швидкість охолодження сталі в області температур мартенситного перетворення. Із зменшенням цієї швидкості кількість залишкового аустеніту збільшується. У деяких марках сталі не весь аустеніт перетворюється у мартенсит. Визначена кількість його стабілізується, причому тим більша, чим вище температура загартування і нижче температура мартенситного перетворення. Витримка загартованої сталі за нормальної температури веде до стабілізації залишкового аустеніту. Після цього при наступному охолодженні перетворення починається не одразу, а після циклічного гістерезису у кілька десятків градусів. Тривалість розриву між часом загартування і кріогенною обробкою впливає на стабілізацію аустеніту.

Температура, при якій аустеніт стабілізується, залежить від марки сталі. Вище цієї температури, що позначається точкою M_k , аустеніт не стабілізується. Якщо M_k лежить нижче 20 °C, то між загартуванням і кріогенною обробкою може бути відрізок часу будь-якої тривалості. Якщо точка M_k лежить вище 20 °C, то кріогенну обробку необхідно проводити відразу після загартування.

Стабілізуючий вплив тривалості витримки після загартування буде тим більший, чим вище лежить точка M_k .

Кріогенну обробку також доцільно застосовувати для розточувальних блоків, протяжок і прошивок, гладких і різьбових калібрів (скоб, пробок, кілець, шаблонів) кінцевих мір довжини, установчих мір, робочих деталей штампів і прес-форм, фіксуючих деталей пристроїв верстатів, контрольних і установчих оправок.

Особливості криогенної обробки технологічної оснастки, виготовленої з різних сталей. У вуглецевих сталях із вмістом вуглецю вище 0,6 у результаті криогенної обробки забезпечується підвищення твердості при будь-якій температурі загартування.

При цьому необхідно враховувати, що положення точки M_k на шкалі температур змінюється із зміною температури загартування.

Під час загартування від температури 750 до 800 °С охолодження вуглецевих інструментальних сталей до -30 °С достатнє для максимального перетворення залишкового аустеніту. Чим нижче температура загартування, тим менше аустеніт насичений вуглецем і тим меншим має бути розрив часу між загартуванням і криогенною обробкою.

З підвищенням температури загартування швидкорізальної сталі кількість залишкового аустеніту в ній за нормальної температури збільшується, стабільність його зменшується. Тому криогенну обробку такої сталі необхідно здійснювати при більш низькій температурі. Сталь, загартована за зниженої температури нагріву, має більш повне мартенситне перетворення. Час між операціями загартування і криогенною обробкою для такої сталі необхідно скоротити. Якщо у процесі охолодження до 100 °С робити зупинки, то кількість аустеніту збільшиться.

Для швидкорізальних сталей переваги криогенної обробки зберігаються після відпуску при температурах до 580 °С. Якщо відпуск здійснюють при більш високих температурах, перевага охолодження нижче нуля зникає.

Для зниження кількості залишкового аустеніту найбільш ефективна термообробка, що містить у собі відпуск (при 580 °С для сталі типу Р18Ф2К8М або 560 °С для сталі типу Р6М5Ф2К8 або Р6М5Ф3) після загартування, криогенну обробку при -70...100 °С (для вказаних типів сталей) і дворазовий підпуск при 560...580 °С. Після такої обробки кількість залишкового аустеніту наближається у сталі типу Р18Ф2К8М до 1,9 % у сталі типу Р6М5Ф2К8 – до 0,52 %; твердість сталі НРС 65...66. Швидкорізальні сталі, оброблені при температурах і потім відпущені, мають більш рівномірну твердість, ніж сталі, охолоджені тільки у маслі і відпущені три рази при 560 °С. Для різців з швидкорізальної сталі, оброблюваної при криотемпературах, рекомендують дворазовий відпуск при 540 °С з витримкою не менше 1 год. Середня стійкість інструментів, охолоджених нижче нуля, на 40...50 % перевищує стійкість інструментів, що не підлягають криогенній обробці.

Криогенна обробка загартованих конструкційних сталей недоцільна, бо температура кінця мартенситного перетворення таких сталей вища 20 °С. Цей вид обробки застосовують для конструкційних сталей, які

попередньо пройшли цементацію, азотування або ціанування. Високий вміст вуглецю у цементованому шарі стимулює зберігання у ньому залишкового аустеніту (особливо в сталях, що містять в собі такі леговані елементи, як хром, нікель і вольфрам). Твердість і зносостійкість цементованих виробів під час криогенної обробки підвищуються. Режим криогенної обробки сталей з насиченим поверхневим шаром аналогічний приведену для вуглецевих та легованих інструментальних сталей з кількістю вуглецю і легованих домішок, які дорівнюють кількості, що містить поверхневий шар.

2.3. Фізичні та фізико-хімічні методи зміцнення металевих поверхонь

2.3.1. Лазерне оброблення

Лазерне загартування – високотемпературний лазерний нагрів поверхні або ділянок поверхні металевої деталі з наступним швидким охолодженням.

Воно має ряд особливостей, які вигідно відрізняють його від інших методів зміцнення: локальність процесу зміцнення (за глибиною і площею); можливість обробки у важкодоступних місцях; отримання заданої шорсткості поверхні; отримання визначених фізико-механічних, хімічних та інших властивостей поверхонь оброблюваних деталей способом їх легування різними елементами, можливість автоматизації процесу та ін.

Лазерне зміцнення застосовується для підвищення стійкості різального інструмента, прес-форм, вирубних штампів, штоків, поршнів, плунжерів, розподільних колінчастих валів, двигунів внутрішнього згорання, зубчастих коліс тощо.

Зміцненню піддаються сталі:

- вуглецеві, маловуглецеві та леговані (У8А, У10А, Сталь 45, 9ХС та ін.);
- високолеговані (Х12, Х12М, Х12Ф, ХВГ, ШХ15);
- низьковуглецеві (20Х, 12ХНЗА);
- хромисті корозійностійкі (4Х13);
- швидкорізальні (Р5, Р9, Р12, Р18, Р6М5).

Зміцнення відбувається під час впливу як імпульсного, так і безперервного лазерного випромінювання. Схема імпульсного лазерного загартування представлена на рис. 2.6. Обробка, як правило, здійснюється пучком лазера, що розходиться, для збільшення області впливу і поліпшення якості поверхні. Основні параметри – енергія в імпульсі E ,

тривалість τ і розмір плями d , або, відповідно, інтенсивність $q = E/4\pi d^2\tau_1$ і тривалість τ_1 . Потрібний діаметр плями підбирають зміною розфокусування ΔF . Характерні режими обробки лежать в інтервалі $q = 10^4 - 10^5$ Вт/см² і $\tau = 10^{-3} - 10^{-2}$ для інтенсивного опромінювання і $q = 10^3 \dots 10^4$ Вт/см², $\tau = 10^{-2} - 1$ с при безперервному впливі. Імпульсна термообробка може здійснюватись з оплавленням та безоплавленням поверхневого шару.

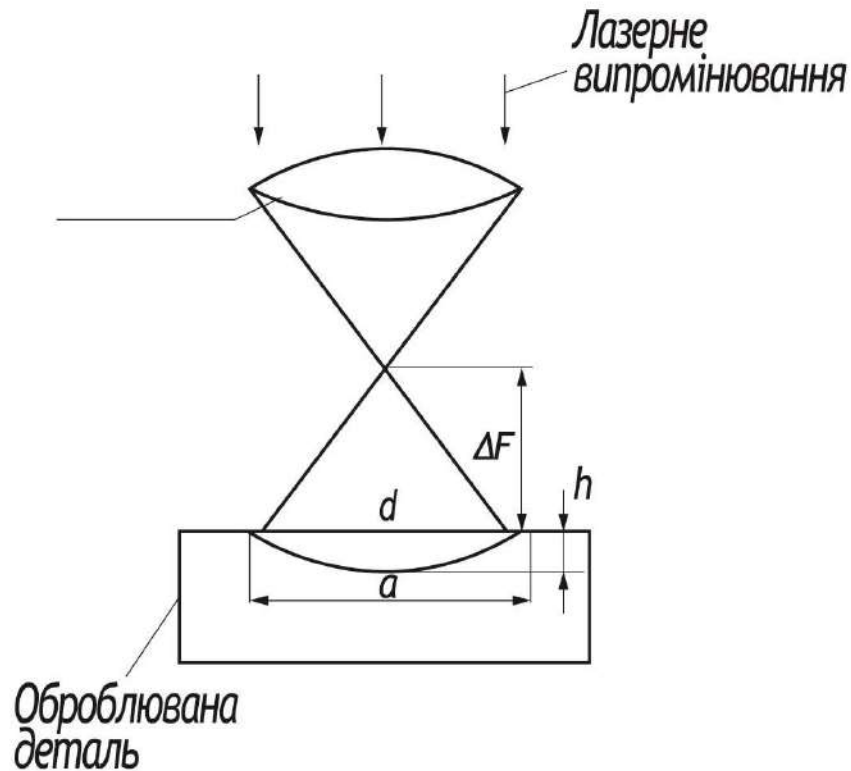


Рис. 2.6. Схема імпульсного лазерного загартовування

Початок плавлення більшості сталей відбувається за інтенсивністю $q = (2 \dots 6) \cdot 10^4$ Вт/см². Загартовування без оплавлення відбувається за інтенсивністю опромінювання, близькій до інтенсивності плавлення. Оброблювану ділянку нагрівають до надкритичних температур відповідних фазових переходів. Після дії лазерного випромінювання охолодження опроміненої ділянки йде з високою швидкістю (до 10 град/с) за рахунок тепловиводу у глибину матеріалу. Звідси лазерні теплові цикли, що їх використовують для термообробки, відрізняються від звичайних (нагрів у печах або ваннах тощо) тим, що мають малий час виконання у сполученні з високими швидкостями нагріву і охолодження. У цих умовах у металах і сплавах відбуваються специфічні структурно-фазові перетворення, внаслідок чого виникають загартовані структури з підвищеною мікротвердістю і зносостійкістю поверхні деталі. Загартовані

структури, що утворюються, відрізняються від звичайних великою дисперсністю і більшою щільністю дефектів.

Зона зміцнення, або зона імпульсного лазерного загартування має вигляд сегмента глибиною h і шириною a . Звичайно $a > d$ (рис. 2.6).

Лазерну пляму на поверхні деталі можна отримати з допомогою оптичних систем, що мають форму кола, кільця, прямокутника та ін.

Зміцнений шар характеризується глибиною та своїми механічними характеристиками. Глибина зміцненого шару без оплавлення поверхні не перевищує $0,1 \dots 0,15$ мкм.

Під час імпульсної лазерної обробки з оплавленням поверхні інтенсивність лазерного випромінювання лежить в інтервалі:

$$q_{пл} \leq q \leq q_{впл},$$

де $q_{впл}$ відповідає інтенсивності виливу, що приводить до початку випаровування речовини. Для різних сталей $q_{впл}$ лежить в інтервалі $(2,2-2,4)10^5$ Вт/см². У цьому разі глибина зміцнення більша, ніж без оплавлення поверхні, і складає близько $0,5 \dots 1$ мкм.

Сучасні лазерні установки, які використовуються в технології зміцнення, мають такі характеристики: енергія в імпульсі від одиниць до сотень джоулів, тривалість імпульсу близькою $0,1 \dots 10$ мс, діаметр плями $2 \dots 10$ мм. Наприклад, серійно виготовлювана установка «Квант 16» має такі характеристики: енергія в імпульсі до 30 Дж, тривалість імпульсу $4 \dots 7$ мс, частота імпульсів 0,5 Гц, діаметр плями до $2 \dots 5$ мм.

Збільшення глибини впливу досягається збільшенням енергії та тривалості імпульсу, ширини – збільшенням діаметра плями. Крім того, енергетичні характеристики, речовини $q_{пл}$ і $q_{впл}$ суттєво залежать від фазового складу сталі та її структури. Так, з підвищенням рівня легуваності сталі $q_{пл}$ знижується, що зменшує глибину зміцненого шару при загартуванні без оплавлення. Крім того, $q_{пл}$ залежить також від шорсткості поверхні, наявності покриття тощо.

Для збільшення $q_{пл}$, а отже, зміцнюваної області, обробку часто проводять з використанням захисних середовищ: аргону, азоту, гелію або у вакуумі. Під час обробки у захисних середовищах відсутнє окислення поверхні, тим самим збільшується частка поглинутої енергії. Звичайно газ подається у зону обробки через сопло. Обробка в інертному середовищі не впливає негативно на механічні характеристики зміцненого шару.

Найбільш повно переваги імпульсного лазерного загартування проявляються під час обробки деталей із складним профілем і непласкою поверхнею. Крім цього, лазер надає можливість вибірково загартувати ділянки, що зазнають найбільших механічних навантажень (селективне загартування). Таке локальне загартування виключає деформацію деталі після термообробки і дозволяє не здійснювати обробку у подальшому.

Селективне загартування широко застосовується в інструментальному виробництві. Точність фокусування лазерного випромінювання дозволяє зміцнювати визначені ділянки різального інструменту і штампів, що зазнають найбільших навантажень. При цьому зберігається початкова більш пластична структура основної маси інструменту, що надає йому підвищеної твердості різальної кромки і зносостійкості. Експерименти та практика показали, що довговічність інструмента після лазерної обробки збільшується у 2...5 рази порівняно з іншими способами і дає значний економічний ефект.

Під час імпульсного зміцнення великої площі великогабаритних деталей найбільш поширене послідовне накладення одиничних плям обробки у вигляді кола, тобто обхід по завданому контуру з кроком l . Важливий параметр при цьому – коефіцієнт перекриття, що являє собою відношення кроку l дискретного переміщення відносно переміщення деталі та лазерного випромінювання до діаметра d опроміненої зони, що визначається за формулою $K_n = l / d$. При $K_n < 1$ плями накладаються з перекриттям, а при $K_n > 1$ між плямами є незміцнені ділянки. Під час обробки у режимі перекриття до характеристики зміцненого шару додається рівномірність глибини, що визначається відношенням мінімального та максимального значень h_{\min}/h_{\max} . У зміненому шарі є зони дво-, три- і чотирикратного нагріву (в залежності від частоти). Через це на периферійних ділянках сталь нагрівається лише до температури відпуску і мікротвердість в цих областях знижується порівняно з центральними. Це так звані зони знеміцнювання.

Співвідношення розмірів зміцнених і знеміцнених зон багато в чому залежить від коефіцієнта перекриття. Розмір зміцненої ділянки максимальний при $K_n = 1$, однак за цього зростає нерівномірність глибини загартованого шару. Тому з точки зору найбільшої ефективності і якості зміцненого шару процес імпульсного загартування здійснюють при $K_n = 0,5$.

Імпульсне лазерне загартування досить перспективне під час селективної обробки, але має і певні недоліки, пов'язані з малою глибиною зміцнення через малу тривалість впливу. Крім того, під час обробки великогабаритних деталей постає проблема нерівномірності якостей зміцненого шару.

Недоліки імпульсного загартування багато в чому зникають при використанні лазерів з безперервною генерацією випромінювання. Безперервні режими обробки більш гнучкі з точки зору вибору оптимального режиму впливу. Вибираючи співвідношення між швидкістю руху променя по поверхні й характером переміщення, можна визначити оптимальний час впливу з тим, щоб збільшити його глибину. Відсутність

обмеження часу впливу сприяє отриманню більш якісного зміцненого шару, бо дозволяє обрати режим, при якому більш повно здійснюються необхідні фазові та структурні перетворення. Наприклад, при безперервному опромінюванні сталей без оплавлення вдається повніше здійснити процес гомогенізації аустеніту при нагріві, що у наступному при охолодженні призводить до утворення мартенситу з однорідним за об'ємом загартованої області складом, а отже, можливістю збільшити рівномірність якості по поверхні.

Для лазерного загартування безперервним випромінюванням звичайно використовують CO₂-лазери, а в деяких випадках лазери на алюмоітрієвому гранаті з довжиною хвиль 10,6 і 1,06 мкм відповідно.

До основних параметрів безперервного загартування q і τ додається швидкість сканування по поверхні або швидкість переміщення деталі відносно променя. Зона зміцнення на поверхні деталі має вигляд смуги, а розріз, перпендикулярний руху – таку форму сегмента, як і під час імпульсної обробки. Хаактеристики зміцненої області ті самі, що під час імпульсного загартування.

Безперервним променем створюють загартовані дорожки шириною 1,5...2,5 мм при глибині зони загартування 2,5...3 мм в сталях і 2...2,5 мм в чавунах. Встановлено, що глибина загартування $h \cong \sqrt{V \cdot d}$. Отже, глибина визначається швидкістю переміщення променя, а значить, і тривалістю впливу, як і під час імпульсної обробки.

Механічні характеристики зміцненого шару залежать від вибору режиму обробки з урахуванням хімічного складу сплаву і вихідної його структури. Важливо обрати режим, що дозволяє завершити структурні та фазові перетворення у сталях, але незначно знизити швидкість охолодження, бо це може призвести до розпаду аустеніту на м'які структури. З іншого боку, зайве зменшення тривалості впливу веде до утворення великої кількості залишкового аустеніту у загартованій ділянці, що також зменшує мікротвердість. Отже, в кожному конкретному випадку необхідно складати операційну карту вибору режимів лазерної обробки.

Технологічні схеми загартування безперервними лазерами схожі на схеми імпульсної обробки з перекриттям, тільки у даному випадку накладаються зміцнені смуги. Коефіцієнт перекриття $K_n = l / d$ звичайно трохи менше одиниці так як сусідні смуги не мають теплового впливу одна на одну. Обробка плоских поверхонь ведеться за двома схемами: лінійна і клітинкова (рис. 2.7, *a*, *б*); обробка циліндричних поверхонь – трьома схемами: накладення односпіральних смуг (рис. 2.8, *a*), двоспіральних смуг назустріч одна одній (рис. 11.8, *б*), а також накладення смуг по осі циліндра з періодичним обертанням деталі для забезпечення кроку

зміщення l (рис. 2.8, в). За цими схемами ведуть зміцнення внутрішніх поверхонь.

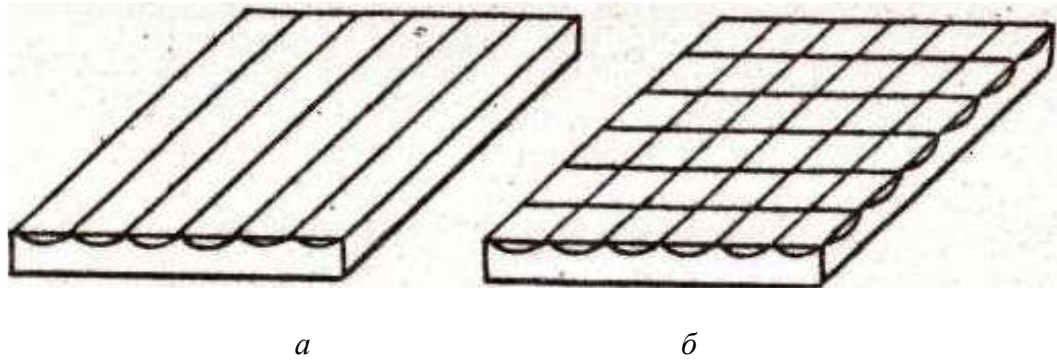


Рис. 11.7. Схеми зміцнення плоских поверхонь

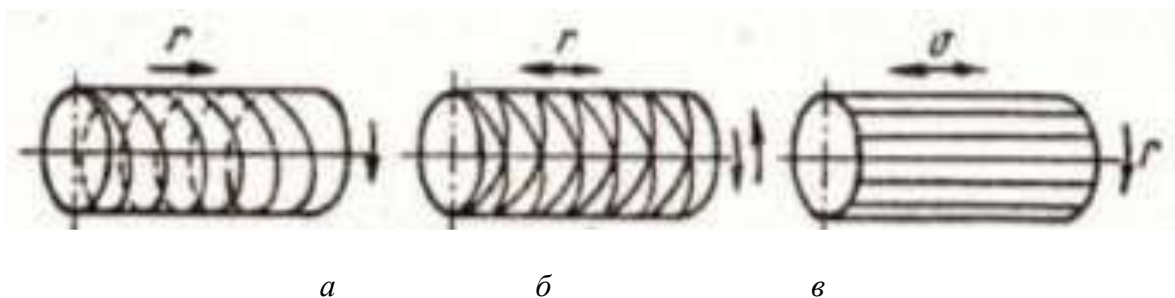


Рис. 11.8. Схеми зміцнення циліндричних поверхонь

Найбільш перспективними з точки зору промислового застосування є різні пристрої, що дозволяють забезпечити сканування лазерного променя по поверхні деталі (сканери). Сканування дозволяє вирішити проблему рівномірного розподілу щільності потужності впливу по плямі фокусування, а звідси, питання про рівномірність зміцненого шару по глибині. Сканування – це багаторазовий пробіг лазерного променя поперек руху зразка (рис. 2.9). Для підтримання температури поверхні $T_{пл}$ рекомендують частоту сканування 200...300 Гц. Ширина смуги визначається амплітудою сканування.

Закон сканування залежить від траєкторії переміщення лазерної плями на поверхні деталі, що рухається і задає профіль циклу теплового впливу. За принципом дії розрізняють механічні, електромагнітні, п'єзоелектричні та інші сканери. Найчастіше механічні сканери використовуються побудованих за принципом механічного коливання дзеркал, що відхиляються, або інших оптичних елементів.

Експлуатаційні властивості деталей можна поліпшити також поверхневим лазерним легуванням. Звичайно найбільш важливі деталі виготовляють повністю із легованих сталей високої собівартості. Зношується лише невеликий шар, що зазнає підвищених навантажень, весь об'єм деталі у цьому випадку не працює. Можна вчинити інакше:

виготовити деталь із дешевої низьколегованої сталі, а на робочу поверхню в необхідній пропорції нанести леговану добавку у вигляді порошку і зв'язуючої основи. Потім лазерним променем тонкий шар металу швидко розплавляють і в нього провадять дифузію домішків. Наступне швидке застигання забезпечує однорідний за структурою шар основного матеріалу з легованими компонентами.

Найбільше поширення отримало лазерне легування неметалевими компонентами – вуглецем, азотом і бромом. Технологічна схема процесу показана на рис. 2.10. На поверхню зразка наносять шар замазки або пасти. Результат залежить від вибору товщини шару пасти й інтенсивності лазерного випромінювання. Середня глибина отримуваних легованих шарів порядку 0,3...0,4 мм під час імпульсної обробки й 0,3...1 мм при безперервному. Потрібно враховувати, що після легування висота напливів становить 20...100 мкм, тому значна частина поверхневого шару повинна бути шліфувана.

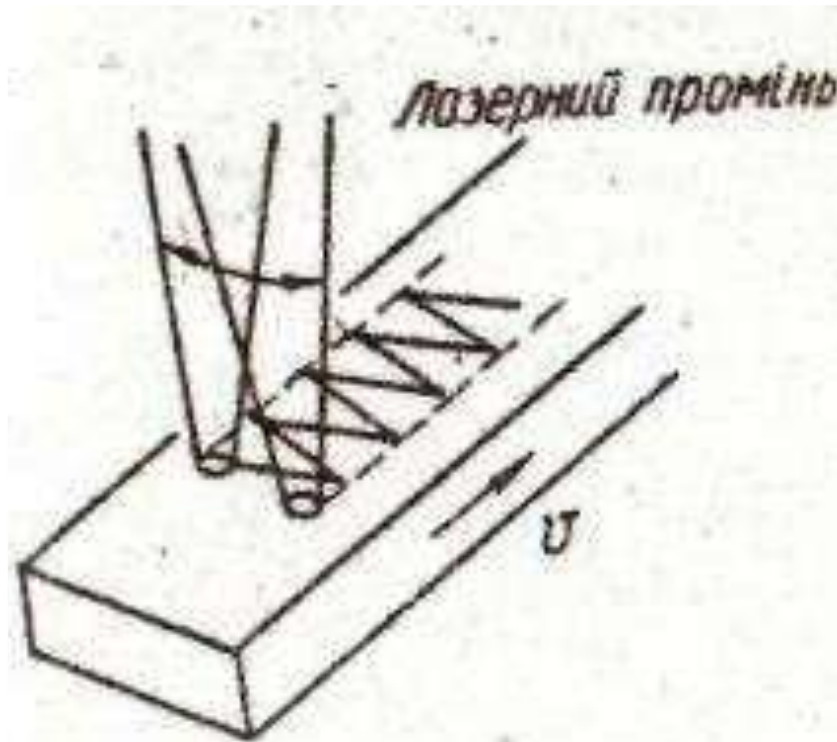


Рис. 2.9. Схема загартування із скануванням лазерного променя

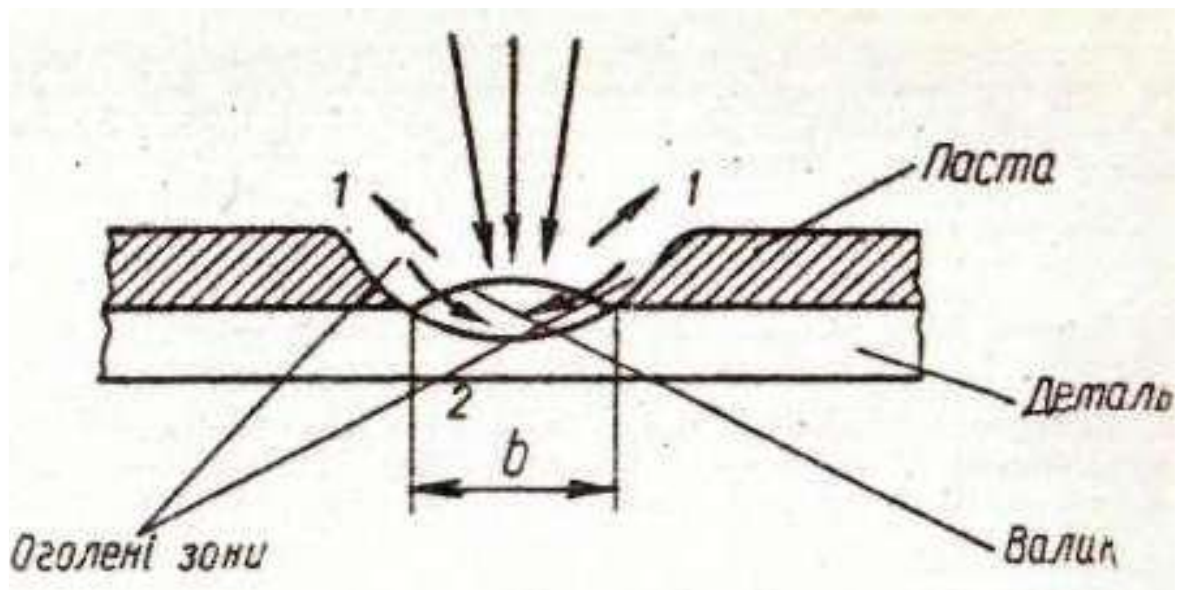


Рис. 2.10. Утворення валиків з оплавленої паста, рівномірність яких і ступінь підплавлення поверхонь визначається режимами

Значне поширення має лазерна цементация з використанням легування з газової фази (лазерно-плазмова обробка). Над поверхнею оброблюваної деталі при $q = 10^6 \dots 10^7$ Вт/см² з'являється плазмова хмара, що є сумішшю іонізованих часток легованого елемента та металу, який випарувався з поверхні деталі. Іонізація часток легованого елемента приводить до більш повного насичення розплавленого металу.

З успіхом здійснюють процеси лазерного легування заліза і сталей багатьма чистими металами: Co, Cr, Sn, Mn, Nb, Ni, Mo, W, Ta, Ti, V, а також сплавами Cr – Mo – W, Ni – Nb та ін.

Особливостями формування структури легованих зон є велика перенасиченість твердого розчину, можливість утворення інтерметалідів. Мікротвердість підвищується під час легування сталі тугоплавкими і карбідоутворюючими елементами. Після лазерного легування чавуну і сталі хромом корозійна стійкість досягає тих самих значень, що й у сплаві з тим же вмістом Cr. При цьому зростають зносостійкість, ударна міцність, а також теплостійкість.

Застосовується й лазерне зміцнення разом з ультразвуковим. Воно виконується локальним нагрівом лазерним променем зони обробки та її наступним або сумісним з ультразвуковим зміцненням.

Спільна дія температури, тиску та швидкого охолодження призводить до утворення дрібнодисперсної структури «білого шару» у поверхневому шарі металу, який відрізняється високою мікротвердістю. Так, якщо мікротвердість після ультразвукової обробки сягає після лазерної – HV₁₀₀ 700...800, лазерної і наступної ультразвукової – HV₁₀₀ 800...950, то

поєднання методів дозволяє отримати HV_{100} 1200...1300 при початковій мікротвердості HV_{100} 250.

Сполучення високої енергії в імпульсі і швидкісної деформації призводить до зниження шорсткості поверхні. Наприклад, при початковій шорсткості $R_a = 0,63$ мкм значення шорсткості дорівнює: після початкової лазерної обробки $R_a = 2,5$ мкм, послідовного ультразвукового та лазерного $R_a = 1$ мкм, спільного $R_a = 0,25$ мкм.

У разі обробки вирубних, пробивних та комбінованих штампів лазерним і ультразвуковим зміцненням час експлуатації їх збільшується в 3...5 рази.

2.3.2. Зміцнення методами іонно-плазмової обробки

Під час іонно-плазмового зміцнення речовину осаджуваного металу у вакуумі послідовно перетворюють на газ, пару, іонізовану пару і плазму та осаджують в атмосфері реакційного або нейтрального газу у вигляді конденсату на зміцнювану поверхню. Покриття отримують методом термічного випаровування, катодного або іонно-плазмового розпилення або способом бомбардування поверхні іонами речовини, що осаджується. Як реакційний газ використовують вуглець або азот. Відповідно покриття складається з нітритних або карбідних сполук тугоплавких металів. Спосіб термічного випаровування можна здійснювати в безоxygenній атмосфері нейтральних газів або у повітряному середовищі. Суттєво методи відрізняються якістю утворюваної плазми; присутністю у плазмі нейтральної або зарядженої іонізованої складової. Процеси іонно-плазмової обробки здійснюються переважно у вакуумних установках.

Основні фактори, що визначають час експлуатації поверхонь з покриттями:

- матеріал основи, що забезпечує міцність, опір тепловому удару та деформації;
- з'єднання між покриттям та основою;
- матеріал покриття (найбільш розповсюдженими є карбід титану TiC , нітрид титану TiN , оксид алюмінію Al_2O_3);
- товщина покриття (досить тонке покриття має поганий опір зношуванню, досить товсте покриття сколюється);
- якість підготовки поверхні.

Зміцнення методами іонно-плазмової обробки застосовують для підвищення зносостійкості інструментів, а також відповідних сталевих деталей машин, що працюють в умовах адгезійного та дифузійного зношування при високих температурах сполучених середовищ.

Хімічне осадження покриття з газової фази під час термічного випаровування. З газоподібної фази суміші бензолу, хлориду титану, аргону та водню на пластинки твердих сплавів хімічно осаджують шар TiC. Параметри осадження: швидкість потоку суміші (55...70 л/хв); температура пластин (1030...1060 °C); температура суміші (900...1100 °C). Найбільшу зносостійкість має шар TiC завтовшки 4...8 мкм; шар завтовшки менш ніж 2 мкм швидко зношується, а зносостійкість шару завтовшки більш як 8 мкм зменшується із збільшенням товщини шару.

Тверді покриття товщиною 5...10 мкм – одношарові з TiN або TiC двошарові TiN+TiC – осаджують на поверхню деталей з газової фази при температурі 800...1000 °C. Твердість покриття TiN складає HV 2000; TiC, TiN+TiC – HV 3000 (у той час як твердого хрому – HV 1200). Покриття можуть бути нанесеними на деталі з твердих сплавів, вуглецевої та легованої сталі, стеліту, корозійно-стійкої аустенітної сталі, нейзильберу, а також на покриття з твердого хрому. Їх застосовують для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості різальних та інших інструментів, колінчастих валів, деталей насосів та інших деталей, що піддаються зношуванню й корозійному впливу. Для осадження покриттів використовують герметизовані камери-печі та вакуумні установки з автоматизованим регулюванням температури. Хімічне осадження карбідів титану із суміші TiCl₄, водню та вуглеводню за температури 1000 °C дає можливість отримати покриття малої товщини. За товщиною покриття менш 10 мкм зменшується небезпека його відокремлення від основи, що має інший коефіцієнт температурного розширення. Нітрид титану має меншу хімічну активність, ніж карбід титану. Подвійне покриття добре захищає інструмент від дифузійного зношування по задній поверхні. Перспективне покриття оксидом алюмінію, яке на атомарному рівні осаджується на попередньо нанесений на основу шар карбідів. Завдяки низькій активності оксиду алюмінію різальні якості пластин можуть бути значно (до п'ять разів) підвищені порівняно із звичайними твердими сплавами.

Шар Al₂O₃, що перешкоджає дифузії, можна наносити безпосередньо на твердий сплав, а потім на нього – зносостійкі шари TiC, TiN, TiCN. Покриття наносять у печі методом осадження із газової фази. Режим нанесення покриттів при тиску 6,56 кПа такий: в потоці (40 л/хв) суміші 92,5 % H₂, 3 % AlCl₃ та 4,5 % CO за 1027 °C за 15 хв осаджують шар Al₂O₃ завтовшки 0,2–0,3 мкм. У піч вводять N₂ до атмосферного тиску; у потоці суміш (80 л/хв) 88 % N₂, 5 % TiCl і 7 % CH₄ за 150 хв осаджують шар TiC завтовшки 5–6 мкм, тиск знижують до 13,3 кПа; в потоці суміш (70л/хв) 90 % H₂, 4 % AlCl₃, 6 % CO₂ за 120 хв осаджують шар Al₂O₃ завтовшки 1,5–2 мкм. Для формування шарів TiN та TiCN в суміш вводять

N₂. Зносостійкість твердосплавного інструмента з багат шаровими покриттями набагато більша, ніж з покриттям TiC.

Штампи з двошаровим осадженим покриттям із карбїду та нїтриду титану можуть відформувати 80 000...120 000 голївок гвинтів із шлицями замість 2500 у штампів без покриття. Окремі штампи працюють до заміни, забезпечуючи виготовлення 180 000 гвинтів. Висока твердість карбїду і нїтриду титану (відповідно 3000 та 2000 HV) попереджує абразивне зношування штампів, а хїмічна інертність цих неметалевих покриттів знижує вірогідність мікроадгезії між оброблюваним металом та інструментами, що зменшує адгезійне зношування штампів.

Шар TiC можна наносити методом високочастотного напилення у вакуумній камері з платформою, що обертається, яка забезпечує послїдовне покриття кількох інструментів. До напилення поверхню очищують ультразвуком або струменем розпиленого аргону. Травлення розпиленим аргоном перед напиленням суттєве для якісної адгезії напиленого шару TiC і базового твердого сплаву, а також для поліпшення рїзальних властивостей інструмента.

Стійкість інструмента з твердих сплавів підвищують способом нанесення багат шарового покриття під час хїмічної реакції у газовій фазі при 850...1200 °C. Покриття має не менше трьох шарів. Перший, прилеглий до поверхні, складається з карбїдів Hf або Ti. Зовнішній складається з оксидів Hf, Zr або Al. Проміжний утворюють нїтриди або оксикарбїди Hf, Zr або Ti. Якщо середній шар складається з нїтридів, рекомендується між ним та шаром карбїдів наносити шар карбонїтридів. Товщина кожного шару 0,5...2 мкм. При обробці рїзанням зношування інструмента з тришаровим покриттям в два рази менше зношування інструмента з двошаровим і в 18 раз менше зношування незахищеного інструмента.

Існують технічні рїшення, згідно з якими для збільшення адгезії між зносостійкими покриттями та основою рїзальної пластини із швидкорїзальної сталі на її поверхню наносять шар чистого титану товщиною до 2 мкм, потім декілька (або один) шарів сполук титану типу TiC, TiN, TiCN, TiCNO, TiCO завтовшки 0,5...10 мкм.

Переважає вид зношування рїзального інструменту, пов'язаний переважно з температурою робочої поверхні. При низькій швидкості рїзання зношення визначається адгезійними процесами. При високій температурі виникає дифузійне зношування і стирання. Покриття TiN найбільш ефективно за умов зношування по передній поверхні, а TiC – при зношуванні задньої поверхні.

Зносостійкі покриття з нітриду титану наносять на дискові довбаки, черв'ячні та дискові різці, осьові інструменти, виготовлені з швидкорізальної сталі, а також на інструменти, оснащені твердим сплавом.

На стандартні непереточувані пластини з сплавів типу ТК доцільно наносити покриття нітриду титану рівномірною товщиною 5...7 мкм з твердістю HV 2500. Стійкість твердосплавних пластин збільшується в 1,5...1,8 рази при збільшенні швидкості різання на 25...30 %. Для інструмента із швидкорізальних сталей типу P18, P9, P6M5, P6M3 товщина покриття повинна бути у межах 3...5 мкм при мікротвердості HV 2600...2800.

Багатошарові покриття. Міцність та зносостійкість покриття збільшують утворенням у ньому шарів різного хімічного складу і фізико-механічних властивостей. Наприклад, двошарове зносостійке покриття може складатися із карбідів титану TiC (нижній шар) і боридів титану TiB₂ (верхній шар). Як підкладку використовують твердий сплав на основі WC і Co з відносно високою міцністю та мікротвердістю HV 2200. Різальні пластини з тришаровим покриттям TiN мають такі шари: перший товщиною 2...3 мкм TiC, другий – суміш TiC і TiN, третій – 2...3 мкм TiN. Багатошарове покриття із карбонітридів та карбиду титану за загальної товщини шару до 10 мкм може складатися з кількох дуже тонких шарів. Зовнішній шар складається із зносо- і дифузійностійкого карбонітриду титану. Під ним розташовано кілька проміжних шарів із карбонітридів титану різного складу. Нижній шар із карбиду титану забезпечує міцне зчеплення з основним сплавом. Зовнішній шар надає покриттю золотистого відтінку.

Тонкий захищений шар, що наноситься на поверхню твердосплавної різальної пластини, має низьку теплопровідність і знижує тертя на поверхні контакту інструмент – стружка. Це призводить до зниження температури робочої поверхні й, отже, зменшення дифузійного зношування. Крім цього, захищений шар виконує роль бар'єра, що заважає дифузії й зменшує схвачування металів інструмента і стружки. Ступінь зменшення зношування залежить від матеріалу захисного шару. Зношування уздовж задньої поверхні більш помітно знижується при застосуванні захисного шару з TiC порівняно з захисним шаром із TiN. Багатофазне захисне покриття, в якому кожний окремий тонкий шар має певне призначення, забезпечує поліпшення в'язкості і зносостійкості різальної пластини.

Осадження покриття способом катодно-іонного бомбардування у вакуумі (КІВ). Виконують для зміцнення деталей машин, технологічного устаткування та інструментів, виготовлених із конструкційних та інструментальних матеріалів, у тому числі твердих сплавів та

швидкорізальних сталей, способом осадження на них тонкоплівкових зносостійких покриттів.

Суть способу полягає в розпиленні тугоплавкого металу катода, утворенні іонів у низькотемпературній плазмі й бомбардуванні ними зміцнюваної поверхні. Матеріал катода (матеріал, що напилюється) випаровується у вигляді високошвидкісних струменів (швидкість 10^6 см/хв), що вміщують як заряджені, так і нейтральні частинки. Струмені являють собою плазмові потоки атомів та іонів з високим ступенем іонізації.

Деталь (анод) ставлять на шляху плазмових потоків. На деталь подають від'ємний потенціал, що прискорює потік іонів. Вибиті з катода атоми розганяються до високих енергій. Вони з великою швидкістю бомбардують поверхню анода, очищають її, входять у кристалеві ґратки поверхневого шару і накопичуючись утворюють на поверхні мікроплівку осаджуваної (конденсованої) речовини.

Спосіб дозволяє утворювати металеві й зносостійкі покриття, які складаються з хімічних сполук – карбідів, нітридів, оксидів, карбонітридів, тугоплавких металів (Ti, Mo, Cr, W, V та ін.), а також багатшарові й багатоскладові (композиційні) покриття.

Принципова особливість способу порівняно з іншими способами одержання покриттів у вакуумі – термічного випаровування, катодно- та іонно-плазмового розпилення – у тому, що в умовах електродугового розряду речовина катода перетворюється у потоки плазми і конденсат утворюється за рахунок як нейтральної, так і зарядженої компоненти плазми. Процес починається з того, що перед осадженням покриття поверхню деталі, що вміщена у вакуумну камеру установки, очищають способом інтенсивного бомбардування її іонами осаджуваної речовини. Одночасно здійснюється нагрів деталі до температури конденсації, яка забезпечує високу адгезію покриття. У процесі осадження на деталь подають від'ємний потенціал 150...200 В, який і підтримує необхідну температуру конденсації. Очистка і термомеханічне активування поверхні підкладки сприяють адгезійному зчепленню основи і плівки, закриттю поверхневих мікротріщин і частковому зміцненню поверхні твёрдосплавної або сталеві підкладки. Для отримання зносостійкого покриття у вакуумну камеру вводять реакційний газ. Газ вступаючи у реакцію з розпиленим матеріалом катода утворює відповідне зміцнююче покриття у вигляді хімічного з'єднання (нітридів, карбідів та ін.), маючи добру адгезію з основним матеріалом підкладки. Покриття можна наносити не тільки при високих, а й при відносно низьких температурах плазми, що розширює діапазон зміцнюваних матеріалів. Спосіб дозволяє наносити покриття на інструмент із загартованої швидкорізальної сталі без

застосування наступної термообробки. У процесі нанесення покриття матеріал, що його утворює, набуває нових фізико-механічних властивостей, що суттєво відрізняються від вихідних.

Мікротвердість можна змінювати регулюванням параметрів процесу, що утворює можливість осаджувати плівку з наперед заданими властивостями. Процес проводять з температури 400...600 °С, без знеміцнення підкладки, що виготовляється з твердих сплавів або швидкорізальних сталей.

Покриття відрізняються параметрами шорсткості, які досягають $R_a = 0,08...0,32$ мкм. Товщину покриття можна змінювати у залежності від умов роботи інструмента, оснастки або деталі. Звичайно товщина покриття 5...20 мкм. Спосіб дає можливість утворювати конденсат, який складається з твердих шарів, що чергуються, наприклад нітрид Мо або Ті (HV 3000...3600), м'яких – із чистого Мо або Ті (HV 600).

Покриття із нітриду титану має високу мікротвердість, знижений коефіцієнт тертя, низьку хімічну активність. Комплекс властивостей призводить до зниження зусилля різання, зменшення температури у зоні різання і скорочення інтенсивності зношування різальних інструментів.

Перевага способу порівняно з методами хіміко-термічної обробки:

- можливість отримання на робочих поверхнях зносостійкого покриття високої мікротвердості (HV 2600...3800); більш висока (в 2...6 рази) продуктивність технологічного процесу зміцнення;
- можливість проведення технологічного процесу осадження покриття при температурах нагріву підкладки, що не перевищують температури її відпуску на високу твердість;
- можливість зміцнення прецизійних різальних інструментів і деталей без допоміжної наступної розмірної механічної обробки;
- високі стабільні значення зносо-, окаліно- та корозійної стійкості покриття.

Технологічний процес осадження покриття розділяють на етапи: прогрів, очистка, напилення.

Основні операції типового технологічного процесу:

- підготовка зміцнюваної деталі або інструменту (знежирювання поверхні);
- завантаження деталі або інструмента на позиції напилення у камеру установки; вакуумування камери до робочого тиску; очистка поверхні у тліючому розряді (бомбардування зміцнюваних поверхонь важкими іонами легованого газу); іонне бомбардування і нагрів зміцнюваної деталі або інструмента;
- конденсація продуктів плазмохімічної реакції на робочі зміцнювані поверхні;

- охолодження деталі або інструмента у середовищі азоту;
- вивантаження зміцнених деталей або інструментів з установки.

Прогрів камери виконують з метою запобігання конденсації парів води та для їх прибирання з поверхні стінок, дегазації цих поверхонь у процесі відкачування і вакуумування камери. Прогрів виконують гарячою водою (60 °С) по трубах, приварених до стінок робочої камери. Очистку поверхні підкладки (анода) від забруднень забезпечують іонним опромінюванням «травленням» перед напиленням. Напиленому виробу надають високого від'ємного потенціалу. Іони металу катода, що виникають у результаті електродугового розряду, прискорюються до енергії, що дозволяє вибити з поверхні виробу атоми поверхневого шару. У режимі напилення відбуваються випаровування матеріалу катода (наприклад, Ti) і «обдування» поверхні виробу (анода) іонізованим паром металу катода і реакційним газом (наприклад, азотом). У результаті на поверхні виробу виникає покриття нітриду титану.

2.3.3. Зміцнення наплавленням

Такий спосіб зміцнення дозволяє підвищити стійкість деталей проти абразивного зношування, електрохімічної корозії, ерозії, кавітаційного руйнування, окалиноутворення, термічної й контактної втоми; дозволяє замінити у деталях високолеговані сталі вуглецевими, а кольорові метали – чорними.

Методи наплавлення використовують для відновлення й одночасно для зміцнення деталей, які відпрацювали у вузлах автомобілів, тракторів та інших механізмів машин.

Найбільш поширені такі способи наплавлення:

- наплавлення під шаром флюсу;
- вібродугове наплавлення;
- наплавлення в середовищі діоксиду вуглецю;
- наплавлення порошкового дрота безфлюсового або газового захисту;
- плазмове наплавлення.

Деталі, що підлягають наплавлення, ретельно очищають від оксидів, бруду, масла, іржі і фарби. Наплавляють метал на очищену поверхню. Канавки, пази й отвори поверхні, які треба зберегти закривають мідними, графітовими або вугільними вставками.

Розрізняють механічну, хімічну та електрохімічну обробки поверхні для наплавлення. Механічну обробку застосовують для зняття нерівностей, подряпин, окалин, задирок та іржі, при цьому використовують дробо- та піскоструменеву очистку, галтування, шліфування і полірування. Для

механічної обробки використовують також металеві щітки, голкофрези, абразивні круги, шліфувальні стрічки, шкурки та ін.

За хімічної та електрохімічної обробки поверхні використовують знежирення, травлення, декапірування, електрохімічне полірування та промивку водою. За цього з поверхні знімають масла, жири рослинного та тваринного походження, поліровочні пасти, консерваційні масла тощо.

Наплавлення здійснюють за високої швидкості розплавлення і застигання розплаву з інтенсивним протіканням хімічних та термохімічних процесів. При цьому якість наплавленого шару встановлюється залежно від умов роботи деталей і допустимої величини зношування поверхонь. Для деталей, що працюють в умовах тертя, вона не повинна перевищувати 4 мм, а в умовах невеликих ударних навантажень – 2 мм, при цьому твердість наплавленого шару HRC 45...46, а теплостійкість – 1000...3000 °С.

Вирішальне значення для отримання потрібних експлуатаційних властивостей деталей має правильно обраний наплавний матеріал і спосіб його нанесення. Так, для зниження інтенсивності абразивного зношування потрібне максимальне підвищення твердості деталей, для усунення теплового зношування – підвищення теплостійкості, а для упередження пошкоджень у результаті розвитку процесу схоплювання потрібно вести наплавлення матеріалом, що має малу схильність до схоплювання, а також здібність утворювати міцні плівки оксидів.

Наплавлення під шаром флюсу. За такого наплавлення в зону горіння дуги подають сипучий флюс, що складається з окремих мілких зерен. Під впливом високої температури частина флюсу плавиться, так навкруги дуги утворюється еластична оболонка, яка надійно захищає розплавлений метал від дії кисню та азоту. Після того як дуга перемістилась, рідкий метал твердішає разом із флюсом і утворює на наплавленій поверхні ламку шлакову кірку. Флюс, що не розплавився, може бути використаний знову.

Для наплавлення під шаром флюсу застосовують головки (А-580, ОКС-1031Б, ОКС-1251М), що встановлюються на токарних верстатах або спеціальних установках. Якість наплавленого матеріалу і його зносостійкість залежать від марки електродного дрота, флюсу і режиму наплавлення. Для наплавлення низьковуглецевих і низьколегованих сталей використовують дріт зі низьковуглецевих (Св-08, Св-08А), марганцевистих (Св-08Г, Св-08ГА) і кремніймарганцевистих (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС) сталей.

Сталі з великим вмістом вуглецю наплавляють дротом Нп-65Г, Нп-80, Нл-30ХГСА, Нп-40Х13.

Флюси поділяються на плавлені, керамічні і флюси-суміші.

Плавлені флюси АН-348НА, АН-60, ОСУ-45, АН-28 містять стабілізуючі та шлакоутворювальні домішки, що не сприяють підвищенню міцності і зносостійкості наплавленого металу.

Керамічні флюси АНК-18, АНК-19, ЖСН-1, крім стабілізуючих і шлакоутворювальних елементів, містять леговані домішки-феросплави, які під час наплавлення маловуглецевим дротом забезпечують високу твердість і зносостійкість наплавленого металу.

Флюси-суміші складаються зі флюсу АН-348А з додаванням ферохрому, феромарганцю і графіту.

Як джерела живлення дуги використовують перетворювачі ПГС-500, випрямлячі ВС-300, ВДУ-504, ВС-600, ВДГ-301 з жорсткою зовнішньою характеристикою.

Твердість і відносна зносостійкість наплавленого металу у залежності від марки електродного дроту і флюсу приведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Твердість і відносна стійкість наплавленого металу залежно від марок електродного дроту та флюсу

Марка		Твердість покриття, HRC	Коефіцієнт відносної стійкості
Нп-30ХГСА	АН-348А	32–36	1,17
Нп-30ХГСА	АН-20	31–32	1,28
Нп-30ХГСА	АН-60	41–43	1,33
Нп-30ХГСА	АН-28	42–44	1,20
Нп-80	АН-348А	35–37	1,24
Нп-80	АН-60	42–44	1,34
Нп-Х14	АН-28	49–52	1,66
Нп-25	АН-348А	24–28	1,08
Нп-50	АН-348А	30–32	1,18
Св-18ХГС	АН-348А	26–28	1,20
Св-08Г2С	АН-348А	22–24	1,06

Наплавлення в середовищі діоксиду вуглецю. За таким способом дуга між електродом і наплавленою поверхнею горить у струмені газу, що витискує повітря із плавильного простору та захищає метал від впливу кисню та азоту.

У разі автоматичного наплавлення у середовищі діоксиду вуглецю є такі переваги:

- відкрита дуга дає можливість спостерігати і коректувати процес;
- здійснювати наплавлення в будь-якому положенні у площині поверхні, що наплавляється;
- відсутні шкідливі виділення і шлакові кірки.

Для наплавлення застосовують таке обладнання: наплавочні головки АБС, А-348, А-409, А-580, ОКС-1252М; джерела живлення ВС-200, ВСУ-300, ВС-400, ПСГ-350, АЗД-7,5/30, підігрівачі газу; осушувач, заповнений силікагелем КСМ величиною 2,8–7мм; редуктори-витратоміри ДРЗ-1-5-7 або ротаметри РК-53Б.

Під час наплавлення використовують такі матеріали: електродний дріт Св-12ГС, Св-0.8ГС, Св-0.8Г2С, Св-12Х13, Св-06Х19Н9Т, Св-12ХМА, НП-12ХГСА; порошковий дріт ПП-Р18Т, ПП-Р191, ПП-4Х28Г та ін. Вони подаються із касети в плавильну зону через мундштук з наконечником.

Наплавлення у середовищі діоксиду вуглецю виконують за постійного струму зворотної полярності. Тип і марку електрода обирають залежно від матеріалу деталі і необхідних фізико-механічних властивостей наплавленого металу. Швидкість подачі дрота залежить від величини електричного струму, яка встановлюється таким чином, щоб не було коротких замикань і обривів дуги. Швидкість наплавлення встановлюють залежно від товщини наплавляемого металу і якості формування наплавленого шару.

Наплавлений метал, залежно від марки і типу електродного дрота, має твердість 200–300 НВ.

Витрати діоксиду вуглецю залежать від діаметра електродного дрота, швидкості наплавлення.

Наплавлення порошкового дрота. Наплавлення здійснюють під шаром флюсу або у середовищі захисного газу, але при введенні у дріт відповідних компонентів можливе наплавлення і безфлюсового або газового захисту. Широко поширене використання порошкового дрота, у складі якого є ферохром, феротитан, феромарганець, графітові та залізні порошки.

Порошковий дріт виготовляють на спеціальних верстатах методом волочіння. Вихідним матеріалом є стрічка з низьковуглецевої сталі й порошок, що містить потрібні складові елементи. Використовують два типи порошкового дрота: для наплавлення під флюсом і для наплавлення відкритою дугою без допоміжного захисту. Розбризкування електродного матеріалу під час наплавлення порошковим дротом зменшується у разі застосуванні постійного струму низької напруги від джерела живлення. Порошковий дріт марок ПП-АН122 (30Х5Г2МО) і ПП-АН128 (35Х4Г2СМ) під час наплавлення відкритою дугою має за фізико-механічними властивостями наплавленого металу і технологічним процесом деякі переваги перед іншими матеріалами: можна збільшити величину струму, тобто продуктивність процесу у два рази і більше; відпадає операція відокремлення шлакової кірки від деталі після наплавлення, мікроструктура металу після наплавлення на сталь 45 трооститно-

мартенситна, твердість 52...57 HRC, зносостійкість в 1,2...2 рази більше, ніж у сталі 45, що загартована струмом високої частоти.

Для наплавлення порошковим дротом використовують токарні верстати з головками А-580М, ОКС-1252М, А-765, А-1197, а також спеціальні верстати УД-139, УД-140, УД-143, УД-144, УД-209, УД-233, У-651, У-653, ОКС-11236, ОКС11238, ОКС-14408.

Джерелами живлення дуги є перетворювачі ПСГ-500, випрямлячі ВДУ-504, ВДУ-301, ВДУ-1001, ВС-600, ВДМ-1001.

Наплавлення порошковим дротом виконують за постійного струму зворотної полярності. Діаметр електродного дрота залежить від товщини наплавленого металу з припуском на механічну обробку 0,8...1,5 мм на сторону.

Вібродугове наплавлення – різновид дугового наплавлення металевим електродом. Процес наплавлення здійснюють вібруєним електродом з подачею охолодженої рідини на поверхню, яка наплавляється. Вібрація електрода забезпечує стабільність процесу за рахунок збуджень дугових розрядів і сприяє подачі електродного дрота невеликими порціями, що забезпечує якість формування наплавлених валків.

Охолоджувальна рідина (4...6 %-ний розчин кальцинованої соди у воді) захищає метал від окислення.

Якість з'єднання наплавленого металу з основою залежить від таких технологічних факторів: крок наплавки (подача супорта верстата на один оберт деталі), кут підводу електрода до деталі, якість підготовки поверхні під наплавлення, полярність струму, товщина шару наплавлення тощо.

Структура і твердість наплавленого шару залежать від хімічного складу електродного дрота і кількості охолоджувальної рідини. Так, наприклад, у разі наплавлення дротом Нп-80 (із вмістом вуглецю 0,75...0,85 %) валиків охолоджувальної рідини, загартовується до високої твердості і частково відпускається, утворювання неоднорідної структури від мартенситу при загартуванні до тростосорбіту відпуску з твердістю HRC 26...55. У разі наплавлення низьковуглецевим дротом Св-08 отримують твердість наплавленої поверхні HRC 14...19. Товщина одношарового наплавлення залежно від режимів коливається від 0,5 до 3 мм. У разі багатшарового наплавлення можна отримати шари будь-якої товщини.

Плазмовае наплавлення полягає у використанні тепла плазмового струменя, який являє собою потік іонізованих часток газу, що мають велику енергію, при вільному горінні електричної дуги температура у неї досягає 5000...6000 °С, а при примусовому стисненні дуги вона значно підвищується. Таке стиснення використовується для отримання

плазмового струменя. Пропускаючи дугу разом із захисним газом (водень, азот, аргон) через охолоджуване водою сопло, стискають її і досягають іонізації потоку газу із температурою до 18 000 °С. Як наплавний матеріал використовують дріт, металокерамічні присадочні кільця, гранули порошкових сплавів.

Плазмове наплавлення застосовують для нанесення жароміцних матеріалів на робочу поверхню клапанів двигунів внутрішнього згорання, для наплавлення антифрикційних матеріалів на деталі вузлів тертя та ін.

2.3.4. Зміцнення методами електролітичного осадження і розчинення

Нікелювання. Здійснюють для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин та механізмів, збільшення довговічності, захисту поверхонь від корозії, пошкоджень і заїдань, стійкості до кислот і щолоків.

Типовий технологічний процес нікелювання здійснюється в такій послідовності: механічна обробка (шліфування або полірування) для зняття дефектного шару і надання поверхні відповідної геометричної форми, знежирювання, декапірування, електрохімічне нікелювання, промивання і контроль. Найбільш якісне покриття дає осадження трьох шарів нікелю із різних за складом електролітів. Нікелеве покриття наносять у ваннах, футерованих вінілпластом, у типових розчинах (табл. 2.9).

Таблиця 2.9

Електроліти для нікелювання

Склад	Вміст компонента, кг/м ³	Режим обробки		
		Температура, °С	pH	Густина струму, А/м ²
Сульфат нікелю Хлорид нікелю Борна кислота Хлорид амонію	180 30 30 25	60	5,6	500
Сульфат нікелю Хлорид нікелю Борна кислота Ацетанлід 1,4-бутандіол Бензосульфанід	200...300 40...60 35...45 1 1,2 1,2	50...60	5,2	300...500
Сульфат нікелю Хлорид нікелю Сульфат натрію Сульфат магнію	160...200 25...30 80...100 30...35	50	5,5	250...500
Сульфат нікелю	250...300	40...50	5,4	250...350

Борна кислота	25...40			
1,4-бутандіол	0,2...0,5			
Хлорамін «Б»	2...2,5			
Формалін	0,005			
Сульфат нікелю	600	60...70	3,5...4,5	200...8000
Хлорид нікелю	10			
Борна кислота	30			

Хромування. Здійснюють для підвищення стійкості і відновлення деталей машин, механізмів, різального, контрольного і вимірювального інструмента, а також формоутворюючих елементів штампів, прес-форм, діркопробивних пуансонів і матриць.

Типовий технологічний процес виконують у такій послідовності: механічна обробка (шліфування або полірування) для зняття дефектного шару і надання поверхні відповідних геометричних параметрів; знежирювання поверхні для зняття слідів органічних речовин; декапірування; хромування; виловлювання хрому із електроліту; обробка у розчині метабісульфіту натрію; промивання і сушіння покриття.

Хромування здійснюють у стандартних сталевих ваннах, футерованих листовим вініпластом. Оброблювані вироби виконують функцію катода. Як джерела струму застосовують низьковольтові генератори постійного струму.

Для завантаження виробів у ванну застосовують спеціальні контактні пристрої.

Товщина хромованого покриття для гладких вимірювальних інструментів складає 30...100 мкм, для різбових калібрів і металорізальних інструментів 2...20 мкм, для прес-форм, матриць і пуансонів – 40...100 мкм. Стійкість різального інструмента у результаті хромування збільшується у два – три рази, контрольного-вимірювального інструмента – в п'ять – десять разів. Мікротвердість осаджувального хрому знаходиться у межах 900...1000.

Найбільш ефективно хромування металорізального інструмента, що застосовується для обробки кольорових металів та їх сплавів.

Доцільно хромувати всі види протяжок. Це широко поширений інструмент, який виготовлюється звичайно із сталі Р9, Р18 і, як правило, працює на малих швидкостях різання за низького температурного режиму.

Контроль товщини хромових покриттів необхідно здійснювати приладами, що не руйнують покриття. Вироби з товщиною меншою, ніж допускається, відправляють на повторне хромування.

Хромування здійснюється в електролітах (табл. 2.10) за напругою 4...12 В, густина струму 1...2,5 кА/м² і температурі 18...70 °С.

Хромові покриття наносять на деталі масою до 700 кг, причому більшість деталей мають масу до 1кг. Довжина хромованих деталей може досягати 10 м, а діаметр робочої поверхні – до 3 м. Однак найчастіше довжина деталей становить 10...200 мм.

Для виготовлення більшості деталей, що піддаються хромуванню, застосовуються леговані та вуглецеві сталі.

Таблиця 11.10

Електроліти для хромування

Склад	Вміст компоненту, кг/м ²	Режим обробки	
		Температура, °С	Густина струму, А/м ²
Хромовий ангідрид Кислота: сірчана борна	150...250 2...2,5 20...25	40...60	1,2...5
Хромовий ангідрид Сульфат стронцію Кремнійфторид калію	250...300 5,5...6,5 18...20	55...65	4...7
Хромовий ангідрид Нітрат натрію Ацетат барію Борна кислота	300...350 7...10 5...7 12...15	20...45	4...8
Хромовий ангідрид Сірчана кислота Біхромат калію	150...250 1,5...2,5 0,2...0,5	15...30	1,4...5
Хромовий ангідрид Сірчана кислота «Хромін»	150...250 1,5...2,5 3	45...60	1,2...5,5
Хромовий ангідрид Сірчана кислота Їдкий натр Етиловий спирт	350...400 2,5...3 40...60 1...1,5	15...60	1...60
Хромовий ангідрид Фтори амонію	280...300 0,2...0,3	15...25	5...10

Електрохімічне зміцнення – метод отримання покриттів з металевою або полімерною матрицею, армованою дисперсними частками. Здійснюється опадом порошкових покриттів на робочі поверхні сталевих деталей складної конфігурації: деталі прес-форм, штампів, мірного інструмента, різної технологічної оснастки.

Технологічний процес нанесення покриття безвольфрамового твердого сплаву на основі карбіду хрому з нікель-фосфорною зв'язкою складається з двох основних операцій: електрофоретичного осадження суміші порошкоподібних компонентів покриття і припікання

електрофоретичного опадку до сталевій підкладки, що здійснюється при 1160...1180 °С у захисному безоxygenному середовищі або у вакуумі.

Покриття має високу адгезію до підкладки; руйнування покриття при деформації здійснюється раніше, ніж відшарування його від підкладки. Через те, що коефіцієнти термічного розширення матеріалу покриття і сталі приблизно однакові, у разі потреби можна здійснювати термічну обробку деталей з покриттям за звичайними режимами. Максимальна товщина електрофоретичного карбідохромового покриття складає 120–150 мкм. Багаторазовим нанесенням можна довести товщину покриття до 400–500 мкм.

Електрохімічне полірування – анодне розчинення металу в електроліті. Це один із найбільш ефективних методів підвищення, стійкості інструментів способом зменшення шорсткості поверхні, зниження коефіцієнту тертя інструмента і обробленої деталі.

Як електроліт використовують водні розчини солей, кислот і шолоків.

Якість оброблюваної поверхні залежить від складу електроліту, його температури і анодної щільності струму. У табл. 2.11 наведено режими електрохімічного полірування конструкційних матеріалів.

Таблиця 2.11

Режими електрохімічного полірування конструкційних матеріалів

Оброблюваний матеріал	Склад електроліту	Вміст компонента, %	Температура, %	Анодна густина струму, А/дм ²
Сталі вуглецеві і низьковуглецеві	Кислота: сірчана фосфорна Карбоксиметилцелюлоза	40 50 0,2	26...30	100... 120
Сталі хромонікелеві і високохромисті	Кислота: сірчана фосфорна	20 60	40...300	60... 80
Сплав мідний	Фосфорна кислота Сульфонат	50...70 0,1...0,2	30...50	20... 30
Сплав нікелевий	Сірчана кислота Сульфонат (або сульфокарбонова кислота)	60...70 0,2...0,3	70...150	30... 50
Тантал	Кислота: сірчана плавикова Сульфонат	40...60 8...15 0,2...0,3	50...100	80...90

Поверхні, поліровані електролітичним способом, відрізняються від механічно оброблених відсутністю слідів деформації структурних змін.

Метод має високу продуктивність, яка не залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу і форми виробу. Електрохімічне полірування сприяє стабілізації коефіцієнта тертя, зменшує час припрацювання поверхонь тертя у п'ять – шість разів, підвищує стійкість металу до корозії, збільшує час служби деталей.

Електрохімічне полірування підвищує стійкість свердел на 30...35 %, зенкерів – на 10...20 %, розгортки – на 20...25 %, мітчиків до 70 %, кільцевих фрез – до 100 %.

Зміцнювальні інструменти вкладають на мідну сітку, під'єднують до плюсового полюса джерела постійного струму і занурюють в електролітичну ванну, через яку пропускають електричний струм при напрузі 8 В протягом 20...45 с. Час витримки залежить від розміру зміцнюваного інструмента і марки матеріалу.

На якість полірування впливають мікроскопічні неоднорідності, що виникають через наявність в металі кількох кристалічних фаз, особливо неметалевих включень.

2.3.5. Зміцнення методами електроіскрової обробки

Суть методу полягає в легуванні поверхневого шару металу виробу (катода) матеріалом електрода (анода) при електроіскровому розряді в повітряному середовищі.

У результаті хімічної реакції легуваного матеріалу з дисоційованим атомарним азотом і вуглецем повітря, а також з матеріалом деталі у поверхневих шарах утворюються загартовані структури і складні хімічні сполуки (високодисперсні нітриди, карбонітриди і карбіди), утворюється дифузійний зміцнений шар, який має високу твердість і зносостійкість. Загальний шар при електроіскровому зміцненні складається з поверхневого білого шару, що не травиться, і нижнього перехідного дифузійного шару із змінною концентрацією легуваних домішок і карбіду з сильно зміненою вихідною структурою, що поступово переходить в структуру основного металу. У більшості випадків нижній шар за глибиною дещо більше верхнього. У зв'язку з наявністю дифузійного шару в структурі зміцненого металу можливе багатшарове зміцнення, у тому числі з утворенням різнолегованих шарів.

Електроіскровому зміцненню піддають поверхні деталей машин та механізмів типу напрямних, клинців, кулачків, фіксаторів, прижимів та інших, поверхні шпонкових пазів, шліців, отвори корпусних деталей, виготовлених з конструктивних легуваних та вуглецевих сталей.

Такий метод застосовують для підвищення довговічності металорізального, деревообробного, слюсарного та іншого інструмента;

зносостійкості та твердості поверхні деталей машин, що працюють в умовах підвищених температур в інертних газах; жаростійкості і корозійної стійкості поверхні; підвищення розмірів зношених деталей машин та механізмів під час ремонту; утворення шорсткості під наступне гальванічне покриття; полегшення паяння звичайним припоєм матеріалів, що важко паяються; змінення якості поверхонь виробів з кольорових металів. Він надає можливість значно змінювати вихідні фізичні і хімічні властивості поверхневого шару (твердість, зносостійкість, жаростійкість тощо).

Інструмент, що переточують уздовж задніх поверхонь (токарні різці, свердла, кінцеві та шпонкові фрези тощо), підлягає зміцненню після кожного переточування. Допоміжний і штампувальний інструмент, виготовлений з інструментальних і конструкційних сталей, зміцнюють після остаточної підготовки до експлуатації. У цангах і вкладках до цанг зміцнюють поверхні робочих отворів на відстані не менш ніж 30 мм від торця; у напрямних шпонкових протяжках – опорну поверхню прямого пазу по ширині і довжині; у копірах гідрокопіювальних верстатів – поверхню копіру обточують; в упорних центрах і напівцентрах – центри упорні з конусом Морзе 3...6 після шліфування робочого конуса і наступних перешліфовок; поверхня робочого конуса на 1/3 довжини утворювальної від вершини конуса. Після зміцнення поверхню робочого конуса піддають доводочному шліфуванню припуску 0,01...0,015 мм. У матрицях і пуансонах розподільних та формозміцнюючих штампів зміцнюють робочі поверхні матриць і пуансонів, які в процесі експлуатації мають найбільший знос.

Технологічні рекомендації для виконання електроіскрового зміцнення. Деталі, інструменти і технологічну оснастку, що піддають електроіскровому зміцненню, попередньо підготовлюють: заточують різальний інструмент, знімають бруд, пил, іржу, задирки із зміцнюваних поверхонь та кромek деталей. Параметр шорсткості зміцнюваної поверхні R_z не повинен бути вищим 80 мкм. Перед початком роботи вібратор і апарат регулюють у відповідності з прийнятими режимами обробки. Після включення апарата електроди вводять у контакт один з одним, а потім рухають зміцнювальний електрод відносно зміцнюваної поверхні, підтримуючи постійний тиск на вібратор.

Рух електрода по оброблюваній поверхні необхідно здійснювати по невеликому колу з одночасним рухом вбік. Під час виконання операції електроіскрового зміцнення потрібно якомога рідше відривати зміцнювальний електрод і переривати плавний його рух вздовж зміцнювальної поверхні. Відрив електрода викликає розряд конденсатора контуру. Якщо електрод, що працює, був відведений від зміцнюваної

поверхні на деяку відстань, а потім знову наблизений до неї, то перший розряд між знову зближеними електродами викликає напругу в іонізованому повітрі при різниці потенціалів, що близька до напруги джерела живлення зарядного контуру. Такий розряд може викликати значну ерозію поверхні зміцнюваного виробу або навіть припалення на ній.

Змащування зміцнюваних поверхонь маслом знижує чистоту обробки. Іскровий розряд в рідинному середовищі призводить до збільшення викиду металу з поверхні електродів, а тепловий вплив не встигає поширитися на велику глибину, внаслідок чого глибина зміцнюваного шару не збільшується. Шорсткість і суцільність нанесеного покриття залежать від ступеня шорсткості вихідної поверхні; причому чим нижче шорсткість, тим вище якість поверхні з нанесеним покриттям.

Після зміцнення інструмента рекомендують вигладжувати його поверхню алмазними кругами або шліфувальною шкіркою. Замість алмазного вигладжування можна застосовувати доведення поверхні електродом з електрографіта ЕГ-4. У точному інструменті достатньо зміцнювати лише передні грані вздовж різальної кромки.

Для механічної обробки деталей, що потребують високої чистоти і точності, зміцнення інструмента можна здійснювати на високопродуктивних грубих режимах обробки. Електроіскровому зміцненню піддають поверхню грані інструмента шириною близько 3 мм (для штампів – більше 5 мм). Щоб не пошкодити різальні кромки зміцнюваного інструмента і штампів, рекомендують спеціально захищати різальну кромку графітовою пластинкою, що прикладається до суміжної грані технологічної оснастки.

Електроіскрове зміцнення здійснюють на м'яких, середніх і жорстких режимах за струмом в мережах і напругою на електродах. М'які режими забезпечують отримання тонкого дрібно дисперсного щільного шару зміцнюваного металу. Для утворення зміцненого шару під час роботи на м'яких режимах потрібно більше часу, ніж при використанні жорстких режимів. Жорсткі режими дозволяють отримати більш товсті шари зміцнюваного металу, однак не забезпечують його однорідність, щільність та мілко дисперсність.

Електроіскрове зміцнення здійснюють вібруючим електродом вручну. Основними недоліками ручного зміцнення є нестійкість і залежність результатів зміцнення від кваліфікації робітника. Крім того, ручна обробка малопродуктивна.

Швидкість руху електрода у разі ручної обробки не має перевищувати 0,07–0,09 м/хв. При більш високій швидкості якість покриття знижується. Потрібно також стежити за перпендикулярністю розміщення електроду по

відношенню до зміцнюваної поверхні. Пристрої з ручними вібраторами не дозволяють повністю реалізувати усі переваги процесу. Доцільно механізувати процес, використовуючи з цією метою механізми переміщення робочих столів і супортів металорізальних верстатів. Під час електроіскрового легування у результаті термічного впливу розряду здійснюється значний ріст зерен у поверхневому шарі основного металу, що призводить до зменшення його міцності. Нагрів тонких поверхневих шарів основного металу, близьких до зносостійкої оболонки, супроводжується одночасним інтенсивним відводом тепла за рахунок маси холодного виробу, викликає утворення мікротріщин у поверхневих шарах. Тріщиноутворення тим значніше, чим нижча міцність поверхневих шарів основи. Це погіршує з'єднання шару, що наноситься з основним металом.

Електроіскрова обробка виконується профільованими або непрофільованими електродами. Для електроіскрового зміцнення використовують електроди на хромовій основі (ферохромові, хромо-марганцеві) та з чистого хрому. У такому разі досягаються максимальна глибина і висока твердість зміцненого шару. При використанні тврдосплавних або металевих електродів утворюється твердий, зносостійкий поверхневий шар, але більшої товщини (до 0,12 мм), у результаті чого збільшуються розміри виробу, при використанні електродів із графіту не виникає збільшення габаритних розмірів виробу, зберігається вихідна шорсткість зміцнюваної поверхні, але не забезпечується виконання підвищених вимог стосовно твердості і зносостійкості зміцненого шару, який утворено у результаті одночасного насичення вуглецем та загартування. Рекомендації щодо вибору матеріалів електрода наведено в табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Рекомендації по вибору матеріалу зміцнювального електрода

Зміцнювальні вироби	Матеріал електрода, що зміцнює, та його марка	Експлуатаційні особливості
Розгортка, зенкери, свердла, протяжки, фрези та інший різальні інструменти	Графіт ЕГ-2, ЕГ-4 Твердий сплав ВК-2, ВК-3	Зберігає задані кресленням розміри і шорсткість поверхні інструментів. Після зміцнення потребує фінішного шліфування
Інструменти для вимірювання, деталі з підвищеними вимогами точності	Графіт ЕГ-2, ЕГ-3, ЕГ-4, КП-6	Зберігає первинні геометричні розміри і форму обробленої поверхні
Пуансони, матриці, кондукторні втулки, втулки напрямних колонок, адентори протяжних верстатів	Твердий сплав ВК-3, ВК-8, Т15К6, Т60К6, Т30К4	Можливе багаторазове відновлення з наступним шліфуванням

Інструменти і деталі машин, що працюють в умовах високих контактних напруг і абразивного зношування	Твердий сплав Т15К6. Хром Хр5, Хр6. Білий чавун	Те саме
Подавальні та затискні цанги, деталі типу вал – підшипник	Литий карбід вольфраму	Те саме

За відсутністю пластинок потрібної форми та розмірів, а також для більш повного використання твердого сплаву можливе використання електродів, виготовлених напайкою або приварених твердосплавних пластинок до сталевій державки.

Робоча частина електрода повинна мати форму конуса або піраміди, з затушеною верхівкою радіусом 1,6...2,0 мм, що сприяє отриманню якісної поверхні зміцненого шару. У табл. 2.13 наведено режими електроіскрового зміцнення технологічного устаткування.

2.3.6. Зміцнення методами хімічного осадження із розчинів

Фосфатування. Нанесення фосфатної плівки здійснюють з метою захисту від корозії та підвищення стійкості поверхонь різального інструмента типу протяжок, розгорток, фрез, довб'яків, різців, свердел, зенкерів, плашок, мітчиків, деталей машин та механізмів, що працюють на стирання. Технологія підготовки деталей до фосфатування приведена в табл. 2.14.

Обладнання для нанесення фосфатної плівки таке: ванна для знежирювання, ванна для дворазової промивки, ванна для обробки в маслі, шафа для сушки.

Склад розчинів для фосфатування наведено у табл. 2.15.

З метою підвищення захисних властивостей фосфатної плівки, нанесеної на поверхню інструментів, здійснюють спеціальну обробку, технологія якої наведена в табл. 2.16.

Сталеві деталі можна знежирювати в розчині, який має склад (г/л): пірофосфорнокислий натрій 20 ± 5 ; технічна кальцинована сода 10 ± 2 ; кремнекислий натрій 8 ± 1 . Режим обробки: температура 60 ± 10 °С, час обробки 15 ± 2 хв.

Сильно забруднені деталі знежирюють у розчині, що має склад (г/л): технічний їдкий натр 80 ± 10 ; технічна кальцинована сода 60 ± 10 ; тринатрійфосфат 35 ± 5 ; натрієве рідке скло 15 ± 5 ; сульфаноол НП-3 $15 \pm 1,5$. Режим обробки: температура 85 ± 10 °С, час 15 ± 2 хв.

Захисне покриття кріпильних деталей низькотемпературним фосфатуванням. Перед фосфатуванням деталі піддають електрохімічному знежирюванню, промиванню в гарячій і холодній воді і декапіюванню у

розчині соляної кислоти 1:1. Склад розчину фосфатування (г/л): 35...60 солі; 60...80 нітрату цинку; 3...4 фториду натрію. Температура розчину 50...60 °С; час обробки деталей 20 хв.

Після фосфатування на поверхні деталей утворюється дрібно-кристалічна фосфатна плівка світло-сірого або сірого кольору, що відзначається корозійною стійкістю.

Таблиця 2.13

Режими електроіскрового зміцнення технологічної оснастки

Технологічна оснастка		Електрод			Режим обробки		Зміцнювана поверхня		
Найменування	Сталь	Матеріал	Марка	Діаметр	Струм короткого замикання	Робочий струм, I_p , А	Товщина нанесеного шару, мм	Суцільність покриття, % площі	Параметри шорсткості, R_a , мкм
Різці, свердла, зенкери, фрези, розгортки, протяжки	P9, P18, P6M5	Вуглі спектральні, графіт Твердий сплав	ВГ-3	4	3,6...4,4	1,2...1,5	0,001	80	2,5
			ЕГ-2	4					
			ЕГ-4	3					
			ВК-2 ВК-3						
Штампи для холодного і гарячого штампування гнуті, витяжні	У8, У8А, У10, У10А, У12, ХВГ, 5ХНМ	Ферохром. Твердий сплав.	ФХ100Н	4	3,9...4,7	2,0...2,5	0,1	80	2,5
			ВК-8 Т15К6	4					
Затискні цанги; цанги, що подають вкладки; кондукторні втулки; втулки напрямних колонок	65Г, 60Г, 60С2А	Ферохром. Твердий сплав.	ФХ100Н Т15К6	4	3,6...4,4	1,2...1,5	0,01	70	2,5

Таблиця 2.14

Підготовка до фосфатування

Операція	Склад розчину		Режим обробки	
	Компоненти	Кількість, г/л	Температура, °С	Витримка, хв
Знежирювання	Гас	81	18...25	3...4
	Олеїнова кислота			
	Триетиламін	6,6	18...25	3...4
	Тракрезол	3,4	18...25	3...4
		9,0	9,0	3...4
Дворазове промивання	Проточна вода	–	80...90	1...2
Промивання	Непроточна дистильована вода	–	80...90	15

Таблиця 2.15

Склад розчину для фосфатування та режим обробки

Вміст у воді, г/л			Режим обробки	
Zn(H ₂ PO ₄) ₂	Zn(NO ₃) ₂	H ₃ PO ₄	Температура, °С	Витримка, хв
40	55	15	93...98	10...15
40	58	2	94...96	29

Таблиця 2.16

Технологія обробки фосфатної плівки

Операція	Середовище	Режим обробки	
		Температура, °С	Витримка, хв
Дворазове промивання	Проточна вода	80...90	1...1,5
Сушка	Повітря	80...90	3...4
Обробка у маслі	Масло 7–12	100...115	3...4
Підсушка для стікання зайвого масла	Повітря	Кімнатна	3...4

Для приготування розчину розрахункову кількість солі «Мажеф» засипають в окрему ємність, заливають гарячою водою (температура 80...90 °С) і витримують протягом 2...3 год. Потім розчин зливають у робочу ванну. В окремих місткостях розчиняють розрахункову кількість нітрату цинку і фториду натрію. Отримані розчини також зливають в робочу ванну.

У приготованому для фосфатування прозорому розчині обробляють випадкові деталі для отримання мутного розчину. Загальна кислотність розчину повинна складати 70...100 точок⁶, а вільна 5...10 точок.

Коректування розчину для фосфатування здійснюють по кислотності із розрахунку на одну точку 1 г/л солі «Мажеф» і 3 г/л нітрату цинку. Фторид натрію додають два рази на тиждень із розрахунку 3 г/л.

Хімічне фосфатування з наступним просякненням дисульфідмолібденовим мастилом ВНІНП – 229 виконують у розчині, що має такий склад (г/л): 35 нітрату цинку; 15 ортофосфорної кислоти. Температура розчину 98...95 °С, час витримки 5 хв. Перед фосфатуванням поверхню знежирюють. Потім на нагрітий до 100 °С фосфатований інструмент наносять дисульфід-молібденове мастило ВНІНП–229 і витримують його в електрошафі 2...3 год за температури 150...200 °С.

Можна здійснювати одночасно знежирювання, травлення та фосфатування. Технологічний процес при цьому здійснюють у такій послідовності: у розчин на основі препарату «Мажеф» вводять нітрат цинку як прискорювач, борну кислоту для забезпечення стабільності розчину і збільшення міцності плівки, оксалат цинку для зменшення шламоутворення і нітрат кальцію для надання плівці мікрокристалічності і підвищення еластичності покриття.

Склад розчину (г/л): препарат «Мажеф» 100±10; нітрат цинку 240±25; фосфат однозаміщеного амонію 60±5; борна кислота 30±2; сульфанол НП 32±0,5; нітрат кальцію 3,5±0,5; оксалат амонію 0,15±0,02; сталева стружка (сталі 30, 40, 50) 5±1. Режим обробки: температура 50±2°С; час витримки 20±5 хв; загальна кислотність точок 190...210; вільна кислотність точок 12...18; співвідношення загальної кислотності до вільної 11...15; корозійна стійкість фосфатної плівки 10...12 хв.

Розчин для одночасного знежирювання, травлення і фосфатування готують у демінералізованій конденсаційній або пом'якшеній воді (останню готують добавкою 2...2,5 г/л вуглекислої соди до водопроводної води, кип'ятінням протягом 1...15 год, відстоюванням і знешкодженням опадом).

Спосіб приготування має суттєвий вплив на шламоутворення, довговічність розчину і корозійну стійкість покриття. Основний об'єм заповнюють на 1/2 об'єму водою, розчиняють розраховану кількість фосфата однозаміщеного амонію, сульфанола НП-3 і сталеві стружки. Потім розчин підігрівають до 60 °С і витримують протягом трьох год. В окремій ємності нітрат цинку змішують з препаратом «Мажеф», змочують водою і залишають на 3...4 год. Після цього суміш нітрату цинку із

⁶ 'кількістю точок називають кількість мл 0,1 н. розчину, необхідного для титрування 10 мл фосфатуючого розчину в присутності фенолфталеїну.

препаратом «Мажеф» розташовують в основній ємності, додають розрахункову кількість борної кислоти, нітрату кальцію і оксалату амонію. Розчин доводять до робочого об'єму, нагрівають до 50 °С протягом одної год. Після прогріву розчину визначається загальна і вільна кислотність, які повинні становити 190...210 та 12...18 відповідно.

Технологічний процес під час одночасного знежирювання, травлення й фосфатування здійснюють в такій послідовності. Монтаж деталей на підвіски або завантаження у барабан, обробка їх у кип'ячій воді з витримкою 4...5 хв (при незначному забрудненні); попередня очистка у розчині з тринатрій-фосфатом та мильним спиртом; фосфатування у розчині з одночасним знежирюванням, травлення і фосфатування при 50...55 °С з витримкою 20 хв; миття фосфатованих деталей у теплій проточній воді при 50...60 °С, потім у гарячій проточній воді при 70...80 °С три-, чотириразовим занурюванням; сушка гарячим стисненим повітрям. Температура 70...80°С, тривалість витримки 8...10 хв; просякнення маслом. Для просякнення деталей з метою збільшення антикорозійних властивостей використовують УКРІНОЛ-П концентрацією 40...100 г/л. Температура 65...75 °С, час обробки 3±1 хв.

При наявності на деталях сильних забруднень (масний металевий пил, окалина, іржа і т. ін.) здійснюють попередню очистку у розчині тринатрійсульфату (50±5 г/л) і мильного спирту (4±1 г/л) при температурі 50±5°С; час обробки 8±2 хв.

Технологія дозволяє скоротити тривалість обробки сталевих деталей у 2,5...3 рази, зменшити кількість операцій, при цьому скорочуються витрати води, електроенергії та матеріалів приблизно у 2,5 рази.

Нікель-фосфатування. Покращення різальних якостей і стійкості інструментів забезпечується покриттям їх елементів із швидкорізальних сталей зносостійкими плівками нікель-фосфату. Виконують це методом хімічного осадження плівки в аміачно-нікелевій ванні, що має такий склад (г/л): хлорид нікелю 30; гіпофосфат натрію 10; хлорид амонію 100. Для підтримання кислотності у межах рН 8...9 добавляють аміак. Процес хімічного осадження здійснюють у ванні, при температурі 85 °С протягом 30 хв на поверхні різального інструмента осаджується шар нікель-фосфору, що має товщину 5 мкм.

Технологічний процес нанесення покриття здійснюється у такій послідовності: промивання і знежирення хімічним способом, хімічне осадження нікель-фосфорного покриття, термічна обробка інструменту з нанесеним нікель-фосфорним покриттям, нагрів до температури 400...450 °С з наступним охолодженням на повітрі.

Нікель-фосфорне покриття зменшує силу тертя під час різання, різко зменшує температуру різання, полегшує вихід стружки, забезпечує високу

стійкість інструмента. Висока твердість різальної кромки інструмента HRC 65...68 зберігається при температурі вище 600 °С. Особливо ефективно покриття для зміцнення та відновлення інструментів складної геометричної форми, перезаточку яких виконують по задній поверхні (наприклад, свердла діаметром 8...35 мм).

Нікель-бурвання. Застосовують для підвищення зносостійкості, твердості та корозійної стійкості металу. Виконують у розчині, який має склад (г/л): хлорид нікелю 80...100; етилендіамін 114...120; їдкий натр 40...50; боргідрид натрію 0,8...0,9; фенатромін 0,02...0,25. Покриття майже безпористі при товщині шару 5...7 мкм.

Нікель-кобальт-фосфатування. Застосовується з метою підвищення зносостійкості й антифрикційних якостей сталевих деталей складної конфігурації, що працюють в умовах тертя, при підвищених температурах (прес-форми, мірний інструмент, поршні тощо).

Шорсткість поверхні прес-форми, на яку наносять нікель-кобальт-фосфорне покриття, повинна бути $R_a = 0,040...0,32$ мкм. Технологічно операції по нанесенню нікель-кобальт-фосфорного покриття виконують у такій послідовності:

1. Хімічне знежирювання в лужному розчині такого складу (г/л): їдкий натр 45 ± 5 ; кальцинована сода 65 ± 5 ; тринатрійфосфат 25 ± 5 ; скло натрієве рідке 7 ± 2 . Температура 70 ± 5 °С, тривалість обробки 30 ± 3 хв.

2. Промивання у гарячій (70–80 °С) проточній воді.

3. Промивання у холодній проточній воді.

4. Знежирювання оксидом магнію. Оксид магнію змішують з холодною водою до консистенції негустої «кашки» і волосяною щіткою ретельно протирають прес-форми до повного змочування поверхні.

5. Промивання у холодній проточній воді до повного видалення оксиду магнію.

6. Сушіння прес-форми гарячим (70...80 °С) стиснутим повітрям, якщо наступною операцією буде ізолювання непокритих ділянок. Якщо ж прес-форма піддається обробці повністю, то сушка виключається. Ізолювання ділянок поверхні прес-форми, не підданих покриттю, здійснюють емаллю ХВ-124, яку наносять пензлем. Сушіння при температурі до 20 °С протягом 30 хв, потім 2 год за температури 80...120 °С.

7. Електрохімічне знежирювання на катоді у лужному розчині, що має склад (г/л): їдкий натр 30 ± 5 ; тринатрійфосфат 20 ± 5 ; кальцинована сода 30 ± 5 ; скло натрієве рідке 10 ± 5 . Температура 70 ± 5 °С; щільність струму 7 ± 3 А/дм²; тривалість обробки 5 ± 1 хв. Анодами при знежирюванні є пластини з катодного нікелю Н-2. Склад лужних розчинів для хімічного та електрохімічного знежирювання контролюють не рідше одного разу на тиждень при однозмінній роботі.

8. Промивання у гарячій (70...80 °С) проточній воді.

9. Промивання у холодній проточній воді послідовно у двох ваннах. Зміну води у ваннах здійснюють із швидкістю 0,7...1 об'єму на годину. Очистку ванн необхідно здійснювати не рідше одного разу на місяць.

10. Декапіювання у розчині сірчаної кислоти (100 г/л). Температура 23 ± 3 °С, тривалість 2 хв.

11. Промивання у холодній дистильованій воді послідовно у двох ваннах.

12. Нанесення хімічного нікель-кобальт-фосфорного покриття. До складу розчину входять такі компоненти (г/л): хлорид нікелю 15; сульфат кобальту 15; лимонна кислота 20; хлорид амонію 50; їдкий натр 50; гіпофосфіт натрію 20. Температура 85 ± 2 °С, рН розчину 9...10, щільність завантаження 1 дм²/л.

Для отримання нікель-кобальт-фосфорного покриття товщиною більше 18 мкм осадження здійснюють у стаціонарній ванні з переносом прес-форми через годину із розчину, що відпрацьований, до свіжовиготованого або відкорегованого за показниками хімічного аналізу. Потім осаджується плівка нікель-кобальт-фосфору такого складу (%): нікель 70...75; кобальт 10...15; фосфор 10...15.

Ванна для хімічного нікель-кобальт-фосфорного покриття прес-форм може бути виготовлена із кераміки, порцеляни, скла.

13. Промивання у проточній воді нормальної температури.

14. Промивання у гарячій (70...80 °С) проточній воді.

15. Сушіння гарячим (70...80 °С) стиснутим повітрям.

16. Термічна обробка.

Прес-форми, покриті сплавом нікель-кобальт-фосфор, використовують для пресування пластичних мас та гуми.

Якість фосфатної плівки визначається щільністю, зернистістю, шорсткістю, захисними властивостями і корозійною стійкістю. Покриття повинне бути щільним, гладким, мілко-зернистим; колір плівки може бути від світло-сірого до чорного. Не допускається наявність корозії і нальоту, що залишає сліди на руках або серветці. Після фосфатування всю партію деталей піддають зовнішньому огляду.

Хімічне нікелювання. Осадок хімічного нікелю відновлюють із розчину, що має 30 г/л сульфату нікелю; 10 г/л ацетату натрію; 2мл/л оцтової кислоти; хрому свинцю – до насичення. Кислотність розчину рН 4,2...4,8; температура 90...92 °С; щільність завантаження 1дм²/л. Швидкість осадження опадку 6...9 мкм за 30...40 хв; товщина покриття 15...18 мкм. Після нікелювання інструмент піддають термообробці протягом години при температурі 350...400 °С.

Якщо у розчин, що містить нікель, ввести мілкодисперсні тверді речовини типу алмазу, карбіду хрому, ванадію тощо, то при відновленні нікелю суспензії утворюється комплексний осадок, що має високу зносостійкість. Так, наприклад, покриття алмазним порошком, що закріплюється хімічно осаджуванним шаром нікелю, застосовують для зміцнення кілець газових турбін і насосів високого подавання, фрикційних дисків, шнеків, робочих поверхонь калібрів.

Метод хімічного нанесення шару дозволяє точно контролювати його товщину. Застосування у цьому разі нікель-фосфорні сплави можуть бути після нанесення піддані термічній обробці, що забезпечує підвищення твердості до HV 1000. Рекомендовані параметри алмазного захищеного шару: об'єм, що містить алмаз 20...25 % (допустимо до 40 %); товщина шару покриття 20...25 мкм; твердість нікелевої основи HV 1000...1200; коефіцієнт тертя 0,08...0,2 на синтетичному волокні.

Зносостійкість металевих прес-форм, за допомогою яких виготовляють вироби із пластмаси, бакеліту, фарфору і електрофосфору, підвищують хімічним нанесенням багат шарового композиційного покриття, в якому перший шар являє собою хімічне нікелеве покриття, а наступні – нікель, що містить оксиди, карбіди, метали, алмазний порошок, бориди, нітриди тощо. Так, наприклад, для поліпшення приробки інструмента у зовнішніх шарах здійснюють осаджування більш м'яких компонентів, наприклад електрокорунду, а у внутрішніх – більш твердих, наприклад карбіду бору. Після нанесення всіх шарів покриття піддають термічній обробці при 200...750 °C 15 хв ... 48 год.

Зносостійкість багат шарових покриттів вища, ніж одношарових. Зношене покриття може бути зняте хімічним способом і після попередньої підготовки поверхні відновлене.

Епіламіювання. Застосовують з метою підвищення стійкості поверхонь деталей машин, механізмів і особливо для збільшення стійкості інструментів всіх типів, що використовують при різанні металів, штампуванні, витяжці, прокочуванні, пресуванні, у тому числі деталей з органічних матеріалів, а також при формуванні та вулканізації деталей з гуми і каучуку. Масла, внесені в епіламіювані вузли тертя, міцно утримуються в їх робочій зоні.

Епіламіювання виконують в епіламуючих складах, які являють собою поверхнево-активні речовини, що зменшують кількість поверхневої енергії, ступінь адгезії контактуючих матеріалів, локалізують поверхневі мікротріщини і обмежують можливість їх зростання. Основна особливість речовин цього класу – висока адсорбційна здатність, у результаті якої на оброблюваній поверхні утворюються розподільчі бар'єрні плівки з дуже низьким запасом поверхневої енергії – епіками. Вони являють собою

розчин високомолекулярних поверхнево-активних речовин, що містять фтор у розчинах. Із розчину вони адсорбуються на поверхні у вигляді мономолекулярного або близького до нього за своїми властивостями шару, що різко знижує мікротвердість поверхневого шару і, отже, поверхневу напругу й запас енергії. Зносостійкість різального інструмента та інструмента для обробки металу тиском підвищується до 20 разів. Зношування поверхонь тертя знижується від 2 до 40 раз.

Зміцнення твердими мастилами. Застосовується з метою підвищення стійкості різальних, волочильних та інших інструментів. Так, наприклад, стійкість покритих твердим розчином фрез збільшується у 2,65 разу, свердл – 1,6 разу, мітчиків – 2,76 разу, твердосплавних пластин – у 1,5 разу.

На стабільність отримуваних результатів суттєвий вплив мають геометрія інструмента, наявність або відсутність мастильно-охолоджувальних речовин, метод нанесення покриття. Склад покриття на основі фосфату алюмінію та триоксиду хрому, в яких містяться субмікронні частки дисульфату молібдену наведений в табл. 2.17.

Таблиця 2.17

Склад молібденових твердих мастил для зміцнення інструментів

Компоненти	Кількість компоненту, %	
	1	2
Розчин моно фосфату алюмінію (52 %)	24,7	12,35
Триокис хрому	1,3	0,65
Дисульфід молібдену	20,0	20,0
Алкіновий фенол-поліглюколовий спирт	0,4	0,4
Вода	53,6	66

2.4. Хіміко-технічні методи зміцнення металевих поверхонь

2.4.1. Цементация

Цементация – хіміко-термічна обробка, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталі вуглецем при нагріванні у відповідному середовищі – карбюризаторі. Після цементации проводиться термічна обробка – загартування та низький відпуск.

Призначення цементации та термічної обробки – надання поверхневому шару високої твердості, теплостійкості, зносостійкості, підвищення межі витривалості.

Цементации піддають низьковуглецеві сталі (15, 20, 15Х, 15ХФ, 18ХГТ, 25ХГТ, 18ХНМА, 30ХГМ, 20ХНМ, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА та ін.), в яких після цементации та загартування утворюється в'язка серцевина.

Цементацию деталі здійснюють після механічної обробки, включаючи в деяких випадках і шліфування. Припуск на обробку для не шліфованих деталей приймається 0,2 мм і більше, а для шліфованих – 0,05...0,15 мм.

Перед цементацией деталі очищають від окалини, жиру, бруду та ін. Нерідко цементации піддають тільки частину деталі. В індивідуальному та дрібносерійному виробництві на місцях, що не піддаються цементации, залишають припуск, величина якого в 1,5...2 рази перевищує глибину шару цементации. У масовому та великосерійному виробництві місця, що не підлягають цементации, захищають електролітичним обмідненням (товщина шару міді 40...60 мкм). Нерідко застосовують протицементацийні замазки, азбестові або металеві чохлаи.

Цементацию, як правило, здійснюють при температурі вище точки $A_{с3}$ (930...950 °С), при якій аустеніт стійкий і може розчиняти у великій кількості вуглець. За цієї температури дифузійний шар складається тільки з аустеніту, а після повільного охолодження – із продуктів його розпаду: фериту та цементиту. Концентрація вуглецю при цьому звичайно не досягає межі насичення за даної температури.

У структурі цементованого шару концентрація вуглецю за глибиною змінюється і зменшується від поверхні до серцевини деталі. Після повільного охолодження в його структурі можна розрізнити (від поверхні до серцевини) три зони: заевтектоїдну, що складається із перліту і вторинного цементиту, що утворюють сітку по колишньому аустеніту (заевтектоїдна зона у цементованому шарі часто відсутня); евтектоїдну, що складається з одного пластинчастого перліту; фериту. Кількість фериту у доевтектоїдній зоні безперервно зростає по мірі наближення до серцевини.

Глибина цементованого шару для деталей, що виготовляють зі сталі, яка вміщує не більше 0,17 % С, становить 15 % від найменшої товщини або діаметра цементованого розтину. За наявності у сталі більше 0,17 % вуглецю глибина шару знижується до 5...9 %, а для виробів, що працюють на зношування і не мають великих питомих навантажень, – 3...4 % від найменшої товщини або діаметра цементованого розтину. Часто товщина шару 0,5...1,6 мм.

Концентрація вуглецю у поверхневому шарі, залежно від призначення деталі, становить 0,7...1,25 %.

У випадках цементации сталей, легованих карбідоутворюючими елементами, за температурою дифузії утворювались двофазний шар аустеніту та карбіди, що мають глобулярну форму.

У цьому разі середня концентрація вуглецю на поверхні може перевищувати розчинність вуглецю в аустеніті при даній температурі. Концентрація вуглецю в сталях, що вміщують Cr, Mn, W, Mo або V, може

досягти 1,8...2,0 %. Вплив легованих елементів у конструкційних сталях на глибину шару невеликий.

Цементация у твердому карбюризаторі. За цієї операції на дно ящиків засипають шар карбюризатора товщиною 30...40 мм, на нього ставлять перший ряд деталей, витримуючи відстань 10...15 мм між деталями та до бокових стінок ящика. Між рядами деталей по висоті ящика товщина карбюризатора також має бути 10...15 мм. Останній (верхній) ряд засипають шаром карбюризатора 35...40 мм, щоб компенсувати його усадку. Зазори між кришкою та стінками ящика замазують вогнетривкою глиною і просушують. Нерідко ящик завантажують у піч доверху дном. Недоліки цементации твердим карбюризатором:

- непродуктивна витрата енергії на прогрів карбюризатора та ящиків;
- велика тривалість процесу;
- необхідність великих виробничих площ;
- труднощі регулювання процесу;
- неможливість безпосереднього загартування після цементации.

Однак універсальність та простота цементации твердим карбюризатором обумовлюють її широку поширюють, особливо там, де застосовується дрібносерійне виробництво.

Газова цементация. Застосування газової цементации, порівняно з цементацией у твердому карбюризаторі, дозволяє:

- скоротити тривалість процесу в 1,5...2 рази;
- зменшити собівартість виробництва;
- регулювати глибину цементованого шару і вміст вуглецю в ньому;
- механізувати та автоматизувати процес.

Газову цементацию застосовують на заводах масового та великосерійного виробництва, але можна використовувати і в дрібносерійному виробництві. При газовій цементации вироби нагрівають у газовій атмосфері (найчастіше CH_4 , CO , H_2 , CO_2 , H_2O , N_2). Насичення вуглецем сталі здійснюється найчастіше через реакцію розпаду оксиду вуглецю та метану при температурі цементации. Застосування газової цементации дозволяє скоротити тривалість процесу для отримання заданої глибини шару, механізувати і автоматизувати процес.

Досягненням газової цементации є можливість автоматично регулювати склад цементуючого газового середовища для забезпечення заданої концентрації вуглецю на поверхні цементованого шару.

Газову цементацию найчастіше здійснюють в ендотермічній атмосфері в безмуфельних або муфельних печах. Вуглецевий потенціал атмосфери регулюють за вмістом CO_2 або H_2O в атмосфері. Для прискорення процесу

цементациї в 1,5...2 рази використовують комбіновані атмосфери. При цьому цементацию ведуть в атмосфері з високим вуглецевим потенціалом (1,5...2 %), а в кінці процесу — в атмосфері з меншим потенціалом (до 0,7...0,9 %). При проведенні цементациї цим методом необхідно мати на увазі, що вміст вуглецю в поверхневому шарі знижується тільки через вуглець, розчинений в аустеніті. Зниження в аустеніті концентрації вуглецю та легованих елементів, (внаслідок утворення карбідів) призводить до зменшення загартованості, пропікання цементованого шару і погіршення механічних якостей сталі.

Цементация у рідкому карбюризаторі. Висока термічна стійкість і випаровування рідких вуглеводів дозволяють в одному робочому просторі отримати газ і провести цементацию. Цей процес застосовується для цементациї деталей невеликих розмірів. Рідинні карбюризатори повинні забезпечити:

- мінімальне сажо- та коксоутворення;
- утворення великої кількості газу з одиниці маси (об'єму) у процесі його розпаду;
- мінімальний вміст сірчаних сполук, що викликають роз'їдання деталей і арматури печі.

Найменшою схильністю до сажо- і коксоутворення та найбільшим газоутворенням відрізняються карбюризатори, що складаються з парафінових вуглеводів (C_nH_{2n+2}). Наявність у карбюризаторі нафтових (C_nH_{2n}) і ароматичних (C_nH_n) вуглеводів призводить до утворення великої кількості сажі (коксу), що різко уповільнює насичення вуглецем, вимагає очистки печі та деталей і заважає загартуванню у штампах. Найкращі рідинні карбюризатори – спирти (наприклад, бутиловий), спирти у суміші з водою, сінтин, карбофлюїд та інші суміші органічних сполук, наприклад, етанол (C_2H_5OH) і металацетат (CH_3COOCH_3), ацетон (CH_3COCH_3) і пропан (C_3H_8) та ін.

Витрати карбюризатора встановлюють залежно від об'єму робочого простору печі виходячи з того, що площа поверхні цементованих деталей має бути пропорційна масі осідання.

При індивідуальному виробництві інколи застосовують цементацию у пастах. Деталі покривають шаром пасти завтовшки 3...4 мм, завантажують в ящики, кромки яких замащують глиною. Процес ведуть за 930...950 °С протягом 1,5...3,0 г для отримання шару глибиною 0,6...1,0 мм.

Для прискорення процесу температуру газової цементациї інколи підвищують до 1000...1050 °С.

Остаточних властивостей цементовані вироби набувають у результаті термічної обробки, яку виконують після цементациї. Це роблять з метою виправлення структури, подрібнення зерна серцевини і цементованого

шару, отримання високої твердості цементованого шару та добрих механічних властивостей серцевини, вилучення карбідної сітки у цементованому шарі, яка може виникнути при пересиченні його вуглецем.

У результаті термічної обробки поверхневий шар має структуру мартенситу або мартенситу з невеликою кількістю надлишків карбідів. Твердість шару для вуглецевої сталі – HRC 60...64, а для легованої сталі – HRC 56...61. Зниження твердості пояснюється підвищеним вмістом залишкового аустеніту.

2.4.2. Азотування

Азотування – хіміко-термічна обробка, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару азотом способом нагрівання у середовищі, що містить аміак.

Азотування застосовується для підвищення поверхневої твердості та зносостійкості, підвищення межі витривалості, а також корозійної та ерозійної стійкості різних виробів (металорізальних інструментів, колінчастих та кулачкових валів, важелів керування, шестерень, шпинделів, деталей насосів, шнеків, циліндричних насосів).

Азотуванню можуть піддавати будь-які сталі. Найчастіше азотують конструкційні сталі: 30X, 40X, 40XФА, 20X3МВФ, 30X3МФ1, 38ХНМФА, 40ХГМ, 20X3ВА, 20ХН2МФ, 18Х2Н4ВА. Азотують корозійностійкі жароміцні сталі, інструментальні і штампувальні сталі (Р18, Р9, Х12М, Х6ВФ, 5ХНМ, 5ХНТ, 40ХСМФ, 4Х5МФС та ін.).

Технологічний процес виконується у такій послідовності:

1. Попередня термічна обробка заготовки. Ця операція складається із загартування і високого відпуску сталі для отримання підвищеної міцності і в'язкості у серцевині виробу.

Загартування сталі 38Х2МЮА виконують з нагрівом до 930...950 °С з охолодженням у воді або у маслі. Відпуск здійснюють за високої температури 600...675 °С, що перевищує максимальну температуру послідовного азотування і забезпечує отримання твердості, при якій сталь можна оброблювати різанням. Структура сталі після цього відпуску – сорбіт.

2. Механічна обробка деталей, включаючи шліфування, яке надає остаточних розмірів,

3. Загартування ділянок, що не підлягають азотуванню. На них наносять тонкий шар (0,01...0,015 мкм) олова електrolітичним методом або рідинного скла. Олово за температури азотування розплавляється на поверхні сталі у вигляді тонкої плівки, через яку проникає азот.

4. Азотування.

5. Остаточне шліфування або доводка виробу у відповідності із заданими допусками.

Азотування тонкостінних виробів складної конфігурації рекомендують виконувати за температури 500...520 °С. Тривалість процесу залежить від заданої товщини азотованого шару: при великій твердості і невеликій товщині шару рекомендують застосовувати низьку температуру; за великої товщини та малої твердості – більш високу температуру; при великій товщині і високій твердості застосовують двоступеневий режим спочатку при 500...520 °С, а потім при 540...580 °С. При двоступеневому режимі скорочується тривалість процесу, при цьому зберігається висока твердість азотованого шару. Охолодження після азотування здійснюють разом з піччю у потоці аміаку (до 200 °С), щоб запобігти окисленню поверхні.

Азотування ведуть у шахтних печах з примусовою циркуляцією газу і максимальною робочою температурою до 700 °С. Шахтні печі випускаються з двома змінними муфелями або одним стаціонарним. Герметичність муфеля перевіряють пропусканням через нього аміаку під тиском 3,5...5,0 кПа. Контроль газового середовища у печі ведуть за допомогою газового манометра, дисоціометра і лічильника для контролю витрат аміаку. Перший муфель після закінчення азотування витягується з печі та охолоджують на повітрі, потім у піч завантажують другий муфель з деталями.

Азотовані деталі піддають зовнішньому огляду, визначають величину жолоблення, вимірюють поверхневу твердість.

Рекомендовані режими азотування інструментальних сталей наведені у табл. 2.18.

Таблиця 2.18

Режими азотування сталей

Сталь	Режими азотування		Поверхнева твердість, HV ₁₀₀	Глибина шару, мм
	Температура процесу, °С	Тривалість, год		
P9, P18	510...520	0,25...1	1300...1410	0,01...0,025
X12Ф1	510...520	25	900...1000	0,15...0,2
3X3B8Ф	550...560	65	700...750	0,45...0,55
18X2H4MA	490...510	45...50	750...850	0,35...0,4
30X3MФ	560	24	900...950	0,5
30XH2MФА	510 – для першого ступеня	25	750	0,5...0,6
	540 – для другої	35		
40XH2MA 38X2H2MA	500...520	50...60	650...700	0,5...0,6

38ХНЗМФА				
30ХЗМФ	500...525	60...80	750...800	0,35...0,55

Іонне азотування здійснюють у розрідженій азотній атмосфері при підключенні оброблюваних деталей до від'ємного електрода (катода). Анодом є контейнер пристрою. При обробці деталей складної конфігурації застосовують спеціальні профільовані аноди. Між катодом (деталлю) і анодом збуджується тліючий розряд, і іони газу, бомбардуючи поверхню катода, нагрівають її до температури насичення. Процес іонного азотування має дві стадії: перша – очищення поверхні катодним розпиленням; друга – саме насичення.

Катодне розпилення здійснюють протягом 5...60 хв за напруги 1100...1400 В і тиску 0,1...0,2 мм. рт. ст. У процесі катодного розпилення температура поверхні деталі не перевищує 250 °С. Температура азотування 470...580 °С, тиск 1...10 мм. рт. ст., робоча напруга 400...1100 В, тривалість процесу складає від 1 до 24 год.

Іонне азотування застосовують для обробки різних сталей і сплавів: інструментальних, мартенситно-старіючих, хромистих і хромонікелевих сталей, нітралоїв, чавунів тощо.

Азотування у рідинних середовищах – дифузійне насичення сталі одночасно азотом і вуглецем при температурі, як правило, 560...580 °С у розплаві, що містить ціаніди.

Дифузійний шар складається з двох зон:

- 1) поверхневої – в основному із ϵ -фази $(Fe, Me)_3(NC)$;
- 2) дифузійної – з азотистого α -розчину, нітриду заліза $(Fe, Me)_4N$ (j -фази) і вихідних карбідів.

Інтенсифікувати процес азотування можна ультразвуком, наприклад, при впливі ультразвукових коливань частотою 10...22 кГц та інтенсивністю 12 Вт/см² на процес рідинного азотування сталі 35ХЮА у нейтральній соляній ванні (13 % $BaCl_2$ + 48 % $CaCl_2$ + 21 % $NaCl$) з пропусканням через неї аміаку за температури 540–560 °С збільшується загальна товщина азотованого шару на 40 %. Глибина шару з мікротвердістю, що дорівнює 4000 МПа, збільшується на 70 %. Зносостійкість при цьому збільшується майже у два рази порівняно з виробами, цементованими без ультразвуку.

Можна здійснювати азотування одночасно з лазерним опроміненням. Так, наприклад, обробка поверхні титанового сплаву лазером у струмені азоту веде до утворення у сплаві шару нітриду титану товщиною п'ять мкм і шару твердого розчину азоту у титані товщиною близько 150 мкм. Потім оброблена поверхня піддається поверхневому пластичному деформуванню для зниження шорсткості. Отримані параметри процесів лазерної обробки і поверхневого пластичного деформування беруть за мінімальної шорсткості

азотованої поверхні, відсутності тріщин і зменшення залишкових напруг. Деталі із титанових сплавів, які оброблені за вказаною технологією, добре працюють в умовах тертя.

2.4.3. Нітроцементация

Нітроцементация – процес дифузійного насичення поверхневого шару сталі одночасно вуглецем та азотом у газовому або рідинному середовищі, що складається з насиченого вуглецем газу й аміаку. Основне призначення нітроцементации – підвищення твердості та зносостійкості сталевих виробів, а також поліпшення їх механічних властивостей.

Встановлено, що при одночасній дифузії вуглецю та азоту прискорюється дифузія вуглецю. Швидкість зростання нітроцементованого і цементованого шарів на глибину 0,5 мкм майже однакова, незважаючи на те, що температура нітроцементации майже на 100 °С нижча. Товщина нітроцементованого шару звичайно дорівнює 0,2...1,5 мм. Тривалість процесу 4...10 год.

Для нітроцементации легованих сталей рекомендується використовувати ендотермічну атмосферу, до якої додають 2,5...5,5 % необробленого природного газу і 2,0...3,5 % NH₃. Замість ендогазу інколи застосовують екзоендотермічну атмосферу, яка містить 20 % H₂, 20 % CO і 60 % N₂, що підвищує опір крихкому руйнуванню і межу витривалості оброблюваних виробів. Процес здійснюється у шахтних та ретортних шнекових печах. У шахтних печах нерідко застосовують рідинний карбюризатор – триетаноламін, який у вигляді крапель вводять у робочий простір печі.

Після цементации застосовують загартування безпосередньо із печі з підхолодженням. Після повторного нагріву застосовують ступеневе загартування. Після загартування проводять відпуск.

При оптимальних умовах насичення структури нітроцементованого шару мають складатися з дрібнозернистого мартенситу, невеликої кількості дрібних рівномірно розподілених карбонітридів і 20...30 % залишкового аустеніту.

Твердість шару після загартування і низького відпуску становить HV 570...590. Висока місткість залишкового аустеніту забезпечує добре припрацювання, наприклад, автомобільних шестерень, що не шліфуються, для забезпечення їх безшумної роботи. Максимальні показники міцності досягаються тільки при оптимальному для даної сталі вмісті вуглецю та азоту на поверхні нітроцементованого шару. Азоту в шарі має бути не менш тієї кількості, яка знешкоджує шкідливі наслідки внутрішнього окислення ($\geq 0,1...0,15$ %). При високому вмісті азоту (0,4...0,5 %) у шарі

утворюється темна складова. Обидва дефекти мікроструктури знижують межу витривалості при гнутті і контактну міцність. Отриманий вміст вуглецю в сумі C+N залежить від марки сталі та коливається у діапазоні 1,0...1,65 %. При низькій концентрації вуглецю у структурі шару по границях зерен мартенситу з'являється троостит. При високому вмісті вуглецю в сталі, що містить Cг, Mn, Ti, V, утворюються карбонітриди, розміщені переважно по границях зерен у вигляді суцільної або розірваної сітки. Утворення сітки карбонітридів і трооститу знижує межу витривалості, пластичність і в'язкість сталі.

Після нітроцементації здійснюється такий контроль деталей: зовнішній огляд для виявлення слідів окислення, закоксування, сколів та ін.; вибірковий контроль твердості і крихкості шару; контроль складу газів у печі; контроль витрат газу; контроль витрат рідких карбюраторів.

Нітроцементації звичайно піддають деталі складної конфігурації, схильні до жолоблення, наприклад деталі автомобілів, тракторів, металорізальний інструмент та ін.

2.4.4. Борування

Борування – хіміко-термічне зміцнення поверхневого шару заліза, за якого здійснюється його дифузійне насичення бором у нагрітому середовищі.

Борування застосовують для підвищення зносостійкості деталей машин та механізмів, особливо для тих, що працюють в агресивних і абразивних середовищах, а також при підвищених температурах. Поверхневий шар, насичений бором, відзначається підвищеною корозійною стійкістю, теплостійкістю, високою твердістю, стійкістю проти зношування.

Боруванню можуть бути піддані будь-які сталі, але частіше цей спосіб застосовують для низьковуглецевих сталей.

Боровий поверхневий шар має характерну «голчасту» будову. Його складові частини – бориди FeB і Fe₂B. Під шаром боридів розміщений перехідний шар, що складається з α-розчину бору у залізі. На легованих сталях під шаром суцільних боридів утворюється зона α-розчину, боридів, заліза і легованих елементів.

Борування застосовують для зміцнення поверхонь, що працюють переважно на зношування: металорізальні інструменти, прес-форми, деталі роздрібнювальних і для миття під тиском машин, витяжні і згинальні штампи тощо. Стійкість вказаних деталей після борування зростає у 2...10 разів.

Недоліками поверхонь, що піддані боруванню, є викришування при експлуатаційних температурах, вищих 800 °С, протискування та відколювання боридних шарів високої твердості, які мають більш м'яку основу, труднощі відновлення зношених поверхонь через високу твердість залишків боридних шарів.

При боруванні можуть виникнути зміни розмірів виробів. Тому при виготовленні точних деталей доцільно використовувати борування у такій послідовності: попередня механічна обробка; поліпшення (загартування та низький відпуск); механічна обробка з припуском на доводку; борування; термічна обробка; остаточна механічна доводка (шліфування, полірування) розмірів деталей.

Борування здійснюють у герметичних металевих контейнерах або за допомогою спеціальних пристроїв, що дозволяють виконувати зональне борування великогабаритних деталей спільно з процесом нагріву для термічної обробки.

Вибір боридатора (насичуюче середовище) визначається умовами праці зміцнюваної поверхні деталі (робоча температура, умови навантаження, середовище), екологічними вимогами (токсичність, вибухонебезпечність газів), собітартістю, а також вимогами до борованого поверхневого шару (глибина дифузійного шару, твердість та ін.).

Найбільш поширеними методами борування є борування у порошкоподібних сумішах, електролізне, газове, рідинне борування.

2.4.5. Насичення складними сполуками кремнію, алюмінію, сірки, цинку

Силіціювання – хіміко-термічна обробка, за якої здійснюється дифузійне насичення поверхневого шару кремнієм, як правило, за температури 800...1100 °С у відповідному середовищі.

У силіційованого шару висока стійкість проти корозії у морській воді, у кислотах (H_2SO_4 , HCl , HNO_3 та ін.) при кімнатній та підвищеній температурах, підвищена зносостійкість (після попереднього проварювання за 175...200 °С). При цьому він має порівняно низьку твердість (HV 200...250) і являє собою твердий розчин кремнію у α -залізі. При газовому силіціюванні на поверхні може утворюватися шар впорядкованої сполуки Fe_3Si (α' -фаза), що має високу твердість (HV 700...800). Вміст кремнію в шарі 15...20 %. Силіційований шар крихкий і нерідко пористий. У тих випадках, коли дифузійний шар повинен мати антифрикційні властивості, пористість зберігають, особливо для систем із постійним наповненням мастил. Якщо силіціювання здійснюють для підвищення корозійної стійкості, шар повинен бути щільним. Пористість

ліквідують спіканням. Для цього деталей швидко нагрівають до 1200...1210 °С, дають коротку витримку (10...30 с). Спікання виконують за участю рідинної фази. При дифузії у сталь кремній витискує вуглець із поверхні в глибину. Тому під силіційованим шаром в середньовуглецевих сталях утворюється високовуглецева зона (0,8...1,0 %).

Силіціювання виконують у порошкоподібних, рідинних або газових середовищах.

Алітування – хіміко-термічна обробка, що полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару сталі алюмінієм, як правило, за температури 700...1100 °С у відповідному середовищі: у порошкоподібних сумішах, у ваннах з розплавленим алюмінієм, металізацією з наступним відпалом.

Алітуванню піддають деталі ковшів для розливки, пальники газогенераторних машин, чохла термопар, клапани та інші деталі, що працюють при високих температурах. Алітований шар відзначається високою корозійною стійкістю в атмосфері та морській воді. Твердість алітованого шару (на поверхні) до HV 500.

Алітований шар найчастіше є твердим розчином алюмінію в α -залізі. На поверхні можливе утворення інтерметалідних фаз Fe_3Al , $FeAl$, $FeAl_2$ і Fe_2Al_5 . Збільшення вмісту вуглецю та легованих елементів у сталі гальмує дифузю алюмінію.

У процесі нагріву на поверхні алітованих виробів утворюється щільна плівка оксиду алюмінію Al_2O_3 , яка зберігає метал від окислення. Алітована сталь має високу окалиностійкість (до 850...900 °С).

Сульфідкування – процес насичення поверхневого шару металу сіркою. Сульфідуванню піддають технологічну оснастку, виготовлену з швидкорізальної сталі усіх марок і сталі типу ХВГ і 9ХС з метою поліпшення антифрикційних якостей поверхонь виробів.

Сульфідкування здійснюють у тигельних ваннах. Перед сульфідуванням технологічну оснастку знежирюють.

Після витримки технологічну оснастку охолоджують на повітрі до нормальної температури, обробляють гарячою водою для остаточного знешкодження солі, потім занурюють у підігріте масло, з якого через деякий час виймають і витирають. Поверхня інструмента після сульфідкування сіра. Сполука сірки, що утворилась на поверхні інструмента, у процесі тертя набуває мастильних властивостей. Завдяки цьому зменшуються сили тертя між деталями або стружки об поверхню різального інструмента. Зносостійкість пар тертя та металевого інструмента, підданого сульфідуванню, збільшується.

Цинкування – дифузійне насичення поверхневого шару сталі цинком, як правило, за температури 300...550 і 700...1000 °С у відповідному середовищі. Застосовують з метою підвищення корозійної

стійкості в атмосфері, бензині, маслах і гарячих газах (300...500 °С), що містять сірководень.

У дифузійному шарі на поверхні може утворюватись η -фаза (твердий розчин заліза у цинку), далі шар інтерметалідних фаз FeZn_{13} , FeZn_7 , $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ і твердий розчин цинку у залізі.

До основних методів цинкування належать:

– гаряче цинкування. При цьому протравлений і промитий виріб занурюють у розплавлений цинк (440...480 °С) і витримують у ньому 15...25 с; глибина шару 0,02...0,08 мм;

– цинкування у порошку цинку (75...90 % Zn). Здійснюють у ящиках або печах, в яких є реторта, що обертається при температурі 350...450 °С протягом 1...10 год; глибина шару 0,03...0,08 мм;

– цинкування у парах цинку. Здійснюється при 700...1000 °С у печі, через яку пропускається водень. Для отримання парів цинку у піч вводиться цинковий пил у суміші з 20...40 % глинозему; глибина шару 0,15...0,2 мм і більше.

Контрольні запитання

1. В чому суть вібраційного накатування?
2. Які ви знаєте види регулярного мікрорельєфу?
3. Що таке вібродинамічне накатування?
4. Який геометричний параметр мікрорельєфу визначає найбільшу кількість експлуатаційних властивостей?
5. Для підвищення яких експлуатаційних властивостей застосовується вібраційне накатування?
6. Які ви знаєте параметри мікрорельєфу?
7. Які види деформації супроводжують процес вигладжування?
8. Які фактори тертя впливають на формування шорсткості оброблюваної поверхні?
9. Що є визначальним при визначенні величини радіуса сфери вигладжувача?
10. При яких значеннях подачі досягається найменша шорсткість оброблюваної поверхні?
11. Як впливає швидкість вигладжування на шорсткість поверхні?
12. Як змінюються фізико-механічні властивості приповерхневого шару під час вигладжування?
13. Як підрозділяються всі розкатні і обкатні інструменти та пристрої?
14. Якою повинна бути твердість у роликів?
15. З яких матеріалів виготовляються ролики?

16. Що відбувається зі збільшенням швидкості обкочування?
17. З якою метою здійснюється дорнування?
18. Як змінюються шорсткі поверхні після дорнування?
19. Які матеріали піддають дорнуванню?
20. Яку точність отвору можна отримати після дорнування?
21. Як визначається зусилля одного деформівного кільця під час дорнування?
22. З яких матеріалів виготовляють деформівного кільця дорну?
23. Яких видів зношування зазнають сталеві кільця дорну?
24. З яких матеріалів виготовляють суцільні дорни?
25. Які мастила використовуються при дорнуванні мало- і середньовуглецевих сталей?
26. Як впливає дробоструменеве зміцнення (ДЗ) на зносостійкість?
27. Як впливає ДЗ на шорсткість поверхні?
28. Які параметри дробу враховують у ДЗ?
29. З яких матеріалів виготовлюють дріб?
30. Як підвищити якість дробу?
31. Що впливає на розвиток залишкових напружень та їх величину у поверхневому шарі деталі?
32. Де і як витрачається енергія удару?
33. Які існують види електромеханічної обробки?
34. У чому полягає суть електромеханічної обробки?
35. Що слугує інструментом при електромеханічній обробці?
36. Як впливає електромеханічна обробка (ЕМО) на шорсткість поверхні?
37. Як впливає ЕМО на мікротвердість?
38. Для яких поверхонь деталей застосовується зміцнення карбуванням?
39. Яку форму і твердість має робочий елемент під час карбування?
40. Чим визначаються ступінь зміцнення і глибина зміцненого шару?
41. Який інструмент застосовується для карбування?
42. Які існують види термічної обробки?
43. Назвіть види відпалу і загартування.
44. Які види старіння розрізняють за температурними умовами?
45. Що таке старіння? Які зміни йдуть під час старіння у поверхневих шарах деталей?
46. Що таке відпуск?
47. Яким чином визначають зміни геометричних параметрів при криогенній обробці?
48. Чи доцільна криогенна обробка для загартованих конструкційних сталей?

49. Чим відрізняється лазерна термообробка від звичайної (у печах, ваннах та ін.)?

50. При яких режимах імпульсного лазерного випромінювання відбувається зміцнення поверхонь деталей із сталей?

51. Як впливають зони знеміцнювання на експлуатаційні властивості?

52. Які є схеми загартування безперервним лазерним випромінюванням плоских поверхонь?

53. Для поверхонь яких деталей та інструментів застосовується лазерне зміцнення?

54. Які сталі піддаються зміцненню лазерним випромінюванням?

55. З якою метою здійснюють лазерне легування?

56. В чому суть іонно-плазмового зміцнення?

57. З якою метою здійснюється зміцнення методами іонно-плазмової обробки?

58. Якою повинна бути товщина покриття при хімічному осадженні карбідів титану?

59. В чому суть катодно-іонного бомбардування?

60. Яку шорсткість має поверхня покриття після катодно-іонного бомбардування?

61. З якою метою здійснюють наплавлення?

62. Які є способи наплавлення?

63. Яка товщина наплавленого шару?

64. Які матеріали застосовуються для наплавлення?

65. Яким чином підготовлюють деталі для наплавлення?

66. В чому суть віброзвукової наплавлення?

67. В чому суть плазмової наплавлення?

68. З якою метою здійснюють нікелювання?

69. З якою метою проводять хромування?

70. В чому полягає суть електрофоретичного зміцнення?

71. Як змінюються геометричні параметри під час електрохімічного полірування?

72. У чому полягає суть методу електроіскрового зміцнення?

73. Які хімічні з'єднання утворюють зміцнений поверхневий шар виробу?

74. Які деталі машин, механізмів та інструмент піддають електроіскровому зміцненню?

75. Які компоненти входять до складу розчину при фосфатуванні?

76. Яким чином готують деталі до фосфатування?

77. З якою метою здійснюється процес нікель-фосфатування?

78. В якій послідовності здійснюється процес нікель-фосфатного нанесення покриття?

79. Яку товщину має шар нікель-фосфору на поверхні різального інструмента при хімічному осадженні?
80. Що таке цементация?
81. З якою метою здійснюють цементацию?
82. Які сталі піддають цементации?
83. При яких температурах здійснюється цементация?
84. Яку товщину має шар при цементации?
85. Що таке азотування?
86. З якою метою застосовують азотування?
87. Які вироби азотують?
88. Що таке іонне азотування?
89. В чому суть нітроцементации поверхневого шару?
90. З якою метою здійснюють нітроцементацию?
91. Яка товщина нітроцементованого шару?
92. З якою метою здійснюється борування?
93. Які недоліки мають поверхні, що піддаються боруванню?
94. В чому суть хіміко-термічної обробки методом силіціювання?
95. Які вироби піддають алітуванню?
96. В якому середовищі здійснюють алітування?
97. Які вироби піддають сульфідуюванню?
98. З якою метою здійснюють цинкування?

РОЗДІЛ 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ДО ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ МЕТОДАМИ АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Абразивне оброблення – процес формотворення деталей різанням значною кількістю абразивних частин (зерен). Це досить поширений у всіх сферах машинобудівного виробництва процес. Так на підприємствах автомобілебудування абразивні інструменти використовують до 30 %, а у підшипниковій промисловості – у 80 % верстатів. Деякі матеріали (кераміка, тверді сплави, природний камінь) взагалі не можуть бути ефективно оброблені іншими механічними методами.

Робочі процеси абразивного оброблення розрізняються за видом використовуваного інструмента, технологічного середовища, матеріалом абразивних частинок, кінематикою робочих рухів та ін. **Сутністю оброблення, є направлене абразивне (механічне) зношування матеріалу заготовки у результаті різальної або дряпаючої дії твердіших частин інструмента.**

За призначенням процеси абразивного оброблення прийнято поділяти на обдирне, чорнове та чистове шліфування і викінчувальні (фінішні) методи.

Обдирне (силове) шліфування застосовують під час оброблення поверхонь, для яких допустимі значні відхилення форми, велика глибина дефектного шару. Продуктивність оброблення може сягати 5 кг/хв.

Чорнове (напівчистове) шліфування виконують перед чистовим обробленням або під час оброблення поверхонь з низькими вимогами щодо точності й шорсткості (точність оброблення 8...10 квалітет, $R_a = 2,5...6,3$ мкм).

Чистове шліфування використовують як остаточний метод оброблення або перед подальшим викінчувальним (фінішним) обробленням поверхонь (точність оброблення 6...8 квалітет і шорсткість поверхні $R_a = 0,16...1,25$ мкм).

• **Викінчувально-абразивні методи** застосовують для задоволення найвищих вимог щодо точності оброблення, шорсткості поверхні, фізико-механічних властивостей поверхневого шару. Це тонке шліфування, хонінгування, суперфінішування, доведення, абразивне оброблення гнучкими стрічками і пелюстковими кругами, полірування, віброабразивне і магнітно-абразивне оброблення, полірування ущільненим потоком абразиву та ін. При цьому забезпечується точність оброблення у межах 5...6 квалітетів і шорсткість поверхні $R_a = 0,04...0,16$ мкм (тонке шліфування) та 3...5 квалітетів $R_a = 0,04...0,16$ мкм для притирання.

3.1. Абразивні матеріали та інструменти

Абразивний інструмент є системою взаємозв'язаних абразивних (дисперсних) частин. За агрегатним станом дисперсного середовища можна виділити такі класи абразивних інструментів:

Твердодисперсні – фіксоване розміщення абразивних зерен у зв'язці або на поверхні інструмента. Інструмент може бути монолітним, багатошаровим або одношаровим. Він може мати гнучку основу (шліфувальні стрічки і шкурки). Залежно від матеріалу зв'язки інструмент буває жорстким (керамічна, бакелітова, металева поверхня) або пружним (вулканітові, поліуретанова поверхня). Можливе включення додаткових дисперсних фаз: пори в абразивному інструменті, частин твердого мастила, наповнювач в алмазно-абразивному інструменті.

Рідкодисперсні (суспензії, золи) – абразивні частини містяться у рідині під час доведення, притирання, полірування та віброабразивному, ультразвуковому, струминно-абразивному обробленні.

Газодисперсні (пил) абразивні частки захоплюються газовим або повітряним середовищем під час віброабразивного, струминно-абразивного та деяких інших методів оброблення.

Рідкодисперсні й газодисперсні системи належать до процесів оброблення умовно вільним абразивом і є абразивними середовищами. Можлива їх комбінація, наприклад піскоструминне оброблення.

3.1.1. Абразивні матеріали

Усі абразивні матеріали поділяють на дві групи: натуральні (природні) і штучні (синтетичні).

Природні матеріали (кремінь, наждак, корунд, гранат, алмаз та ін.) майже не використовуються в абразивних інструментах. Найчастіше для процесів полірування і доведення застосовують пемзу, польовий шпат, крокус, крейду, тальк, каолін, віденське вапно.

Серед **штучних абразивних матеріалів** розрізняють абразиви високої твердості (електрокорунд, карбід кремнію, карбід бору) і надтверді матеріали (НТМ) – алмаз синтетичний (АС) і кубічний нітрид бору (КНБ), який, наприклад, випускається під такими торгівельними марками: кубоніт – Україна; ельбор – Росія; белбор – Білорусь; борозон (borozon) – США; СВН – Японія і Китай.

Сировиною для виробництва абразивів високої твердості є руди та мінерали, що містять велику кількість кристалів, таких як оксид алюмінію Al_2O_3 і кварц SiO_2 . Надтверді абразивні матеріали отримують у результаті синтезу під дією надвисокого тиску і температури з графіту (синтетичний

алмаз) і гексагонального (в'юрцитного) нітриду бору (КНБ) з наступним подрібненням шихти, очищенням і розсіванням.

Електрокорунд – це кристалічний оксид алюмінію Al_2O_3 , що є очищеним продуктом плавки глинозему (бокситів). Розрізняють декілька видів електрокорунду: нормальний, білий, хромистий, титановий, монокорунд і сферокорунд.

Електрокорунд нормальний (марки: 16А; 15А; НА; 13А; 12А) найбільше використовуються у промисловості для чорного, напівчистого і чистого шліфування сталей і чавунів, а також для загострювання різального інструмента з інструментальної сталі.

Електрокорунд білий (марки: 25А; 24А; 23А; 22А) містить менше домішок, тому має кращі різальні властивості, ніж електрокорунд нормальний. Його застосовують під час шліфування міцних і в'язких сталей (незагартованих і загартованих), ковкого чавуну, для загострювання інструментів із швидкорізальної сталі.

Електрокорунд хромистий (марки 34А; 33А; 32А) отримують у результаті плавлення в електропечах глинозему з додаванням хромистої руди. Зерна його мають рожеве забарвлення. Вміст Al_2O_3 не менше 97 % і до 2 % CrO .

Електрокорунд титановий (37А). Він містить не менше 97 % Al_2O_3 і 2 % TiO_2 .

Висока в'язкість зерен і стабільність інших фізико-механічних властивостей електрокорунду хромистого і титанового створюють передумови для їх використання у напружених режимах шліфування вуглецевих і конструкційних сталей, а також для високоточних робіт і операцій доведення.

Монокорунд (марки 45А, 44А, 43А). Застосовується для оброблення досить міцних конструкційних сталей, ковкого чавуну, швидкорізальної сталі, він містить 97 – 98 % Al_2O_3 .

Сферокорунд має вигляд порожнистих корундових сфер. Містить більше 99 % Al_2O_3 і невелику кількість домішок. Його застосовують для шліфування м'яких, в'язких і специфічних матеріалів – шкіри, гуми, деревини, пластмас, кольорових металів. Інколи використовують як пороутворювач.

Формокорунд містить 80...87 % Al_2O_3 і Fe_2O_3 – не більше 15 %. Виробляється у вигляді зерен циліндричної (С) і призматичної (Р) форм із такими розмірами: діаметр або ширина квадратного перерізу 1,2...1,8 мм, довжина 3,8...8 мм. Переважно використовується для важких обдирних робіт.

Карбід кремнію (SiC) випускають двох видів: чорний (марок 52С, 53С, 54С, 55С (95...98 % SiC)) і зелений (марок 62С, 63С, 64С (98...99 %

SiC)). Якіснішим, але й дорожчим, є зелений карбід кремнію. Його застосовують для загострювання твердосплавного інструмента. Чорний карбід кремнію є більш крихким і використовується для оброблення матеріалів з низькою межею міцності (чавуну, бронзи), в'язких металів і сплавів (м'якої латуні, алюмінію, міді), а також для оброблення таких неметалічних матеріалів, як шкіра, скло, мармур тощо.

У даний час для спрощення використовується позначення карбиду кремнію зеленого і чорного відповідно 6С і 5С, електрокорунду білого – 2А тощо.

Карбід бору (B_4C) – складається з кристалічного карбиду бору (84...93 %) і невеликої кількості домішок. За твердістю та абразивною здатністю поступається тільки нітриду бору та алмазу. Застосовують в основному для приготування паст і суспензій, для доведення і полірування твердих матеріалів. Може використовуватися для доведення твердосплавного інструменту, оскільки забезпечує мінімальний радіус округлення ріжучого леза до 6...10 мкм (електрокорунд – до 15 мкм), а також при обробленні досить твердих матеріалів, наприклад рубіна, корунду, кварцу тощо.

Оксид алюмінію (Al_2O_3 – глинозем). Паста на його основі використовують для притирання та доведення сталевих і чавунних деталей.

Оксид заліза (Fe_2O_3) – полірувальний порошок коричневого кольору (крокус). Застосовується для полірування скла, благородних і кольорових металів.

Оксид хрому (Cr_2O_3) – твердий тонкокристалічний абразивний матеріал темнозеленого кольору або майже чорного кольору. Є найефективнішим матеріалом, вживаним для виготовлення полірувальних паст.

Однією з найважливіших характеристик абразивних матеріалів є **зернистість**. За зернистістю абразивні матеріали поділяють на наступні групи: шліфзерно (200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16); шліфпорошки (12, 10, 8, 6, 5, 4, 3); мікропорошки (M63, M50, M40, M28, M20, M14); тонкі мікропорошки (M10, M7, M5). Це умовне позначення шліфувального матеріалу, що пов'язане з розміром абразивних зерен основної фракції. **Основна фракція** – сукупність зерен певного розміру, що переважають у складі цього порошку за масою (у шліфзерні та шліфпорошках) або за числом зерен (у мікропорошках).

Зернистість шліфзерна та шліфпорошків визначають розміром сторони отвору нижнього контрольного сита для основної фракції (у сотих долях міліметра). Наприклад, шліфзерно 200 при просіюванні залишається на ситі з номінальними розмірами отворів сітки на просвіт, рівним 2000

мкм.

Номер зернистості мікропорошків позначають цифрою, рівною найбільшому розміру (у мкм) зерен основної фракції із додаванням букви М. Наприклад, мікропорошок із розмірами основної фракції 14...10 мкм позначається М14.

3.1.2. Порошки з синтетичних алмазів і кубічного нітриду бору

У загальному випадку алмазний порошок – це сукупність кристалів і полікристалів розміром не більше 3000 мкм.

Алмазні порошки поділяють на чотири основні групи: шліфпорошки (з розміром зерен 2500...60 мкм), мікропорошки (60...1 мкм), субмікропорошки (1...0,1 мкм) і нанопорошки (10^{-3} ... 10^{-4} мкм).

Позначення марок алмазних шліфпорошків складається з буквених і цифрових індексів. Буквами АС позначають порошки з синтетичних монокристалічних алмазів. Буквою А – природний алмаз, АР – із синтетичних алмазних полікристалів. До індексу АР додається буква, що позначає тип вихідного полікристалічного алмазу: В – баллас, К – карбонадо, С – спеки. До буквених позначень додається цифровий індекс, що виражає для порошків АС значення міцності на стискування (не менше) у ньютонах, а у шліфпорошках АР – у сотих долях ньютона.

Шліфпорошки синтетичних монокристалічних алмазів випускаються в Україні 12 марок міцності (ДСТУ 3292–95), починаючи з АС2 (4; 6; 15; 20; 32; 50; 65; 80; 100; 125) до АС160. Якщо порошок додатково розсортований за якою-небудь окремою властивістю після цифрового індексу, то додається відповідна буква: Т – термоміцні (термостійкі); Н – немагнітні, неелектропровідні; А – підвищеної адсорбційної активності тощо.

У Інституті надтвердих матеріалів (ІНМ) НАН України розроблені і виробляються порошки підвищеної міцності марок АС200; АС250; АС300; АС350; АС400 (ТУ 88.090.029 – 98). Вони застосовуються: в інструментах на металевих зв'язках; у правлячих інструментах; в інструментах для різання, свердління природного каменя, кераміки, бетону і бурових робіт.

Мікропорошки нормальної абразивної здатності, які позначаються індексом АСМ (алмазний синтетичний мікропорошок) і порошки підвищеної абразивної здатності (індекс АСН), випускають зернистістю 60/40...1/0 мкм.

Зернистість шліфпорошку з НТМ визначають і характеризують розміром зерен основної фракції і позначають, на відміну від традиційних абразивів, дробом, чисельник якого відповідає розміру отворів верхнього сита, а знаменник – розміру отворів нижнього сита, на яких залишаються

зерна розсіюваної фракції, утворюючи масу порошку певної зернистості, наприклад 400/315 мкм.

Для позначення субмікропорошків до буквених індексів додається цифра 5 або 1, що позначає вміст у порошку зерен крупної фракції (відповідно не більше 5 або 1 %). Субмікропорошки бувають шести видів зернистістю: АСМ5 1/0,5 (0,7/0,3; 0,5/0,1) і АСМ1 0,5/0 (0,3/0; 0,1/0).

Для отримання мікро- та субмікропорошків спеціального призначення застосовують різні методи модифікування їхніх поверхонь. У цьому випадку до основних індексів додаються нові: О – овалізовані, Д – діамагнітні, Ф100 – гідрофобізовані, Ф700 – гідрофілізовані тощо.

Нанометричні ультрадисперсні алмази (УДА) з розміром частинок 1...100 нм синтезують шляхом детонації заряду вибухової речовини у спеціальних камерах у середовищі з негативним кисневим балансом. Наразі відомо, що домішки УДА у різних матеріалах сприяють формуванню дрібнозернистих структур із принципово новими властивостями.

Кубічний нітрид бору (КНБ) є більш термостійким матеріалом, ніж алмаз, і застосовується там, де останній не може використовуватися, тобто під час великих навантажень за високих температур.

В Україні шліфпорошки КНБ (кубоніта) з розмірами зерен від 250...40 мкм виробляють трьох марок: звичайної (КО), підвищеної (КР) і високої (КВ) міцності.

Основною характеристикою мікропорошків із кубоніту (КМ) є підвищена абразивна здатність. Діапазон зернистості такий самий, як і в алмазів, тобто від 60/40...1/0 мкм.

У виробництві алмазні порошки, аналогічно абразивним, поділяють на фракції за розмірами отворів сортувальних сит. Ці розміри вибрані з ряду рекомендованих чисел, за геометричною прогресією з певним знаменником. В Україні та країнах СНД застосовують набір сит зі знаменником $\sqrt[10]{10} \approx 1,26$, а розміри отворів і зернистість шліфпорошків визначають у мікрометрах.

У США і Західній Європі застосовують набір сит із розмірами отворів у мешах (величина меж - це кількість отворів на один лінійний дюйм сітки) і змінному модулі набору сит.

Для субмікропорошків визначення зернистості та зернового складу проводять на електронному мікроскопі зі збільшенням не менше як у 10000 разів.

3.1.3. Абразивні інструменти

На практиці абразивний інструмент поділяють на три основні види:

— інструмент на жорсткій основі, в якому зерна 1 шліфувальних матеріалів (рис. 3.1) жорстко скріплені між собою зв'язкою 2 (керамічною, органічною, металевою тощо);

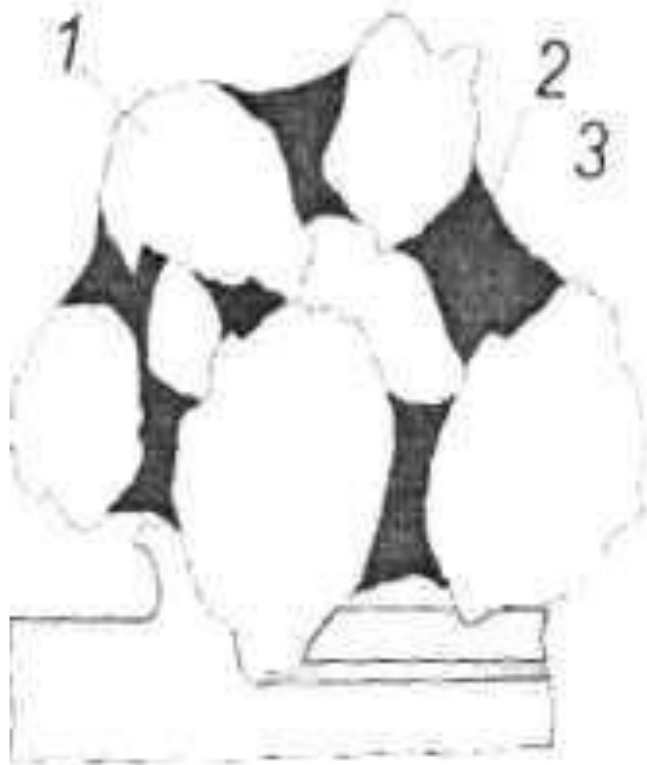


Рис. 3.1. Структура абразивного інструмента

—інструмент, виготовлений на гнучкій основі (фібра, папір, синтетичні волокна, тканина або їх комбінація, нетканий матеріал): шліфувальна шкурка та вироби з неї (нескінченні шліфувальні стрічки, стрічки, бобіни, конуси, диски, пелюсткові круги) та інший гнучкий або еластичний абразивний інструмент;

—пасти твердої та рідкої консистенції, що є композицією з шліфувальних матеріалів і органічних зв'язок, які здатні закріплювати абразивні зерна так, що під час роботи вони мають значну свободу переміщень у зоні оброблення. Також можуть додаватись мастильні та поверхнево-активні речовини.

Найбільшого поширення у виробництві набув абразивний інструмент на жорсткій основі:

— шліфувальні круги – абразивні інструменти у вигляді тіла обертання циліндричної або спеціальної форми;

— шліфувальні головки – шліфувальні круги різних форм і розмірів з глухими отворами для кріплення на металевих хвостовиках-оправках;

— шліфувальні сегменти, що є складовою частиною збірного або

складеного шліфувального круга;

—шліфувальні бруски призматичної або циліндричної форми, що використовуються у хонах або суперфінішних головках;

—шліфувальні шевери – абразивні інструменти, що мають форму зубчастого колеса, використовуються для фінішного оброблення зубчастих коліс;

—абразивні галтувальні тіла у формі призм, зірочок та інших довільних геометричних форм, що використовуються для віброабразивного оброблення у галтувальних барабанах.

За формами або профілем шліфувальні круги поділяють на 13 типів, наприклад, прямого (циліндричного) або конічного профілів, у вигляді кілець, чашок, тарілок, зі спеціальними виточками і т. под. Крім того, правкою може бути забезпечений будь-який інший спеціальний профіль, необхідний для конкретної операції шліфування.

Окрім типу і розмірів, характеристика шліфувального круга включає: матеріал і марку абразиву, його зернистість, твердість і номер структури круга, тип і марку зв'язки. Особливістю алмазно-абразивного інструмента є наявність характеристики – концентрації алмазних зерен і відсутність характеристик – твердості і номеру структури. До складу характеристики входять також робоча швидкість інструмента, його ступінь точності, клас неврівноваженості мас.

Твердість абразивних інструментів - це умовне позначення здатності зв'язки утримувати зерна в інструменті. Встановлена наступна шкала ступенів твердості абразивних інструментів: ЧМ1, ЧМ2 – надзвичайно м'який; ВМ1, ВМ2 – вельми м'який; М1, М3 – м'який; СМ1, СМ2 – середньом'який; С1, С2 – середній; СТ1, СТ2, СТ3 – середньотвердий; Т1, Т2 – твердий; ВТ1, ВТ2 – вельми твердий; ЧТ1 – ЧТ9 – надзвичайно твердий. Цифри 1, 2...9 характеризують твердість за зростанням. Для інструментів па вулканітовій зв'язці застосовують укрупнені ступені твердості: СМ, С, СТ, Т.

У більшості випадків шліфування застосовують абразивні круги середнього ступеня твердості, які мають достатню стійкість і забезпечують високу продуктивність. Для безцентрового, внутрішнього і плоского шліфування застосовують м'якші круги, а для профільного шліфування, різшліфування, шліфування переривчастих поверхонь і заготовок малих діаметрів – твердіші круги. Шліфування з МОТС виконують твердішими кругами.

Зв'язка абразивних інструментів служить для скріплення зерен в об'ємну структуру, забезпечуючи їх утримання до моменту досягнення критичного ступеня зношування. Вона має значний вплив на працездатність кругів. Від кількості, виду, якості і рівномірності розподілу

зв'язки в абразивному крузі залежать твердість, міцність, структура, невірноваженість круга і допустима швидкість шліфування.

Для виготовлення абразивних кругів застосовують неорганічні (керамічні – К, силікатні – С, магнезійні, металеві – М) та органічні (бакелітові – Б, вулканітові – В, глифталеві – Гф, полімерні) зв'язки. Із них найбільш поширена керамічна, бакелітова і вулканітова зв'язки, а при виробництва алмазного інструмента – бакелітова і металева.

Номер структури традиційного абразивного інструмента характеризує співвідношення між об'ємами зерен 1 (V_z), зв'язки 2 (V_c) і пор (шпарин) 3 (V_n), отже $V_z + V_c + V_n = 100\%$ (див. рис. 3.1). Абразивний інструмент за структурою поділяють на 12 груп. Між номером структури N і об'ємною концентрацією зерен V_z , (%) існує взаємозв'язок:

$$N = 0,5(62 - V_z). \quad (3.1)$$

За європейським стандартом ISO/FDIS 6103 введені номери структури від 0 до 14, які також розраховуються за формулою (3.1).

Із підвищенням номера структури на одну одиницю вміст абразивних зерен зменшується на 2 %. Структури № 1 – 4 називаються закритими або щільними, № 5 – 8 – середніми, № 9 – 12 – відкритими. Загальні рекомендації такі: № 1 – 4 для профільного шліфування; № 5 – 8 – для звичайного шліфування; № 9 – 12 для швидкісного шліфування, оброблення м'яких неметалічних матеріалів.

Концентрація зерен алмазних і кубонітових кругів є умовною характеристикою абразивного шару. За концентрацію 100 % беруть вміст 4,4 каратів алмазу в 1 см^3 об'єму алмазоносного шару ($8,8 \text{ г/см}^3$), що становить 25 % (за об'ємом).

Зі збільшенням концентрації підвищується різальна здатність і стійкість кругів, але й зростає їх вартість. Для чистового шліфування й доведення деталей рекомендують круги 100 % і 150 % концентрації, а для загострювання твердосплавних інструментів й профільного шліфування – 150...200 %.

3.2. Види шліфування. Елементи режиму різання під час шліфування

До основних видів шліфування належать:

– зовнішнє кругле (поздовжня або осьова подача, поперечна подача, безцентрове);

– внутрішнє (при заготовці, що обертається з поздовжньою і поперечною подачами, безцентрове; при нерухомій заготовці – планетарне);

– плоске (периферією, торцем круга);

– спеціальне (профільне, різьбове, фасонне тощо).

Процес шліфування, зазвичай, здійснюють за допомогою трьох рухів:

– рух різання – обертання шліфувального круга D_r ;

– формотворного руху подачі (або руху направленого, найчастіше, по дотичній до обробленої поверхні деталі): поздовжня подача D_{s2} (поступальний або зворотно-поступальний рух); кругова подача D_{s3} (обертальний рух) та ін.

– руху D_{s1} (безперервного або дискретного), що визначає глибину різання (t) – поперечна подача (направлена, як правило, по нормалі до обробленої поверхні).

Рухи подач можливо здійснювати шліфувальним інструментом, оброблюваною заготовкою або комбінацією їх взаємних переміщень.

Швидкість шліфувального круга V_k (м/с) є головною складовою швидкості різання і визначається за формулою:

$$V_k = \frac{\pi D_k n_k}{60 \cdot 1000}, \quad (3.2)$$

де D_k – діаметр круга, мм;

n_k – частота його обертання, об/хв.

3.2.1. Зовнішнє кругле шліфування

Швидкість обертання заготовки V_3 (м/хв):

$$V_3 = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}, \quad (3.3)$$

де D_3 – діаметр заготовки, мм;

n_3 – частота її обертання, об/хв.

Поперечна подача (у напрямку зняття припуску) S_n залежить від виду шліфування:

– при шліфуванні з поздовжньою подачею $S_n = t$ (рис. 3.2, а). Встановлюється на подвійний S_{2x} або одинарний S_x хід оброблюваної заготовки або круга. У чорновому шліфуванні $S_{2x} = t = 0,01 \dots 0,07$ мм; у чистовому $S_{2x} = t = 0,005 \dots 0,02$ мм;

– врізне шліфування (без поздовжньої подачі) (рис. 3.2, б) найчастіше застосовують у обробленні фасонних, а також коротких циліндричних поверхонь на жорстких заготовках. Поперечна подача при цьому є переміщенням круга за один оберт заготовки $S_n = S = t = 0,002 \dots 0,005$ мм/об., інколи воно задається хвилинною подачею $S_{хв} = 0,8 \dots 3$ мм/хв, тоді $S_n = S = t = S_{хв} / n_3$.

– глибинне шліфування (рис. 3.2, в) застосовують для оброблення жорстких коротких заготовок зі зняттям шару до 0,4 мм за один прохід ($S_n = 0$). Основну роботу різання виконує спеціально спрофільована

конічна частина круга (забірний конус), а циліндрична (калібрувальна) – лише захищає оброблену поверхню.

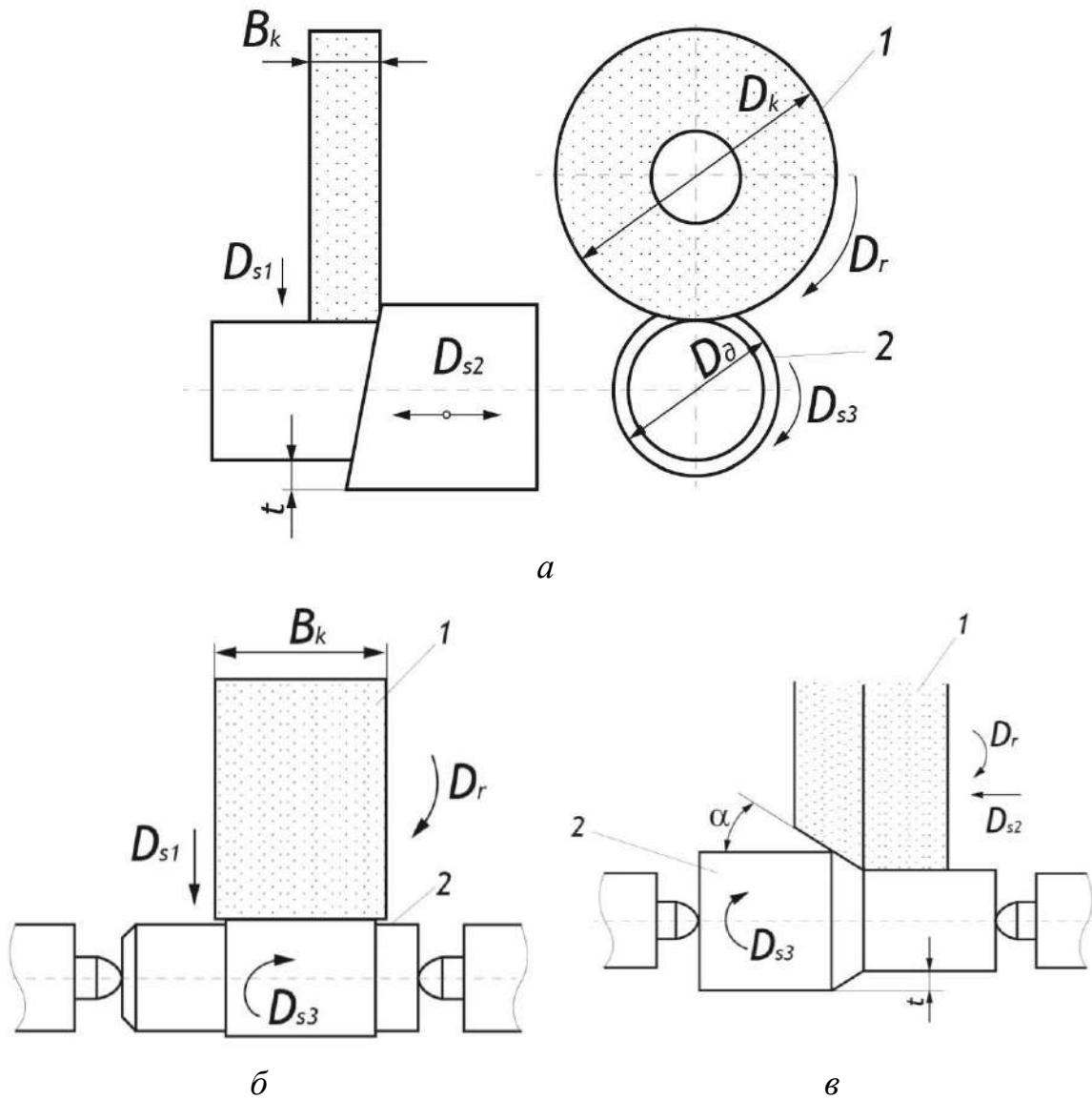


Рис. 3.2. Способи круглого зовнішнього шліфування: *а* – шліфувальний круг, *б* – оброблювана заготовка, *в* – глибоке шліфування

Поздовжня подача $S_{\text{пд}}$ призначається на один оберт оброблюваної заготовки, S (мм/об) у частках S_B ширини шліфувального круга B_k або регламентується хвилинна подача $S_{\text{хв}} = V_{\text{пд}}$ (м/хв):

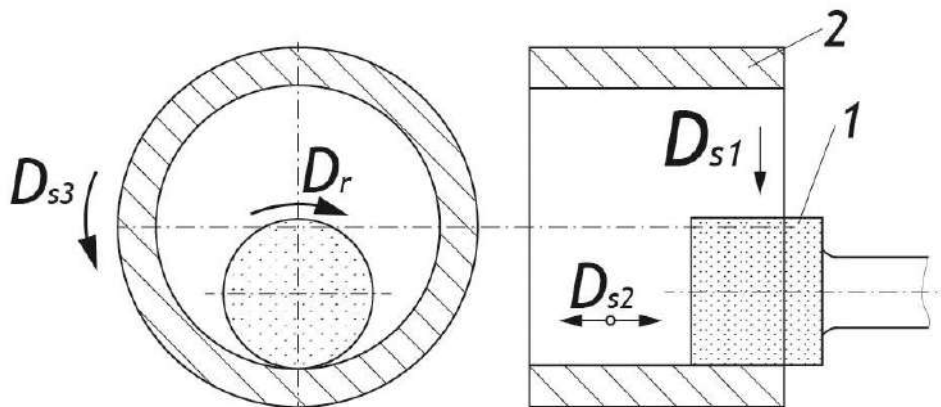
$$S = S_B B_k ; \quad S_{\text{хв}} = V_{\text{пд}} = \frac{S n_3}{1000} = \frac{S_B B_k n_3}{1000} . \quad (3.4)$$

При багатопрохідному чорновому шліфуванні $S_B = 0,3 \dots 0,85$, при чистовому $S_B = 0,2 \dots 0,3$. При глибинному шліфуванні $S_{\text{пд}} = S = 1 \dots 6$ мм/об.

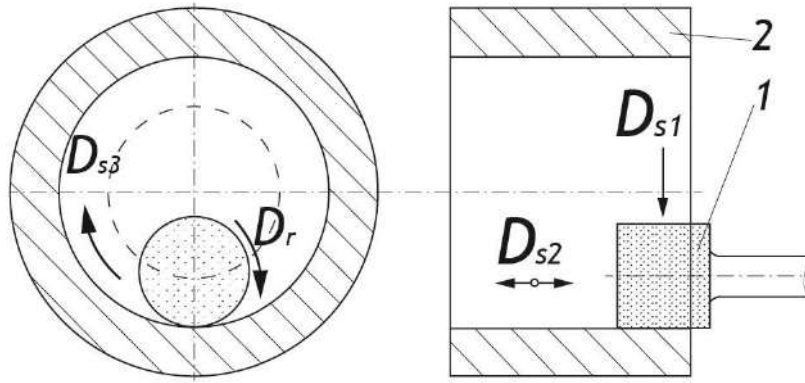
3.2.2. Внутрішнє кругле шліфування

Внутрішнє кругле шліфування може здійснюватися звичайним і планетарним способами. У першому випадку (рис. 3.3, а) заготовка закріплюється у патроні (або на спеціальній планшайбі) і здійснює обертальний рух кругової подачі з коловою швидкістю V_3 (м/хв). Шліфувальний круг має швидкість V_k (м/с) і здійснює зворотно-поступальний рух $S_{\text{пд}} = S_{\text{хв}} = V_{\text{пд}}$ (м/хв). Для поперечної подачі $S_{\text{п}} = S_{2x}$ (мм/подв. хід).

У планетарному способі внутрішнього шліфування заготовка нерухома, а всі рухи здійснюються кругом (рис. 3.3, б). Цей метод застосовують для оброблення крупних і важких заготовок. Шліфувальний шпиндель верстата здійснює чотири рухи: навколо своєї осі зі швидкістю круга V_k , планетарний - навколо осі оброблюваного отвору швидкістю V_3 ($n_{\text{пд}} = n_3$), зворотно-поступального уздовж осі виробу $S_{\text{пд}} = S_B V_k$, $S_{\text{п}} = S_{2x} = 0,008 \dots 0,02$ мм/подв.хід.



а



б

Рис. 3.3. Схеми внутрішнього шліфування

Внутрішнє шліфування відбувається у важчих умовах, ніж зовнішнє. Діаметр шліфувального круга має вибирати меншим від діаметра оброблюваного отвору $D_k = (0,75 \dots 0,25) D_3$, що накладає обмеження на використання швидкості шліфування; більшу площу зони шліфування (довжина дуги контакту абразивних зерен з оброблюваним матеріалом); застосування МОТС не завжди можливе; знижену жорсткість кріплення інструмента через його відносно малі розміри і великий виліт шпинделя. Тому режими різання для внутрішнього шліфування ($S_{\text{п}}$ і $S_{\text{пд}}$) беруть у 2...3 рази меншими, ніж для зовнішнього.

3.2.3. Плоске шліфування

Плоске шліфування здійснюють двома методами: периферією (рис. 3.4, а) і торцем круга (рис. 3.4, б). Плоскошліфувальні верстати можуть бути з прямокутним або круглим (обертвовим) столом. Розглянемо випадок використання прямокутного столу як найчастіше вживаного.

Процес плоского шліфування периферією круга є проміжним між зовнішнім та внутрішнім шліфуванням і наближається до першого, тобто,

за $R_s = \frac{D_s}{2} \rightarrow \infty$ кругле шліфування трансформується у плоске. Тому

можна встановити таку відповідність елементів режиму різання: кругле зовнішнє шліфування \Rightarrow плоске шліфування (для верстатів з прямокутним столом): обертальний рух заготовки $V_3 \Rightarrow$ зворотно-поступальний поздовжній рух столу $S_{\text{пд}} = V_{\text{пд}}$; поздовжня подача $S_{\text{пд}} = S_{\text{ВВК}} \Rightarrow$ поперечна подача $S_{\text{п}} = S_{\text{ВВК}}$; поперечна подача $S_{\text{п}} = t$ вертикальна подача (на врізання) $S_{\text{В}} = t$.

Глибину різання t беруть в інтервалі 0,02...0,10 мм. Більші значення t беруться для жорсткіших заготовок і великих D_k . Решту елементів режиму

різання для плоского шліфування периферією круга вибирають наближеними до своїх аналогів для круглого зовнішнього шліфування.

Під час шліфування торцем круга поверхня контакту значно більша, ніж при шліфуванні периферією і, зазвичай, охоплює всю заготовку. Процес характеризується великими силами різання і підвищеним тепловиділенням. Отже, шліфування торцем круга застосовують для оброблення достатньо жорстких заготовок. Під час чорнового оброблення для кращого використання різальної здатності круга вісь шпинделя встановлюють під деяким кутом ($\approx \arcsin \frac{t}{D_k}$). Під час чистового оброблення поверхню круга встановлюють паралельно площині столу.

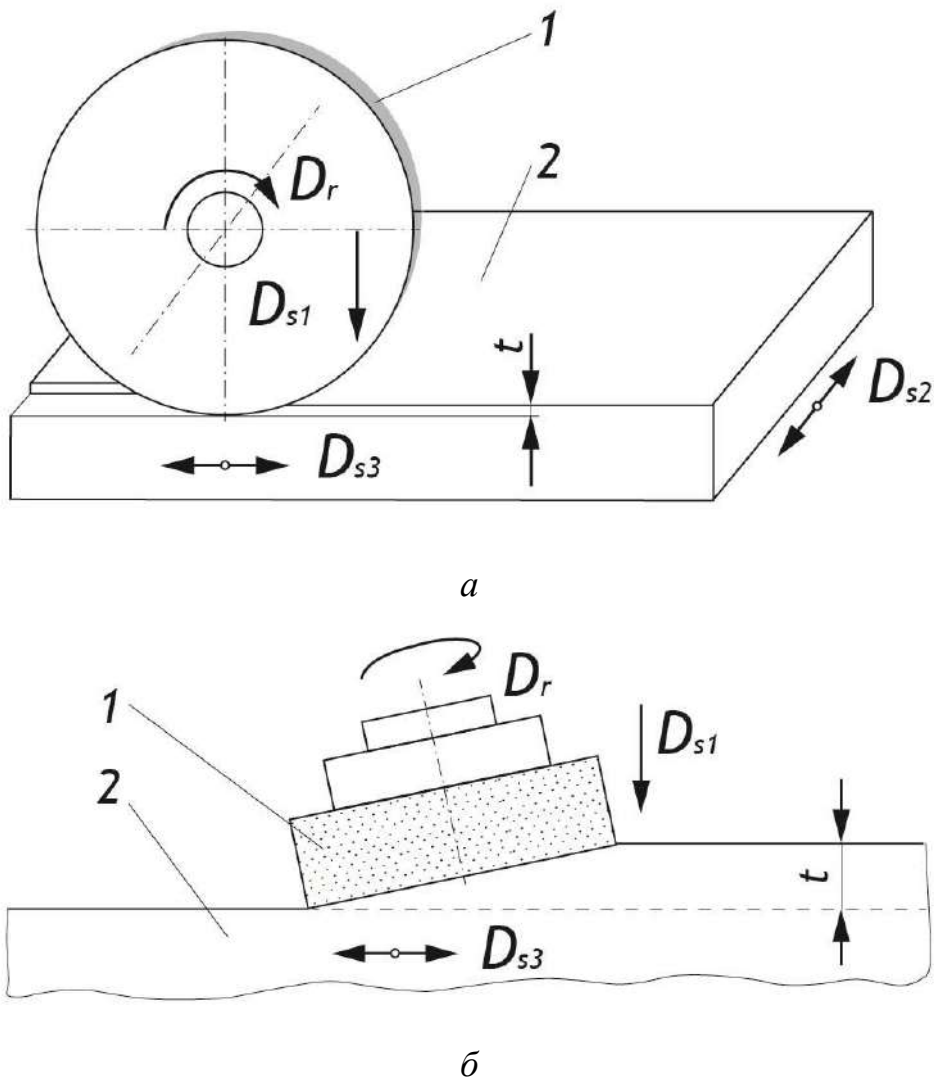


Рис. 3.4. Схеми плоского шліфування периферією (а) і торцем (б) круга

3.2.4. Безцентрове шліфування

Під час безцентрового шліфування заготовка здійснює обертання без кріплення у центрах чи в патроні, причому базою є сама оброблювана поверхня. Безцентрове шліфування може застосовуватися для оброблення як внутрішніх, так і зовнішніх поверхонь, здійснюватися на прохід і до упору. Розглянемо деякі основні особливості цього процесу на прикладі оброблення циліндричних заготовок на прохід (рис. 3.5). Оброблювана заготовка – 2 міститься між опорним ножем – 4 і ведучим кругом – 3, заправленому у формі гіперболоїда обертання, і обробляється шліфувальним кругом – 1.

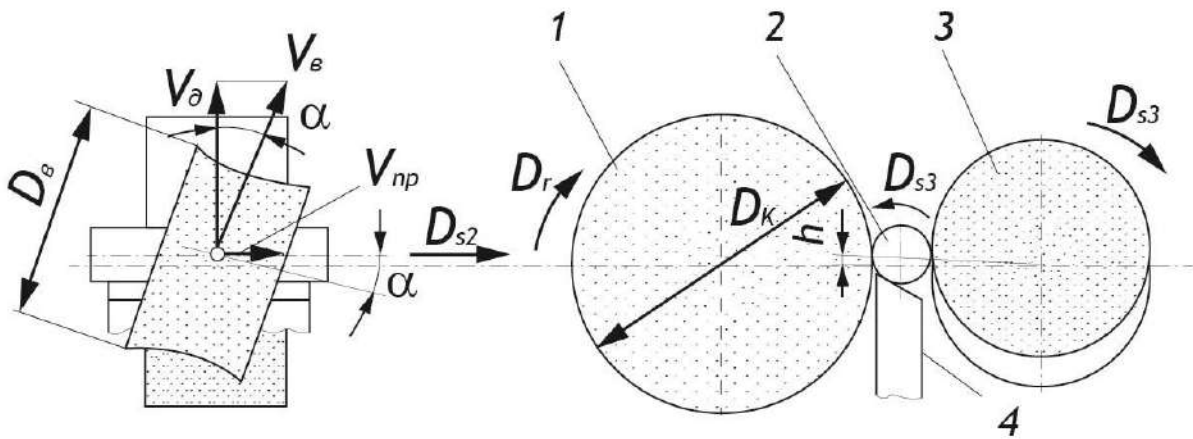


Рис. 3.5. Схема безцентрового шліфування

Робочий (шліфувальний) круг обертається зі швидкістю $V_k = 30 \dots 35$ м/с, ведучий $V_B = 15 \dots 30$ м/хв. У результаті різних швидкостей обертання сила тертя між ведучим кругом і заготовкою значно більша тангенційної складової сили різання. Для ще більшого підвищення сили тертя ведучий круг виготовляють на вулканітовій зв'язці, зернистістю $10 \dots 12$ і твердістю СТ2 – Т1.

Вісь обертання ведучого круга відносно осі заготовки нахилиється на кут α (чистове шліфування $\alpha = 1^\circ \dots 2^\circ$; напівчистове $\alpha = 2 \dots 5^\circ$; обдирне – до 10°). Як результат вектор швидкості ведучого круга V_B розкладається на вектор перпендикулярний осі обертання заготовки (деталі) і вектор паралельний осі; ведучий круг забезпечує своїм обертанням обертальний V_d і поступальний рухи $V_{пд} = S_{пд}$ заготовки з урахуванням коефіцієнта проковзування $k = 0,95 - 0,99$:

$$V_o = V_B k \cos \alpha = \frac{\pi D_B n_B \cos \alpha}{1000}; \quad V_{no} = V_B k \sin \alpha = V_o \operatorname{tg} \alpha, \quad (12. 5)$$

де D_B – діаметр ведучого круга, мм;

n_B – частота його обертання, об/хв.

Вісь заготовки встановлюється вище осей кругів на $h \approx 0,5(D_k + D_d) \sin \alpha$, де D_k, D_d – діаметри шліфувального круга та деталі.

3.2.5. Шліфування торцем абразивного круга

У вітчизняній та закордонній практиці застосовують різні схеми плоского торцевого шліфування, а саме одностороннє та двостороннє з розміщенням шпинделів у горизонтальній та вертикальних площинах як для обдирного, так і чистового, а також тонкого викінчувального шліфування. Методи плоского шліфування залежно від рухів шліфувального круга і заготовки можна класифікувати.

Варто зазначити, що торцеве шліфування може виконуватись цільним абразивним кругом, переривчатим кругом, а також алмазним кругом, який здебільшого має конструкцію у вигляді чашки, на різальному торці якої відповідним чином закріплено певний шар алмазних порошків на металевій, керамічній чи еластичній бакелітно-груповій зв'язці.

Розглянемо основні класифікаційні групи плоского торцевого шліфування наведено (рис. 3. б): *a* – шліфування торцем шліфувального круга під час зворотно-поступального руху деталі; *б* – шліфування торцем круга при обертанні деталі з утворенням плоскої поверхні; *в* – шліфування торцем круга у разі поступального і обертального рухами деталі з утворенням круглої поверхні; *г* – прямолінійне плоске шліфування виробів горизонтальним шпинделем; *д* – прямолінійне плоске шліфування виробів вертикальним шпинделем; *е* – плоске шліфування вертикальним шпинделем при горизонтальному плоскому обертальному русі виробів на круглому столі; *ж* – двостороннє шліфування вертикальним шпинделем при прямолінійному руху деталей; *з* – двостороннє шліфування вертикальним шпинделем під час горизонтального плоского обертального руху деталей на круглому столі; *и* – двостороннє шліфування горизонтальними шпинделями під час плоского прямолінійного руху виробів; *к* – двостороннє шліфування горизонтальними шпинделями під час плоского прямолінійного зворотно-поступального руху деталей; *л* – двостороннє шліфування горизонтальним шпинделем під час обертального руху на круглому столі; *м* – двостороннє шліфування горизонтальними шпинделями під час плоского вертикального руху деталей маятником.

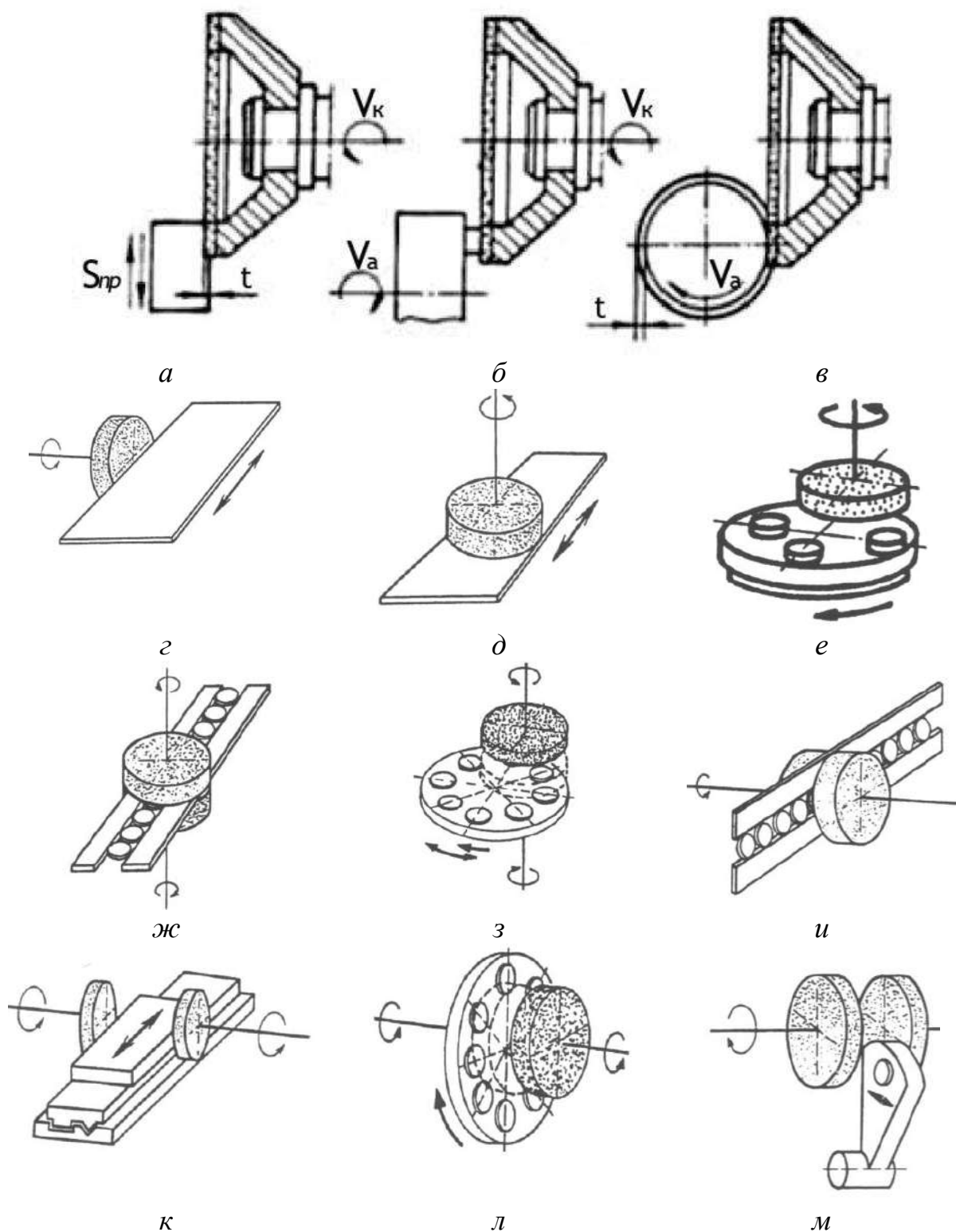


Рис. 3.6. Методи плоского торцевого шліфування

3.3. Особливості абразивного оброблення матеріалів

Процеси оброблення абразивними зернами принципово не відрізняються від лезового, оскільки процес утворення стружки на різальних лезах різних інструментів протікає за єдиною схемою. У всіх випадках різання є послідовним зсувом (або сколюванням) окремих елементів стружок за допомогою леза, до якого прикладена певна сила. За аналогією найбільш схожі на абразивний інструмент багатозубі фрези з нерівномірним кроком зубів, що працюють з розділенням припуску по висоті. Проте процеси абразивного оброблення мають особливості:

- випадкове (хаотичне) розміщення великої кількості малих зерен на робочій поверхні інструмента;
- переривчаста різальна кромка;
- різновисокість вершин різальних елементів;
- різноманітна (неправильна) геометрична форма абразивних зерен забезпечує, зазвичай, негативні передні кути різання (дряпання);
- особливі властивості різальних елементів (абразивних зерен): висока твердість, термостійкість, гострота, крихкість, здатність руйнуватися утворюючи нові мікро- і субмікрокромки;
- високі швидкості мікрорізання і малі глибини різання (дряпання);
- інтенсивне ковзання зерен по оброблюваній поверхні у момент часу, що передує їх візанню та початку мікрорізання;
- динамічна дія кожного абразивного зерна на поверхню різання;
- абразивний інструмент може у процесі роботи сам відновлювати свою різальну здатність (самоорганізовуватися);
- рельєф обробленої поверхні формується під дією як геометричних чинників, характерних для процесу лезового оброблення різанням, так і пластичних деформацій, супроводжуючи процес мікрорізання.

Схему роботи абразивного зерна під час мікрорізання зображено на рис. 3.7. Зерна – багатогранники неправильної форми, що мають закруглені (радіусом ρ) вершини. Округлення невелике ($\rho = 8 \dots 20$ мкм), але його потрібно враховувати, оскільки під час мікрорізання товщина шарів, що знімаються окремими зернами, співрозмірна з ρ .

Як видно з рис. 3.7, у процесі різання леза зерна мають небажані передні кути, що різко підвищують їх механічну міцність і опір, що діють на них сил. У кожного різального зерна розрізняють передню поверхню ECB , по якій сходить стружка і задню поверхню BC_1E_1 , звернену до обробленої поверхні. На зернах розрізняють мікровиступи M і субмікровиступи N (рис. 3.7). Вони у 10 і 100 разів менші порівняно з основним дряпальним елементом і грають роль самостійних дряпальних

елементів, що знімають стружки. Отже, під час абразивного оброблення відбувається мікро- і субмікрорізання.

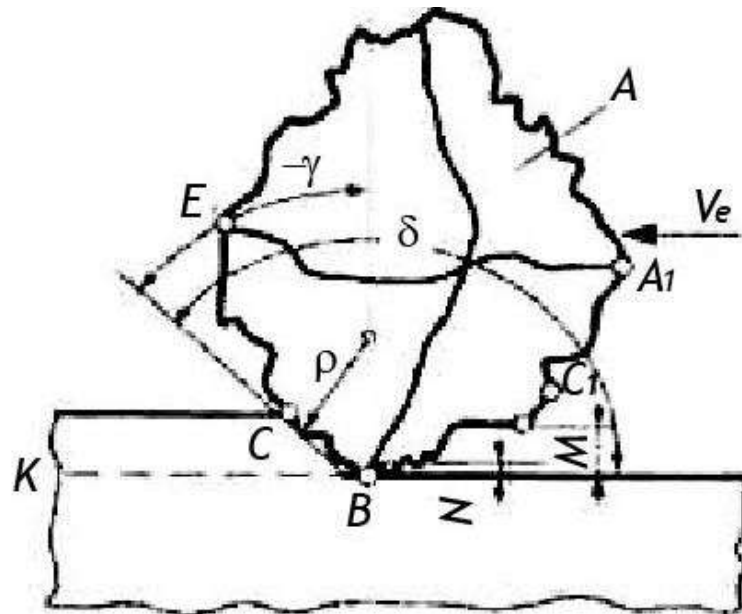


Рис. 3.7. Форма абразивного зерна під час мікрорізання: А – основний дряпаючий елемент (абразивне зерно); М – мікровиступ; N – субмікростав; KL – лінія зрізу

Особливості абразивного оброблення дозволяють умовно визначити його місце як проміжне між різанням лезовими інструментами та зношуванням у процесі тертя: різання лезовими інструментами => шліфування => хонінгування, доведення, притирання => полірування => зношування під час тертя.

3.4. Основи будови абразивних інструментів

Моделювання структури абразивно-алмазних інструментів є визначальним етапом у розробці теоретичних основ процесу шліфування. Теоретичні роботи у цій сфері, зазвичай, спрямовані на створення модельних уявлень про шліфувальний круг як об'єкт, й отримання на їх основі аналітичних залежностей, що пов'язують початкові параметри з характеристиками розміщування елементів зерен на його робочій поверхні тощо

Складність отримання реалістичної моделі робочої поверхні абразивного інструмента пов'язана зі стохастичною (випадковою) природою вихідного об'єкта. Серед всіх різальних інструментів абразивні є єдиними, в яких регламентуються не геометричні параметри різальних елементів, а зерновий склад вихідної наважки зерен. Це ускладнює дослідження рельєфу інструмента, вимагає застосування методів теорії

ймовірності та математичної статистики у моделюванні й опису результатів експериментальних досліджень.

Можна виділити чотири основних елементи на основі яких будують статичні моделі робочої поверхні абразивно-алмазного інструмента: форма й закон розподілу розмірів зерен, закон розподілу центрів зерен в абразивному просторі, простір абразивного шару й поверхня зв'язки, певним чином розміщена в абразивному просторі, розподіл вершин зерен відносно поверхні зв'язки.

У теоретичних розрахунках і моделюванні складну геометричну форму реальних алмазних і абразивних зерен дослідники виходячи з вирішуваного завдання, замінювали спрощеним еквівалентом на основі тривісного еліпсоїда: сферою або еліпсоїдом обертання з постійним співвідношенням осей.

3.4.1. Розподіл розмірів абразивних зерен

Окрім основної, у складі порошків містяться побічні фракції: крупніші або дрібніші. Для опису всієї різноманітності діапазонів з урахуванням ймовірнісної природи розмірів зерен необхідно виконати їх статистичну параметризацію.

Параметризація забезпечується модифікацією параметрів масштабованих законів розподілу зі приведенням їх до трьох коефіцієнтів: характеристичного розміру абразивних зерен a_0 (масштабний коефіцієнт, мкм), коефіцієнта зсуву математичного сподівання відносно характеристичного розміру k_m (коефіцієнт відносного розміщення) і коефіцієнта варіації k_v (коефіцієнт форми). Такий підхід аналогічний визначенню геометричних параметрів зубів інструмента для оброблення евольвентних зубчастих коліс, де модуль – масштабний коефіцієнт, а інші безрозмірні параметри визначають профіль інструмента.

Характеристичний розмір a_0 – максимальний розмір зерен основної фракції (у мкм). Залежно від позначення зернистості й типів абразивних порошків його значення визначають таким чином:

- абразивне, шліфзерно і шліфпорошки (ГОСТ 3647–80), де $a_0 = 12,6Z$, де Z – номер зернистості ($Z = 200 \dots 4$);
- абразивні мікропорошки (ГОСТ 3647–80), де a_0 відповідає числу після літери М (М63–М5);
- порошки і мікропорошки зі синтетичного алмазу і КНБ (ДСТУ 3292–95, до цього був ГОСТ 9206–80), де a_0 – відповідає чисельнику дробу.

Коефіцієнт відносного розміщення k_m – відношення математичного очікування E закону розподілу розмірів зерен до характеристичного

розміру a_0 :

$$k_m = \frac{E}{a_0}. \quad (3.6)$$

Тоді середній розмір абразивних зерен d_{mean} визначається залежністю:

$$d_{mean} = a_0 \cdot k_m. \quad (3.7)$$

Коефіцієнт варіації k_v – відношення середньоквадратичного відхилення s закону розподілу розмірів зерен до математичного сподівання: $k_v = s/E$. Тоді середньоквадратичне відхилення розмірів зерен визначають $s = d_{mean} k_v = a_0 k_m k_v$.

Інтервал можливих значень розмірів зерен відповідає $0 < d < d_{max}$. У загальному випадку максимально можливий розмір зерен визначають за залежністю (значення коефіцієнтів наведено у табл. 12.1):

$$d_{max} = a_0 k_{max} = a_0 k_{lim} k_{form}, \quad (3.8)$$

де k_{lim} – коефіцієнт граничної фракції, який залежить від знаменника геометричної прогресії інтервалу розмірів фракцій;

k_{form} – коефіцієнт форми зерен, характеризує їх можливість проходити через отвори граничного сита найменшого перетину: $k_{form} = 1 \dots 1,3$ (для орієнтовних розрахунків $k_{form} \approx 1,15$), для мікропорошків контрольованих мікроскопічним методом $k_{form} = 1$.

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнтів, що визначають $d_{max} = a_0 k_{max}$

Найменування	k_{lim}	k_{form}	k_{max}
Абразивне шліфзерно і шліфпорошки	$\varphi = 1,26$	1,15	1,45
Шліфпорошки із НТМ вузького діапазона зернистості	$\varphi^2 = 1,59$	1,15	1,83
Шліфпорошки із НТМ широкого діапазона зернистості	$\varphi^4 = 2,54$	1,15	2,92
Мікропорошки із НТМ вузького діапазона зернистості	$\varphi^2 = 1,59$	1	1,59

Розподіл розмірів абразивних зерен. Розглянемо основні властивості нормального закону розподілу й похідного від нього логарифмічно-нормального, найбільш часто використовуваних під час опису розподілу параметрів робочої поверхні абразивного інструмента та початкових характеристик шліфпорошків.

Щільність ймовірності розподілу зерен $d \equiv x$ за норманим законом має вид:

$$f_N(x; \mu_N; \sigma_N) = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_N}{\sigma_N} \right)^2 \right], \quad 0 < x < d_{max}, \quad (3.9)$$

де μ_N, σ_N – параметри закону розподілу, залежні від характеристик

порошку ($\mu_N = a_0 k_m$, $\sigma_N = a_0 k_m k_v$) і відповідно математичному сподіванню $E(d_{\text{mean}})$ та середньокадратичному відхиленню s ; $d_{\text{max}} = a_0 k_{\text{max}}$.

Випадкова величина x вважається логарифмічно - нормальною розподіленою, якщо її логарифм ($\ln x$) підпорядкований нормальному закону розподілу. Щільність імовірності для логарифмічно-нормального розподілу розмірів зерен $d \equiv x$:

$$f_{LN}(x; \mu_{LN}; \sigma_{LN}) = \frac{1}{x \sigma_{LN} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_{LN}}{\sigma_{LN}} \right)^2 \right], \quad 0 < x < d_{\text{max}}, \quad (3.10)$$

де μ_{LN} , σ_{LN} – параметри закону розподілу, які залежать від характеристик порошку, що визначаються за залежностями:

$$\mu_{LN} = \ln \left(\frac{a_0 k_m}{\sqrt{k_v^2 + 1}} \right); \quad \sigma_{LN} = \sqrt{\ln k_v^2 + 1}. \quad (3.11)$$

Перехід до характеристичних параметрів (a_0 , k_m , k_v) для логарифмічно-нормального закону розподілу проводиться вирішенням системи нелінійних рівнянь відносно параметрів μ_{LN} , σ_{LN} :

$$\begin{cases} a_0 k_m = \exp \mu_{LN} + \frac{\sigma_{LN}^2}{2} \\ a_0 k_m k_v^2 = \exp 2\mu_{LN} + [\exp \sigma_{LN}^2 - 1] \end{cases} \quad (3.12)$$

де $a_0 k_m = E$ – математичне сподівання;

$(a_0 k_m k_v)^2 = s^2 = D$ – дисперсія.

Таким чином, функції щільності ймовірності нормального (3.9) і логарифмічно-нормального (3.10) розподілів залежать від характеристичних (модифікованих) параметрів (a_0 , k_m , k_v). Значення параметрів для практичних розрахунків наведено у табл. 3.2, а приклади графіків щільності розподілу розмірів зображено на рис. 3. 8.

Приклад. Виберемо нормальний закон розподілу розмірів зерен з параметрами, що мають збіжні значення із табл. 3.2 (абразивне шліфзерно, шліфпорошки з індексом Н, шліфпорошки із НТМ широкого діапазону зернистості): коефіцієнт відносного розташування математичного очікування $k_m = 0,82$; коефіцієнт варіації $k_v = 0,27$. Характеристичний розмір зерен приймемо $a_0 = 200$ мкм, що одночасно відповідає зернистості: $Z = a_0/12,6 = 15,9 \approx 16$ (абразивне шліфзерно і шліфпорошки) і $200/125$ (шліфпорошки із НТМ широкого діапазону зернистості). Тоді середній розмір зерен $d_{\text{mean}} = a_0 k_m = 200 \cdot 0,82 = 164$ мкм.

Таблиця 3.8

Значення параметрів законів розподілу розмірів зерен

Найменування	Закон розподілу розмірів зерен			
	нормальний		логарифмічно-нормальний	
	k_m	k_v	k_m	k_v
Абразивне шліфзерно і шліф порошки з індексом П	0,85...0,88	0,22...0,23	0,85...0,87	0,19...0,20
Абразивне шліфзерно і шліф порошки з індексом Н	0,79...0,83	0,25...0,29	0,81...0,85	0,20...0,22
Абразивне шліфзерно з індексом Д	0,81...0,82	0,34...0,36	0,84...0,85	0,27...0,28
Шліфпорошки із НТМ вузького діапазону зернистості	0,91...0,92	0,10...0,16	0,92...0,94	0,11...0,17
Шліфпорошки із НТМ широкого діапазону зернистості	0,80...0,84	0,21...0,35	0,77...0,84	0,22...0,30



Рис. 3.8. Щільності логарифмічно-нормального розподілу розмірів зерен у формі тривісного еліпсоїда для алмазно-абразивних шліфпорошків, мікропорошків і субмікропорошків за ДСТУ 3292–95

3.4.2. Кількість зерен в одиниці об'єму абразивного інструмента

Розглянемо вихідний абразивний шар (абразивний простір $X - Y - Z$),

який для простоти наступних міркувань падає, як куб зі сторонами A , мкм. Центри зерен рівномірно (за законом рівної ймовірності) розподілені у просторі абразивного шару. Математичне сподівання (середній розмір) зерен, що мають форму сфери $d_{mean} = a_0 k_m$. Зерна займають тільки частину об'єму куба: $V_z = A^3 K_v$, де $K_v < 1$ коефіцієнт відносного об'єму, займаного зернами. Тоді кількість зерен Z_v у виділеному об'ємі A^3 дорівнюватиме відношенню їх об'єму V_z до об'єму $\pi(d_{mean})^3 / 6$ середнього одиничного зерна (A , d_{mean} , a_0 – величини співрозмірні):

$$Z_v = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^3 \quad K_v = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{a_0 k_m} \right)^3 K_v. \quad (3.13)$$

Коефіцієнт відносного об'єму знаходять за залежностями:

- для інструментів із абразивних матеріалів

$$K_v = \frac{(31 - N)}{50};$$

- для інструментів із синтетичного алмазу і КНБ

$$K_v = \frac{K}{400}$$

де N – номер структури (умовний);

K – концентрація (умовна) надтвердого матеріалу в абразивному шарі, %.

Взаємозв'язок між відносною об'ємною концентрацією зерен в абразивному шарі K_v і характеристиками абразивних (N) і абразивно-алмазних інструментів (K) подано на рис. 3.9. Для алмазного інструмента $K_v = 0,0625 \dots 0,5$ ($K = 25 \dots 200$ %), а для абразивною $K_v = 0,38 \dots 0,6$ ($N = 12 \dots 1$), тобто алмазний інструмент має, зазвичай, істотно меншу об'ємну концентрацію. Для прикладу виберемо збіжне значення $K_v = 0,5$ ($N = 6$, $K = 200$ %).

Приклад: $Z_v = 216,5$ шт/мм³ ($A = 1000$ мкм; $d_{mean} = 164$ мкм).

3.4.3. Кількість зерен на одиниці площі робочої поверхні абразивного інструмента

Робочу поверхню абразивного інструмента можна уявити як напівпростір абразивного шару, обмежений поверхнею зв'язки. У загальному випадку поверхня зв'язки може мати довільну форму. Для простоти міркувань візьмемо площину, що не відіб'ється на кінцевому результаті.

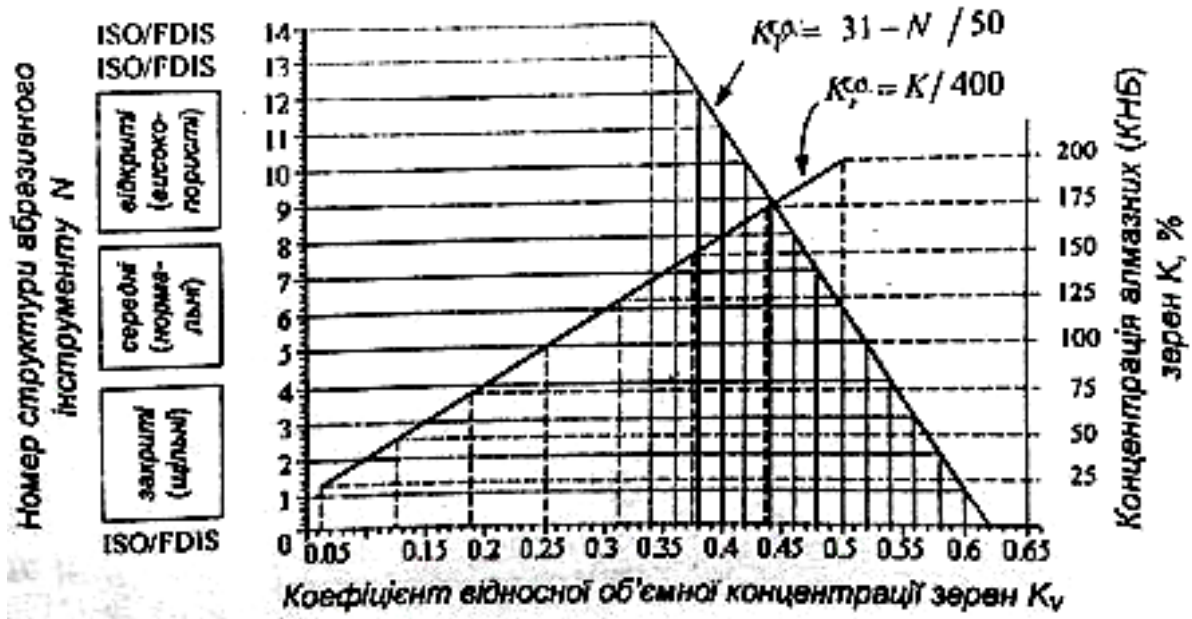


Рис. 3.9. Взаємозв'язок між відносною об'ємною концентрацією зерен K_v і характеристиками абразивних та абразивно-алмазних інструментів

Виконаємо перетин початкового абразивного простору A площиною $X - Z$ (умовна поверхня зв'язки). У перетин потраплять зерна, центри яких перетинаються від нього на відстані меншій половини їх діаметра d_{mean} . Тоді кількість зерен Z_{SO} , що потрапили у перетин $X - Z$, буде в A / d_{mean} менша від Z_v :

$$Z_{SO} = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^2 ; \quad K_v = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{a_0 k_m} \right)^2 K_v \quad (3.16)$$

Розділимо абразивний простір A відповідного перегину $X - Z$, відкинувши одну його частину, і отримаємо напівпростір робочої поверхні інструмента. При цьому не всі зерна зв'язки, що перетинаються поверхнею, залишаться зафіксованими на робочій поверхні, частина їх (слабо закріплених) випаде. Для урахування зерен, що залишилися, введемо коефіцієнт відносної висоти виступання зерен над рівнем зв'язки k_h ($0 < k_h < 1$). Тоді можна записати вираз для кількості зерен на одиниці площі робочої поверхні:

$$Z_s = Z_{SO} k_h = \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^2 K_v ; \quad k_h = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{a_0 k_m} \right)^2 K_v k_h \quad (3.17)$$

Відносна критична глибина закладення зерен у зв'язці $\epsilon_{кр} = 1 - k_h$. Для практичних розрахунків можна взяти такі значення: $k_h = 0,9 \dots 0,5$ для зерен з абразивних матеріалів; $k_h = 0,5 \dots 0,3$ для алмазу і КНБ.

Експериментальне визначення k_h відповідає знаходженню відношення $Z_{s(факт)}$ і Z_{SO} , де $Z_{s(факт)}$ знаходять безпосереднім підрахунком зерен,

видимих на одиниці площі поверхні інструмента, а Z_{SO} визначається за формулою (3. 16).

Приклад: Відповідно до формул (3.16) і (3.17) за умови $Z_s = 17,75$ шт/мм² площа поверхні $A = 1000$; $d_{mean} = 164$ мкм; $K_v = 0,5$; $k_h = 0,5$.

3.4.4. Розподіл вершин зерен на робочій поверхні

Визначення статистично обґрунтованого закону розподілу вершин зерен на робочій поверхні абразивного інструмента необхідно одночасно враховувати ймовірнісний характер розподілу їх центрів та розмірів. Розглянемо випадок, коли центри зерен розподілені у вихідному абразивному просторі рівноймовірно (рівномірний закон розподілу), а розподіл розмірів зерен відповідає нормальному закону (3.8).

Визначення закону розподілу вершин зерен відносно рівня зв'язки виконуватимемо у такій послідовності:

— виконаємо перетин абразивного простору площиною.

— визначимо щільність розподілу вершин зерен відносно січної площини. Відстань від вершини кожного окремого i -го зерна до січної площини: $y_i = c_i + \frac{d_i}{2}$, де c_i – відстань від центру зерна до січної площини; d_i – розмір зерна. Щільність результуючого розподілу для випадку підсумовування взаємно незалежних випадкових величин буде їх композицією.

— перейдемо від абразивного простору до на півпростору (робочої поверхні інструмента). Перехід проводиться скороченням результуючого закону розподілу для негативних значень координат вершин зерен.

Теоретична щільність імовірності розподілу вершин зерен над поверхнею зв'язки матиме вигляд:

$$f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) = \frac{1}{2\mu_{GD}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \mu_{GD}}{\sqrt{2}\sigma_{GD}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \mu_{GD}}{\sqrt{2}\sigma_{GD}} \right) \right]; 0 \leq y < \infty, \quad (3.18)$$

де μ_{GD} , σ_{GD} – параметри розподілу;

$\operatorname{erf}(z)$ – функція помилки.

Імовірність розподілу F_{GD} y , μ_{GD} , σ_{GD} = $\int_0^y f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) dy$:

$$F_{GD} = \frac{\sigma_{GD}}{2\mu_{GD}} \left\{ z_1 \operatorname{erf} \left(\frac{z_1}{\sqrt{2}} \right) - z_2 \operatorname{erf} \left(\frac{z_2}{\sqrt{2}} \right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\exp \left(-\frac{z_1^2}{2} \right) - \exp \left(-\frac{z_2^2}{2} \right) \right] \right\}, \quad (3.19)$$

де $z_1 = \frac{(y + \mu_{GD})}{\sigma_{GD}}$, $z_2 = \frac{(y - \mu_{GD})}{\sigma_{GD}}$.

Імовірність розподілу вершин зерен відносно рівня зв'язки

$F_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD})$ визначає відносну кількість вершин зерен (відносно загальної кількості зерен на поверхні зв'язки) в інтервалі $0 - y$, тобто у шарі між поверхнею зв'язки й еквідистантною поверхнею, розміщеною на відстані y .

Особливий інтерес викликає взаємозв'язок параметрів закону розподілу вершин зерен μ_{GD} , σ_{GD} з параметрами розподілу їх розмірів μ_N , σ_N . Як показали модельні дослідження, для нормального закону розподілу діаметрів зерен цей взаємозв'язок має наступний вигляд:

$$\mu_{GD} = \mu_N k_h = a_0 k_m k_h; \quad \sigma_{GD} = \sigma_N k_h = a_0 k_m k_v k_h, \quad (3.20)$$

де k_h – коефіцієнт відносної висоти виступання зерен над рівнем зв'язки.

Отриманий теоретичний закон розподілу вершин зерен над поверхнею зв'язки заданий в інтервалі від 0 до ∞ . Насправді розмір абразивних зерен обмежений значеннями $d_{\max} = a_0 k_{\max}$ (табл. 3. 1). Тоді максимально можливу висоту виступання зерен із зв'язки h_{\max} визначають виразом $h_{\max} = d_{\max} k_h = a_0 k_{\max} k_h$.

Необхідний закон розподілу може бути отриманий обрізанням справа рівняння (12.18) до координати вершини максимально виступаючого зерна h_{\max} :

$$f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) = \frac{k}{2\mu_{GD}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \mu_{GD}}{\sqrt{2}\sigma_{GD}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \mu_{GD}}{\sqrt{2}\sigma_{GD}} \right) \right]; 0 \leq y < h_{\max}, \quad (3.21)$$

де $k > 1$ – коефіцієнт, що компенсує обрізання (для розрахунків $k \cong 1$):

$$k = \frac{1}{\int_0^{h_{\max}} f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) dy} = \frac{1}{F_{GD}(h_{\max}, \mu_{GD}, \sigma_{GD})}.$$

Математичне сподівання (очікуване середнє значення) висоти виступання зерен відносно рівня зв'язки $h_{mean} = E_{GD} = \int_0^{\infty} y f_{GD} y dy$:

$$h_{mean} = E_{GD} \mu_{GD}, k_v = \mu_{GD} \frac{1}{2} \left[1 + k_v^2 \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{2}k_v} \right) + \frac{k_v}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2k_v^2} \right) \right], \quad (3.22)$$

де $\mu_{GD} = a_0 k_m k_h$;

k_v – коефіцієнт варіації.

Для спрощення практичних розрахунків вираз для математичного сподівання можна представити у вигляді $h_{mean} = E_{GD}(\mu_{GD}, k_v) = \mu_{GD} \varphi_{EGD}(k_v)$, де $\varphi_{EGD}(k_v)$ – апроксимуюча функція, що забезпечує відносну помилку $\delta < 0,1$ % для $k_v = 0,1 \dots 0,8$:

$$\varphi_{EGD} k_v = \left(0,365 + 0,407 k_v + \frac{0,0277}{k_v + 0,178} \right). \quad (3.23)$$

Маючи вираз для математичного сподівання висоти виступання зерен над рівнем зв'язки можна визначити відносні кількості (коефіцієнти) зерен, розміщених нижче k_c ($0 < y < h_{mean}$) або вище k_z ($h_{mean} < y < \infty$) рівня зв'язки h_{mean} . Між собою ці коефіцієнти зв'язані залежністю $k_c + k_z = 1$. Аналітично коефіцієнт k_c визначається підстановкою у функцію ймовірності (3.19) розподілу вершин зерен над рівнем зв'язки $F_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD})$ параметрів μ_{GD} , σ_{GD} (3.20) і значення аргументу $y = h_{mean}$ (3.22). Для компактнішого вигляду отриманий вираз $k_c = f(k_v)$ апроксимований з відносною помилкою $\delta < 0,1$ % для $k_v = 0,1 - 0,8$. Остаточну залежність для відносної кількості вершин зерен, розташованих нижче k_c і вище k_z математичного сподівання висоти виступання зерен h_{mean} мають такий вигляд:

$$k_c k_v \cong \frac{0,621 + 2,2829k_v - 1,543k_v^2}{1,259 + 4,7474k_v - 3,359k_v^2}; \quad k_z k_v = 1 - k_c k_v. \quad (3.24)$$

Результати розрахунків (рис. 3.10) показують, що коефіцієнти відносної кількості зерен майже не відрізняються від значення 0,5, отже: $k_c \approx k_z \approx 0,5$. Тоді середня кількість зерен на одиниці площі робочої поверхні, відповідна середній висоті їх виступання над рівнем умовної поверхні зв'язки з урахуванням (3.17) матиме вигляд

$$Z_{Smean} = Z_s k_z \approx 0,5 Z_s \approx \frac{3}{\pi} \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^2 K_v k_h = \frac{3}{\pi} \left(\frac{A}{a_0 k_m} \right)^2 K_v k_h. \quad (3.25)$$

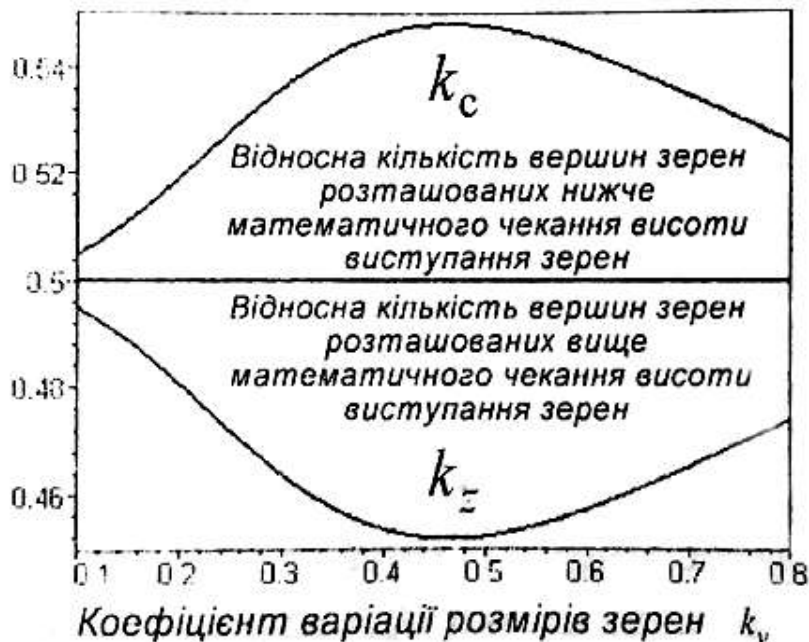


Рис. 3.10. Значення коефіцієнтів відносної кількості вершин зерен

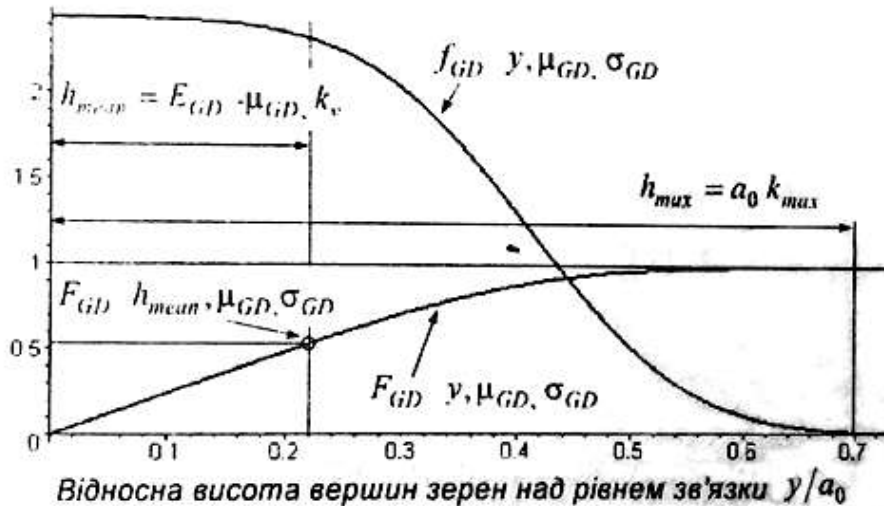


Рис. 3.11. Схема розподілу вершин зерен над рівнем зв'язки

Типовий графік щільності (3.21) і функції (3.19) розподілу вершин зерен відносно рівня зв'язки u в відносних координатах (u/a_0) подано на рис. 3.11. Параметри і характеристики розподілу визначено для умов попередніх прикладів (для одиничного характеристичного розміру $a_0 = 1$): $\mu_{GD} = 0,41a_0$; $\sigma_{GD} = 0,11 a_0$; $h_{max} = 0,72 a_0$; $h_{mean} = 0,22 a_0$; $F_{GD}(h_{mean}) = 0,53$ ($k_m = 0,82$; $k_v = 0,27$; $k_h = 0,5$); $Z_{Smean} = 8,88$ шт/мм² ($a_0 = 200$ мкм).

3.4.5. Кількість зерен на одиниці довжини робочої поверхні

Виконаємо перетин робочої поверхні площиною, перпендикулярною умовній поверхні зв'язки. Кількість зерен, що потрапили у перетин, буде у A/d_{mean} разів меншою від Z_S . Тоді маємо кількість зерен на одиниці довжини робочої поверхні відповідно до рівня зв'язки:

$$Z_L = \frac{6}{\pi} \frac{A}{d_{mean}} K_v k_h = \frac{6}{\pi} \frac{A}{a_0 k_m} K_v k_h. \quad (3.26)$$

Середню кількість зерен на одиниці довжини робочої поверхні, що відповідає середній висоті їх виступання над рівнем умовної поверхні зв'язки, отримаємо аналогічно (3.25):

$$Z_{Lmean} = Z_L k_z \approx 0,5 Z_L \approx \frac{3}{\pi} \frac{A}{d_{mean}} K_v k_h = \frac{3}{\pi} \frac{A}{a_0 k_m} K_v k_h. \quad (3.27)$$

Середня відстань (крок) між зернами за рівнем їх середньої висоти визначають як довжина абразивного простору A до Z_{Lmean} :

$$l_{Zmean} = \frac{A}{Z_{Lmean}} = \frac{\pi}{3} \frac{d_{mean}}{K_v k_h} = \frac{\pi}{3} \frac{a_0 k_m}{K_v k_h}. \quad (3.28)$$

Приклад: $Z_{Lmean} = 1,46$ шт/мм; $l_{Zmean} = 0,687$ мм ($A = 1000$ мкм; $d_{mean} = 164$ мкм; $K_v = 0,5$; $k_m = 0,82$; $k_h = 0,5$).

3.5. Закономірності процесу різання одиничним зерном

У процесі шліфування відбувається одночасне врізання в оброблювану заготовку декількох зерен, що перетинають в цей момент у зоні контакту.

У зв'язку з тим, що зерна у крузі розміщені на різній висоті, спочатку в оброблюваний матеріал врізаються кромки зерен, які найбільш виступають зерен, потім ті, що розміщені глибше. Під час врізання у матеріал кромка зерна спочатку його деформує пружно, пластично і лише після цього може відбуватися відділення стружки. При цьому дуже багато зерен у процесі ковзання по поверхні різання ущільнюються. Крім того відбувається додатковий вплив температури на процес мікрорізання у зоні оброблення.

У тих випадках, коли зерна мають гострі кромки, невеликі радіуси заокруглень та оптимальні кути, відбувається мікрорізання металу. Якщо зерна мають затуплені кромки, великі радіуси заокруглення та ще й вони несприятливо орієнтовані відносно поверхні різання, то відбувається її дряпання, причому утворення стружки супроводжується істотним підвищенням температури, а сформована стружка частково або повністю згорає.

Найсильніш навантаженими є зерна, що найбільше виступають над рівнем зв'язки (різальні і деформівні), а інші певний час не працюють (знаходяться у резерві). Зношення найбільше виступаючих зерен або їх руйнування (повне чи часткове) вводять ці зерна у роботу. Для певних умов шліфування не працює близько 78 % абразивних зерен, 12 % – деформуються та лише 10 % – різальні.

3.5.1. Дуга контакту шліфувального зерна із заготовкою

Умови різання одиничним зерном визначають, насамперед, дугою його контакту з заготовкою у процесі оброблення. Її визначення у загальному вигляді для основних схем шліфування достатньо складне завдання.

Наразі розповсюджено спосіб, який дозволяє вирішити питання кінематики процесу шліфування за рахунок деяких допущень. Визначення дуги контакту L_m проводять у статичній системі координат, а урахування кінематичних особливостей складного відносного руху окремих видів шліфування проводять введенням параметру M :

$$M(V_k, V_3, V_i) = \sqrt{\left(1 \pm \frac{V_3}{60V_k}\right)^2 + \left(\frac{V_i}{60V_k}\right)^2}, \quad (3.29)$$

де знак «+» приймають у зустрічному шліфуванні (вектори швидкостей шліфувального круга V_k і заготовки V_3 у точці їх перетину направлені у протилежні напрями); знак «-» – у зустрічному шліфуванні; V_i – швидкість подачі уздовж осі обертання шліфувального круга (в окремих випадках $V_i = 0$, наприклад, у врізному шліфуванні).

Для вживаних значень швидкостей $M \approx 1$ у практичних розрахунках і може зазвичай не враховуватися.

Узагальнена схема визначення дуги перетину для основних видів шліфування зображена на рис. 3.12. Шліфувальний круг видаляє із заготовки шар матеріалу глибиною t . Окреме абразивне зерно розпочинає роботу в точці D і виходить із зони перетину в точці B . Центральний кут θ_m відповідний початку і кінцю робочого циклу абразивного зерна називають максимальним кутом перетину. Дуги контакту $L_m = \cup DB$ відповідають таким видам шліфування: DB_3 – кругле зовнішнє; $DB_{пл}$ – плоске периферією круга; $DB_{вн}$ – внутрішнє ($L_3 < L_{пл} < L_{вн}$ для $t = \text{const}$).

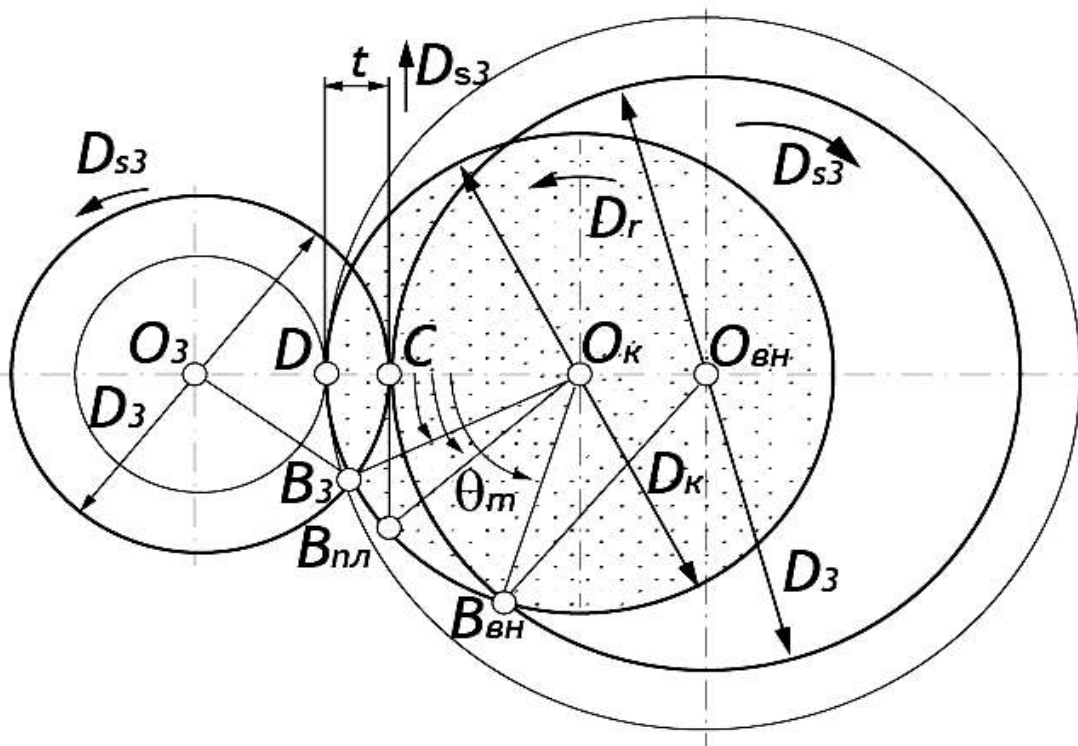


Рис. 3.12. Схема визначення довжини дуги перетину круга з заготовкою під час зовнішнього, внутрішнього і плоского шліфування

У результаті допущень, оснований на тому, що для $t \ll D_K (\theta_m \rightarrow 0; \sin \theta_m \approx \theta_m)$ і відкидання малозначних членів у рівняннях, отримані залежності для максимальних дуг перетину:

— кругле зовнішнє і внутрішнє шліфування периферією круга

$$L_{z(вн)} = M(V_k, V_z, V_i) \sqrt{\frac{D_z D_K t}{D_z \pm D_K}}, \quad (3.30)$$

де знак «+» береться у зовнішньому шліфуванні; «-» – у внутрішньому; $V_i = V_{np}$ у багатопрхідному шліфуванні і $V_i = 0$ у врізному;

— плоске шліфування периферією круга:

$$L_{пл} = M(V_k, V_z = V_{np}, V_i = 0) \sqrt{D_K t} \quad (3.31)$$

Аналіз поданих залежностей пояснює, що максимальна довжина дуги контакту під час плоского шліфування (12.31) відповідає загальному випадку (12.30) для нескінчено великого радіусу кривизни заготовки

$$L_{пл} = \lim_{R_d \rightarrow \infty} L_{z(вн)}.$$

У випадку плоского шліфування торцем круга, максимальна дуга перетину визначають аналогічно торцевому фрезеруванню. У випадку симетричного розташування круга відносно ширини заготовки B_z :

$$L_{плm} = M(V_k, V_z = V_{np}, V_i = 0) \left(\frac{D_K}{2} \right) \arcsin \left(\frac{B_z}{D_K} \right) \quad (3.32)$$

Для цього виду оброблення довжини дуги контакту значно більше, ніж для інших, раніше розглянутих: $L_{плm} \gg L_{вн} > L_{пл} > L_z (t = \text{const})$.

Знаючи максимальну довжину дуги контакту L_m , можна визначити максимально можливий час контакту τ_m окремого абразивного зерна:

$$\tau_m = \frac{M(V_k, V_z, V_i) L_m}{V_k}. \quad (3.33)$$

3.5.2. Миттєві параметри зрізаного шару під час шліфування

Продуктивність процесу шліфування Q_v (мм³/хв) визначають об'ємом матеріалу, видаленого з поверхні заготовки за одиницю часу. Для більшості схем шліфування:

$$Q_v = 1000 V_z \cdot t \cdot S_B \cdot B_K. \quad (3.34)$$

Довжина шляху $L_{ш}$ (мм) пройденого робочою поверхнею шліфувального круга L_K (м/с) у разі його контакту з оброблюваною заготовкою за 1 хв:

$$L_{ш} = 1000 \cdot 60 \cdot V_K. \quad (3.35)$$

Обертання заготовки не враховуємо, оскільки $\frac{V_3}{60V_K} \approx 0,01$.

Площа $f_{ш}$ (мм²) середнього миттєвого перетину шару, знятого всіма абразивними зернами, дорівнюватиме відношенню об'єму знятого матеріалу за 1 хв до довжини шляху $L_{ш}$:

$$f_{ш} = \frac{Q_v}{L_{ш}} = \frac{V_3}{60V_K} t \cdot S_B \cdot B_K. \quad (3.36)$$

Аналізуючи отриману залежність, можна стверджувати, що зі збільшенням відношення L_3/L_K зростає $f_{ш}$ а отже, і навантаження на абразивні зерна; круг зношуватиметься швидше, шорсткість поверхні збільшиться. Звідси витікає, що для зниження навантаження на робочу поверхню круга слід працювати з найбільш можливою швидкістю різання L_K , меншою V_3 і малими значеннями t і S_B . Зниженню шорсткості обробленої поверхні сприяє також використання дрібнозернистих кругів.

Знаючи площу $f_{ш} = a_{ш} b_{ш}$, можна обчислити середню миттєву товщину шару $a_{ш}$ (мм), що знімається всіма абразивними зернами, розділивши $f_{ш}$ на ширину шару $b_{ш} = B_K$ (ширину робочої поверхні круга):

$$a_{ш} = \frac{V_3}{60V_K} t \cdot S_B. \quad (3.36)$$

Відношення $\frac{V_3}{60V_K}$ і коефіцієнт S_B визначають характер розподілу матеріалу, що видаляється, з поверхні заготовки по довжині і ширині шліфувального круга. Під час врізного шліфування ($S_B = 1$) всі зерна по ширині робочої поверхні працюють приблизно в однакових умовах (без врахування крайових ефектів). Під час багатопрхідного шліфування ($S_B < 1$) тільки частина ширини круга ($S_B B_K$) працює з повним навантаженням (за аналогією з лезовим інструментом – забірна частина), а решта виконує функції калібрувальної, що дошліфовує.

3.5.3. Параметри шару, що зрізають одним абразивним зерном

Визначимо середній об'єм, що зрізають одним абразивним зерном, яке знаходиться на робочій поверхні шліфувального круга:

$$v_{Z_{mean}} = \frac{Q_v}{Z_{mean}} \quad (3.38)$$

де Q_v – продуктивність процесу шліфування, мм³/хв. (3.34);

Z_{mean} – середня кількість зерен, що знаходяться на поверхні шліфувального круга $F_{ш}$ (мм²) у разі його контакту з оброблюваною заготовкою за 1 хв.

Площа поверхні $F_{ш}$ (мм²) дорівнює добутку довжини шляху $L_{ш}$ (мм), пройденого робочою поверхнею шліфувального круга V_K (м/с) у разі його

контакту з оброблюваною заготовкою за 1 хв. (3.35) на ширину круга B_k (мм):

$$F_u = L_u B_k = 1000 \cdot 60 \cdot V_k \cdot B_k. \quad (3.39)$$

Середня кількість зерен на 1 мм^2 робочої поверхні, відповідає середній висоті їх виступу над рівнем умовної поверхні зв'язки Z_{Smean} і визначається залежністю (12.35). Тоді середній об'єм, що зрізають одним абразивним зерном, яке знаходиться на робочій поверхні шліфувального круга v_{Zmean} , мм^3 :

$$v_{Zmean} = \frac{Q_v}{F_u Z_{Smean}} = \frac{a_u}{Z_{Smean}} = \frac{V_z}{60V_k} t \cdot S_B \frac{\pi}{3} \frac{1}{10^6} \frac{d_{mean}^2}{K_v k_h}. \quad (3.40)$$

Отриманий вираз дозволяє оцінити способи зниження навантаження на одиначне зерно. Найбільший вплив чинить квадрат його розміру. У разі збільшення концентрації зерен в об'ємі абразивного шару K_v навантаження зменшується. Такий самий вплив має коефіцієнт k_h , що визначає кількість зерен на робочій поверхні круга. Чим більше зерен на поверхні інструмента, тим менше навантаження на кожне з них.

У реальності процес взаємодії інструмента з оброблюваною заготовкою на всіх етапах мікрорізання й формування мікрогеометрії обробленої поверхні набагато складніший, має стохастичний характер і розглядається на базі теоретико-імовірнісного підходу.

3.6. Сили різання і потужність під час шліфування

Розглянемо сумарну результуючу силу різання P , яка розкладається на три складові: тангенціальну P_z (по дотичній до траєкторії руху різання інструмента); нормальну P_y (по нормалі до робочої поверхні інструмента) і силу опору подачі P_x (осьову). Складова сили різання P_z визначає необхідну потужність електродвигуна верстата, пружні деформації заготовки і круга, що впливають на точність оброблення P_y , P_x – зусилля, необхідне для здійснення поздовжньої подачі круга або заготовки.

Зазвичай співвідношення між цими складовими становлять: $P_y = (1,5 \dots 3) P_z$; $P_x = (0,1 \dots 0,2) P_z$. Відношення P_z/P_y називають коефіцієнтом абразивного різання k_a . Для абразивного оброблення характерне значення $k_a < 1$ (при різанні лезовим інструментом $P_z/P_y > 1$).

Встановлено, що P_z збільшується у разі підвищення продуктивності оброблення $Q_v \sim V_d \cdot S \cdot t$ і знижується зі зростанням швидкості шліфування V_k , тобто визначальним чинником є середній миттєвий перетин зрізаного шару $f_{ш}$ (12.36).

Зі зменшенням зернистості круга (середнього розміру зерен d_{mean}) сила різання, що приходить на одиначне зерно, зменшується, але разом з тим сумарна сила різання збільшується, оскільки зменшуються перетини шару,

що зрізають окремими зернами. У свою чергу це приводить до зростання енергоємності процесу відділення оброблюваного матеріалу.

На величину складових сил різання значно впливають властивості оброблюваного матеріалу, різальні властивості робочої поверхні, МОТС та ін.

Чим гостріші абразивні зерна, тим менша площа їх контакту з оброблюваною поверхнею, тим легше відбувається мікрорізання за менших сил різання. Наприклад, під час шліфування твердих сплавів алмазними кругами сили різання у 3...5 разів менші, ніж за роботи кругами з карбіду кремнію зеленого.

У роботі з охолодженням сила різання менша, ніж у роботі насухо. Під час шліфування з масляними МОР сили різання у 2 рази менше, ніж у разі застосування водних розчинів.

Потужність (кВт), необхідну для руху круга N_k і заготовки N_z , визначають за залежностями:

$$N_k = \frac{P_z V_k}{1000 \eta_1}; \quad N_z = \frac{P_z V_k}{1000 \eta_2}, \quad (3.41)$$

де η_1, η_2 – коефіцієнт корисної дії приводів шліфувального круга і заготовки.

3.7. Теплові явища при абразивному обробленні й методи керування ними

Серед методів абразивного оброблення шліфування характеризується найбільшою інтенсивністю виділення теплоти, що пов'язане з високими швидкостями різання і продуктивністю процесу.

3.7.1. Особливості теплових явищ під час шліфування

Процес шліфування характеризується високими температурами у зоні різання, які можуть стати причиною появи структурно змінених шарів шліфованої поверхні деталі й великих залишкових напружень. Теплота, що утворюється, впливає також і на абразивний круг, що у свою чергу призводить до збільшення його зносу і зниження різальної здатності.

Як і під час звичайного різання, під час шліфування майже вся механічна робота мікрорізання перетворюється у теплову енергію і лише незначна частка (менше 1 %) переходить у приховану енергію змін кристалічної решітки оброблюваного матеріалу.

Вся теплова енергія Q розподіляється між заготовкою Q_z , кругом Q_k ,

стружкою Q_c і охолоджувальним середовищем Q_o :

$$Q(100\%) = Q_s(60 - 85\%) + Q_k(10 - 13\%) + Q_c(< 30\%) + Q_o. \quad (3.42)$$

У шліфуванні розрізняють: миттєву температуру θ_M , що виникає у зоні мікрорізання окремим абразивним зерном; середню контактну θ_k – встановлюється у зоні контакту круга із заготовкою; середню θ_{cp} – встановлюється на всій обробленій поверхні.

Миттєву температуру θ_M експериментально виміряти дуже складно, проте її можна оцінити за структурними перетвореннями у поверхневому шарі обробленої деталі. Про високі миттєві температури, наочно свідчить потік іскор, що спостерігається навіть за наявності значного охолодження.

Контактна температура θ_k менше миттєвої θ_M (особливо за наявності охолодження) у зв'язку з інтенсивною тепловіддачею у заготовці. Інтенсивність тепловіддачі посилюється у разі збільшення розмірів шліфованих заготовок, зони контакту круга із заготовкою, теплопровідності зв'язки й абразивних зерен, теплоємності МОТС та ін.

Середня стабілізована температура поверхні θ_{cp} нижче контактної θ_k і впливає в основному на точність лінійних розмірів і форм деталі.

Під час абразивного шліфування середня температура деталі змінюється у межах $\theta_{cp} = 20 \dots 350$ °С, контактна $\theta_k = 200 \dots 1100$ °С і миттєва θ_M – від 1000 °С до температури плавлення оброблюваного матеріалу.

3.7.2. Основні шляхи регулювання теплових процесів

Температура під час абразивного оброблення знижується у разі зменшення потужності теплоутворення й підвищенні інтенсивності теплопередачі із зони різання. Їх регулювання може здійснюватися раціональним вибором способу оброблення, конструкції і характеристик абразивного інструмента, режимів різання й умов оброблення.

Основні шляхи зниження теплоутворення у зоні різання: використання абразивних матеріалів з високими різальними властивостями (алмаз або кубоніт); використання інструментів із високопористою структурою; використання інструментів із раціонально орієнтованими зернами; введення до складу зв'язки або нанесення на робочу поверхню інструмента твердих мастил для зниження непродуктивного тертя; забезпечення умов саморегулювання високих різальних властивостей; забезпечення високої різальної здатності робочої поверхні інструмента (періодичною правкою або безперервними керуючими діями у процесі роботи); раціональне використання ефектів дії МОТС: змащувальна зниження коефіцієнта тертя; руйнівна (розклинююча) – зменшення сил мікрорізання; миюча – видалення з поверхні інструмента продуктів

шліфування.

Основні шляхи підвищення тепловідведення у зони різання: використання матеріалів з високою теплопровідністю: абразивних (алмаз або кубоніт); конструкційних (металеві зв'язки й корпуси інструментів); використання інструментів з переривчастою робочою поверхнею; раціональне використання охолоджуючої дії МОТС і його подачі у зону різання.

3.8. Особливості процесу алмазного шліфування

Визначальними чинниками процесу алмазного шліфування є дія твердого і вельми гострого алмазного зерна на оброблюваний матеріал, контакт зв'язки круга з оброблюваним матеріалом і термодинамічні умови їх взаємодії.

Як відомо, відношення твердості абразивного матеріалу H_a , до твердості оброблюваного H_m має найважливіше значення для мікрорізання і повинно складати $H_a/H_m > 1,5$. З урахуванням цього, застосування кругів з електрокорунду або карбїду кремнію для оброблення незагартованих сталей, кольорових сплавів і чавунів становить ($H_a / H_m \approx 2$).

Проте вже для загартованих і високолегованих сталей, твердих сплавів, мінералокераміки, ситалів та інших високотвердих матеріалів твердість звичайних абразивів недостатня. Лише для алмазу й кубоніту забезпечується відношення H_a/H_m значно вище граничного. Необхідне перевищення твердості звичайних абразивних матеріалів над твердістю таких матеріалів досягається за умови температури шліфування 700...900 °С, які є небезпечними, оскільки сприяють виникненню дефектів у поверхневому шарі.

Властивість алмазу або кубоніту ефективно відводити теплоту від мікрокромки зерен зберігає їх високу різальну здатність.

Особливим випадком алмазного шліфування є оброблення надтвердих полікристалічних матеріалів (НТПМ), де практично відсутнє перевищення твердості інструменту над оброблюваним матеріалом ($H_a \approx H_m$). Інтенсивність зняття матеріалу визначають механізмом крихкого руйнування під дією динамічного прикладання зосередженого навантаження. Висока концентрація навантаження може забезпечуватися тільки виступаючими елементами субмікрорельєфу (див. рис. 3.7) алмазного зерна.

Великі можливості використання надтвердих матеріалів як у самому абразивному інструменті, так і в процесах оброблення. Наприклад, забезпечення оптимальної стійкості й міцності закріплення зерна НТМ у

робочому шарі залежно від характеристики інструментів і умов оброблення.

Для усунення ударних навантажень і вібрацій застосовують переривчасті круги, що забезпечують практично постійну площу контакту робочої поверхні абразивного інструмента з оброблюваною заготовкою. Застосування багатошарових і збірних кругів розширює технологічні можливості інструмента, дозволяє поєднати процеси попереднього й остаточного шліфування, підвищити продуктивність оброблення і зносостійкість кругів, понизити шорсткість обробленої поверхні.

Із сучасних методів шліфування алмазними і кубонітовими кругами до перспективних відносять: глибинне; переривчасте; врізне; електрохімічне і електроерозійне; комбіноване, з накладенням низько- і високочастотних коливань (ультразвукове); зі стабілізацією швидкості й сили різання, швидкісне й надшвидкісне. Ці методи дають можливість у багато разів підвищити продуктивність і працездатність кругів із НТМ і повністю виключити застосування інструментів зі звичайних абразивів у шліфуванні різних металів і сплавів.

3.9. Зношування абразивних інструментів і методи відновлення їх різальних властивостей

3.9.1. Особливості зносу абразивних зерен

У початковий період роботи круга на вершинах зерен утворюються площадки зносу, які безперервно збільшуються. При достатній міцності закріплення зерен у зв'язці, площадки зносу на зернах можуть досягати значних відносних розмірів. Одночасно зі зношуванням зерен круга відбувається зміна рельєфу його робочої поверхні. Залежно від умов шліфування (фізико-механічних властивостей зерен, оброблюваного матеріалу і зв'язки, режиму оброблення та ін.) розрізняють основні види зносу (рис. 3.13): *а*) стирання різальних елементів (вершин) шліфувальних зерен з утворенням на них площадок з більшою або меншою шорсткістю; *б*) мікроруйнування (розщеплювання) зерен із відділенням від них невеликих часток; *в*) руйнування зерен з відділенням від них крупних часток, розміри яких співрозмірні з розміром зерна; *г*) повне виривання зерен зі зв'язки; *д*) руйнування у результаті протікання хімічних реакцій у зоні контакту зерна з оброблюваним матеріалом під час високих температур, що виникають у зоні шліфування; *є*) забивання проміжків між зернами (пор) стружкою і продуктами зношування.

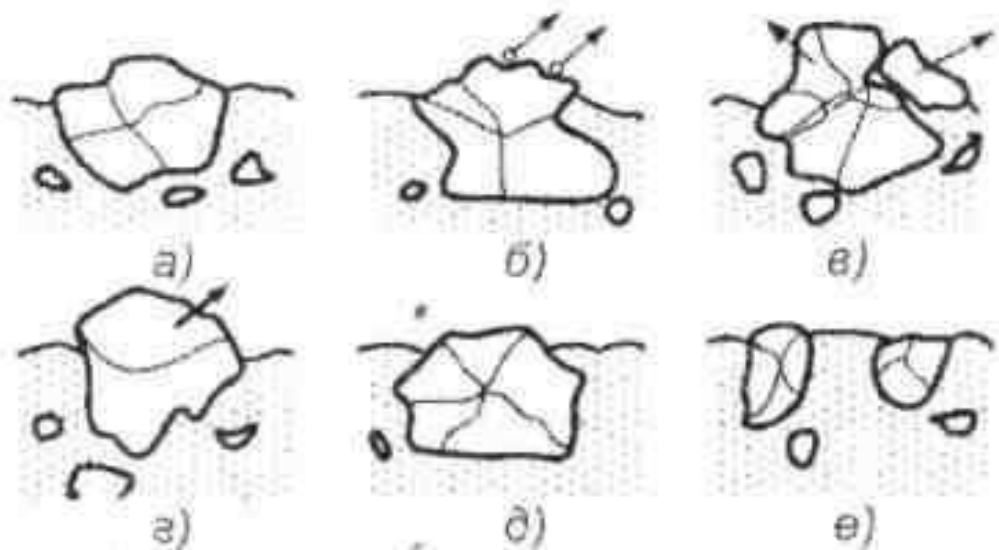


Рис. 3.13. Основні види зносу шліфувального круга

Руйнування абразивного зерна відбувається до тих пір, поки воно виступає з зв'язки на висоту, більше $h_s \approx \frac{d_{mean}}{6}$, де d_{mean} – середній розмір зерен. У цьому випадку елементарної сили різання, що діє на абразивне зерно, недостатньо для його подальшого розщеплення; зерно остаточно згладжується і втрачає свої різальні властивості. Після цього мікрорізання припиняється і між кругом і заготовкою проходить лише тертя ковзання з виділенням великої кількості теплоти, що свідчить про повну втрату різальної здатності круга.

Під час підвищених режимів різання (попереднє шліфування), коли навантаження на одиничне абразивне зерно значне, спостерігається відколювання від зерна крупніших елементів.

Під час високих температур шліфування знижується твердість матеріалу зерен, процеси зношування зерен інтенсифікуються. Адгезійне зношування характеризується появою мікроратерів на поверхні зерна. Можливе також прилипання частинок оброблюваного матеріалу до поверхні зерен у вигляді наростів, характерних для шліфування сплавів з аустенітною структурою. У цьому випадку процес різання різко погіршується, оскільки адгезія переходить у когезію (злипання поверхонь однорідних матеріалів).

Інтенсивність зношування зерен різко зростає у разі їх хімічної спорідненості з оброблюваним матеріалом. Під час оброблення залізовуглецевих сплавів алмазними зернами передумовами до дифузійного зношування є високі температури у зоні шліфування, легкість розчинення вуглецю у залізі, перепад концентрації вуглецю між алмазним

зерном і оброблюваним металом і контакт їх ювенільних поверхонь. Тому у таких випадках застосовують кубоніт.

3.9.2. Особливості відновлення різальної здатності шліфувальних кругів

Розглядаючи зношування саме як процес втрати робочою поверхнею різальних властивостей, можна вважати, що круги працюють у режимах або затуплення, або самозагострення. Відбуваються різні інтенсивності зносу вершин зерен v_z і зв'язки v_c . Режим затуплення є природним для будь-якого різального інструмента і пов'язаний із його зношуванням у процесі роботи ($v_z > v_c$).

Режим самозагострення круга ($v_z \approx v_c$) полягає у тому, що по мірі затуплення (зносу) працюючих зерен зростаючий опір різанню вириває (повністю або частково) ці зерна зі зв'язки, яка зношується (викришується). У цей час у роботу вступають нові зерна, внаслідок чого робоча поверхня круга безперервно оновлюється.

Здібність до самозагострення є характерною властивістю абразивних інструментів на легко зношуваних (маломіцних) зв'язках, і є властивістю самоорганізації системи різання. Проте у більшості випадків самозагострення круга недостатньо для якісного проведення оброблення, оскільки не зберігається геометрична форма його робочої поверхні через нерівномірний знос круга, що обумовлено його формою і особливостями схеми шліфування. Особливо важлива стабільність поперечного профілю у врізному й профільному шліфуванні.

Ефективність процесу шліфування також залежить від збереження кругом необхідного рельєфу поздовжнього профілю робочої поверхні. Випадкове виникнення хвилястості на робочій поверхні круга приводить до різкого погіршення вихідних показників процесу шліфування. З появою хвилястості підвищуються вібрації системи ВПД, відбувається прискорений знос круга і погіршується якість оброблення. Надалі у шліфуванні хвилястість збільшується, досягаючи значень, що визначаються амплітудно-частотною характеристикою системи ВПД.

Формотворення робочої поверхні кругів може проводитися періодично або безперервно у процесі роботи. У разі періодичного оновлення профілю круга його традиційно називають правкою.

3.9.3. Правка шліфувальних кругів

Правка абразивних кругів може бути алмазною і безалмазною. Однокристалні алмазні правлячі інструменти: правлячі різці (профільовання черв'ячних абразивних кругів), голки (правка

однориткових різешліфувальних кругів або правка по копіру), алмази в оправках (правка кругів прямого і фасонного профілів).

Режими правки, що рекомендують, за відсутності автоматичного циклу: поздовжня подача 0,05...3 м/хв; поперечна подача: чорнова 0,2...0,3 мм/подв. хід (2...4 ходи); чистова 0,005...0,01 мм/подв. хід (1...2 ходи); число проходів без подачі – 1...3.

Багатокристалльні алмазні правлячі інструменти: гребінки (правка по копіру профільних шліфувальних кругів), олівці (універсального призначення), ролики прямого і фасонного профілю.

Алмазні ролики зазвичай використовують у серійному і масовому виробництві. Правка абразивних кругів проводиться методом врізання, на прохід або по копіру у разі робочої колової швидкості круга. Ролику надається примусове обертання (зустрічне або попутне) зазвичай 5...20 м/с.

Безалмазні правлячі інструменти у сучасному машинобудуванні застосовують значно рідше і в менших об'ємах, ніж алмазні. Їх використовують для правки кругів методами шліфування, обкатки і накочування. Залежно від конструктивного і технологічного виконання, це можуть бути абразивні круги (зазвичай з карбіду кремнію зеленого), абразивні бруски, металеві диски (шаржовані вільним абразивом, гладкі й гофровані) і стрижні, накатні ролики (сталеві або твердосплавні), порошки та щітки.

3.9.4. Формотворення робочої поверхні абразивних інструментів на струмопровідних зв'язках безпосередньо у процесі шліфування

Завдання регулювання різальних властивостей робочої поверхні зводиться до узгодження інтенсивності примусового видалення зв'язки v_c з інтенсивністю зносу різальних зерен v_z , а також до визначення умов, що виключають обвальні випадання зі зв'язки непрацюючих зерен. Три співвідношення цих інтенсивностей $v_z > v_c$, $v_z = v_c$ і $v_z < v_c$ визначають неминучий прояв структурно-топографічного пристосування робочої поверхні круга, стабілізацію оптимального розвиненого рельєфу або нераціональну надлишкову витрату алмазів.

Можливі три схеми регулювання інтенсивності примусового видалення струмо-провідної зв'язки круга у процесі шліфування (рис. 3.14).

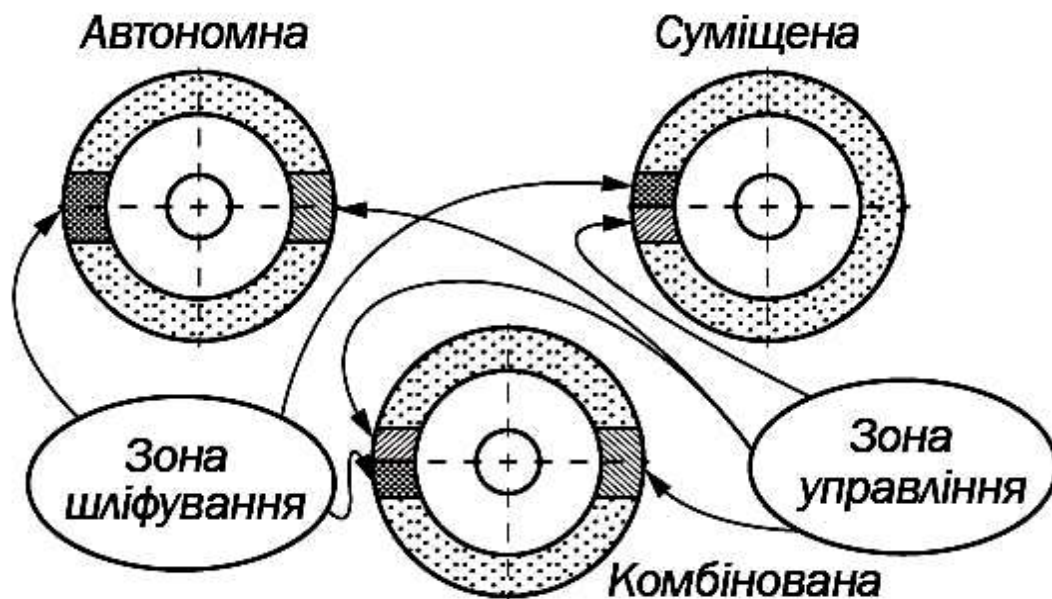


Рис. 3. 14. Схеми розміщення зон шліфування та керування

Суміщена схема. Цій схемі відповідає метод електроабразивного шліфування. Його суть полягає в тому, що між струмопровідним кругом і струмопровідною оброблюваною заготовкою пропускається регульований електричний струм. Тоді до основного процесу абразивного різання додається електрична енергія, направлена на підвищення ефективності процесу. У залежності від матеріалу зерен (абразив, алмаз, кубоніт), виду електричного струму (постійний, змінний або імпульсний), полярності (пряма – круг є катодом, зворотна – круг є анодом) і рідини (електроліз, діелектрик), що подається у зону різання, сформувалися назви варіантів електроабразивного

шліфування. Наприклад: електролітичне, електрохімічне, електроалмазне, алмазно-іскрове та ін. Усі ці способи у тій чи іншій мірі дозволяють регулювати дію на зв'язку круга. Обмеженням їх технологічних можливостей є оброблення лише струмопровідних заготовок.

Автономна схема. Цій схемі відповідає дія на зв'язку круга поза зоною різання, що дозволяє її використовувати під час шліфування неструмопровідних керамік та надтвердих полікристалів. Як метод формотворення зв'язки доцільно використовувати електрохімічний. Він дозволяє виконувати формотворення на верстаті у процесі шліфування за відсутності зносу електроду – інструмента.

Завдання керування поперечним профілем робочої поверхні зводиться до компенсації його відхилень, що природно виникають у зоні різання під впливом оброблюваного матеріалу й умов шліфування. Компенсація досягається за рахунок дозування руйнівної дії на зв'язку тих ділянок робочої поверхні, де ці відхилення перевищують допустимі значення. У

зв'язку з цим використовують принцип незалежної роздільної дії на окремі ділянки поверхні зв'язки. Принцип реалізовано за рахунок розділення катода по ширині і довжині на електрично ізольовані ділянки. При цьому час проходження струму через кожен з них може незалежно регулюватися. Задача керування поздовжнім профілем може бути вирішена на основі принципу направленої дії на робочу поверхню круга електричними імпульсами, період і тривалість дії яких синхронізовані з обертанням шліфувального круга та з параметрами хвилястості.

Комбінована схема об'єднує суміщену й автономну схеми.

3.9.5. Період стійкості шліфувальних кругів

Час роботи круга між правками при заданих режимах називають **періодом стійкості T** .

Періоди стійкості шліфувальних кругів T , хв, що рекомендують: кругле зовнішнє з поздовжньою подачею – 40 (врізне – 30); внутрішнє 10; плоске периферією круга 25 (торцем – 10); безцентрове з поздовжньою подачею – 60; профільне – 10.

Для підвищення продуктивності процесу шліфування бажано вибирати шліфувальні круги якомога більшого діаметру. На робочій поверхні круга більшого розміру буде й більша кількість різальних зерен, отже, під час збереження навантаження на одне зерно можна підвищити продуктивність шліфування. У разі застосування кругів великих діаметрів зменшується їх розмірний знос і підвищується період стійкості.

3.10. Призначення режимів різання під час шліфування

Раціональним режимом різання під час шліфування вважають умови оброблення, що забезпечують достатньо високу продуктивність за мінімальної собівартості й необхідній якості поверхні деталі.

У призначенні режимів різання для абразивного та абразивно-алмазного оброблення рекомендується використовувати довідкові дані та результати експериментальних досліджень.

Під час призначення режиму шліфування необхідно:

– вибрати характеристику шліфувального круга і встановити його швидкість різання V_k ;

– призначити подачу у напрямку зняття припуску (поперечну подачу) і визначити число проходів, що забезпечуватимуть зняття всього припуску. Подача варіюється у межах 0,005...0,09 мм/подв.хід.

– призначити поздовжню подачу під час круглого шліфування й подачу уздовж осі круга під час плоского шліфування у частках ширини круга $S_{нд} = S_B B_k$, де $S_B = 0,4...0,6$ для чорнового шліфування; $S_B = 0,3...0,4$

для чистового;

– вибрати кругову швидкість заготовки V_3 . У чорновому шліфуванні слід виходити зі встановленого періоду стійкості круга ($T = 25 \dots 60$ хв), у чистовому – із забезпечення заданої шорсткості поверхні. Зазвичай швидкість заготовки знаходиться у межах $40 \dots 80$ м/хв;

– підібрати охолоджувальну рідину;

– визначити сили різання і потужність, необхідні для забезпечення процесу шліфування. Потужність (кВт) необхідна для обертання круга дорівнює $N_K \geq P_z V_K$ ($\eta = 10^{-3}$), а для обертання заготовки – $N_K \geq P_z V_K$ ($\eta = 60 \cdot 10^{-3}$);

– вибрані режими шліфування скорегувати за паспортними даними верстата; у разі браку потужності зменшують V_3 , або $S_{нд}$, оскільки вони впливають на потужність різання N_K на основний час τ_o ;

– перевірити умови безприпалювального шліфування за питомою потужністю, що приходиться на 1 мм ширини круга: $N_{мм} = N_K / B_K$;

– підрахувати машинний час за наступними формулами для основних видів шліфування:

– кругле багатопрохідне шліфування (з поздовжньою подачею):

$$\tau_o = \frac{L_{p.x.}}{S_B B_K} \frac{h}{n_3 t} k = \frac{L_{p.x.}}{S_{np}} \frac{h}{n_3 S_{nx}} k = \frac{L_{p.x.}}{S_{np}} \frac{2h}{n_3 S_{n2x}} k ; k = 1, 2 \dots 1, 7, \quad (3.43)$$

де $L_{p.x.}$ – довжина робочого ходу, мм;

h – припуск на сторону, мм;

k – коефіцієнт вигладжування, залежний від необхідної точності оброблення.

– кругле врізне (з поперечною подачею)

$$\tau_o = \frac{h}{n_3 t} k = \frac{h}{n_3 S_n} k ; k = 1, 4 \dots 2, 5. \quad (3.44)$$

– плоске багатопрохідне периферією круга (прямокутний стіл)

$$\tau_o = \frac{L_{p.x.}}{1000 V_3} \frac{H}{S_B B_K} \frac{h}{t} k = \frac{L_{p.x.}}{1000 V_3} \frac{H}{S_{nx}} \frac{h}{t} k = \frac{L_{p.x.}}{1000 V_3} \frac{2H}{S_{n2x}} \frac{h}{t} k ; k = 1, 1 \dots 1, 5, \quad (3.45)$$

де $L_{p.x.} = L_3 + (10 - 15)$ – довжина заготовки, мм;

H – переміщення круга у напрямі поперечної подачі $H = B_3 + B_K + 5$, мм;

– плоске врізне периферією круга (прямокутний стіл):

$$\tau_o = \frac{L_{p.x.}}{1000 V_3} \frac{h}{t} k ; k = 1, 2 \dots 1, 6. \quad (3.46)$$

– плоске багатопрохідне торцем круга (прямокутний стіл)

$$\tau_o = \frac{L_{p.x.}}{1000V_3} \frac{h}{t} k = \frac{(L_3 + D_\kappa + 10)h}{1000V_3} k; \quad k = 1,1 \dots 1,6. \quad (3.47)$$

– безцентрове кругле зовнішнє (на прохід)

$$\tau_o = \frac{L_{p.x.}}{1000V_{np}} ik = \frac{(L_3 + B_\kappa)}{1000V_{np}} ik; \quad k = 1,05 \dots 1,2, \quad (3.48)$$

де i – число повторних проходів $i \geq \frac{h}{t}$.

3.11. Викінчувально-абразивні методи оброблення

3.11.1. Хонінгування

Хонінгування (зовнішнє, внутрішнє, плоске, профільне та ін.) є процесом викінчувального оброблення деталей. Схему хонінгування для випадку оброблення отвору подано на рис. 3.15.

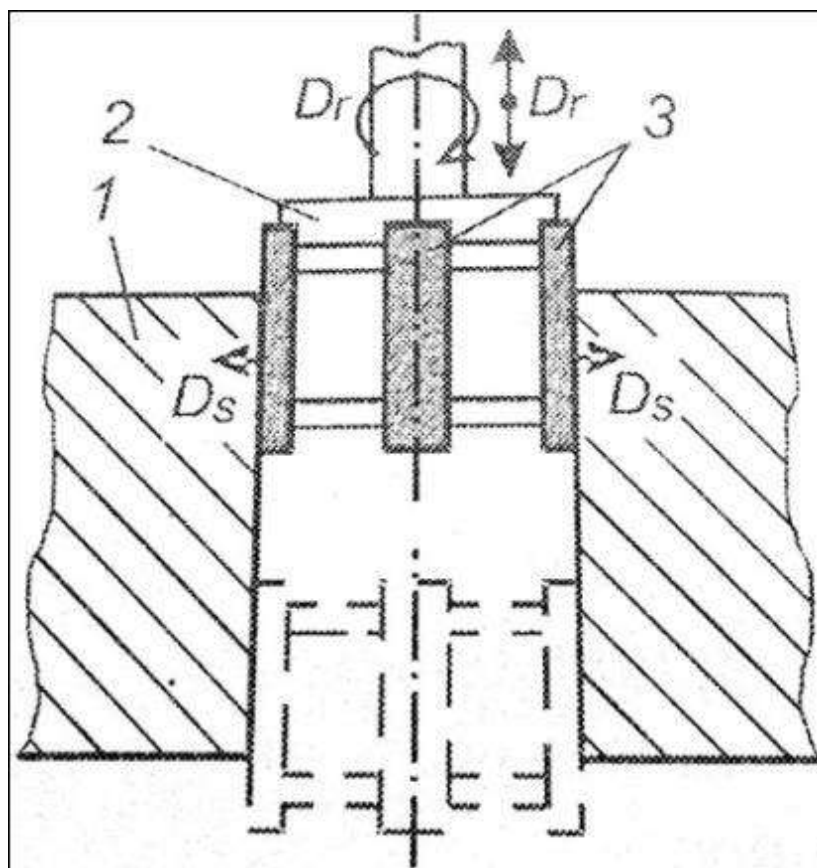


Рис. 3.15. Схема хонінгування

Хонінгування застосовують для підвищення точності форми і розмірів, зниження шорсткості поверхні деталей. Як інструмент

використовується хонінгувальна головка – 2 (хон). Оброблення проводять за допомогою абразивних, алмазних або кубонітових брусків – 3, яким надають три основні рухи по відношенню до заготовки – 1: комбінований рух різання D_r , обертальний і зворотно-поступальний та рух радіальної подачі D_s .

Поєднання трьох рухів у процесі оброблення забезпечує зрізання мікростружок і самогострювання інструмента. Різання здійснюють великою кількістю зерен на робочій поверхні брусків, що рухаються по складній траєкторії. Це забезпечує високу продуктивність у разі малих силових і температурних навантажень у зоні різання.

Типи абразивних, алмазних і кубонітових брусків та рекомендації з вибору режимів хонінгування наведені у численних літературних джерелах і стали повсякденною практикою виробництва.

3.11.2. Суперфінішування

Суперфінішування – процес фінішного оброблення поверхонь деталей дрібнозернистими абразивними або алмазними брусками. Схему суперфінішування у випадку оброблення циліндричної деталі зображено на рис. 3.16.

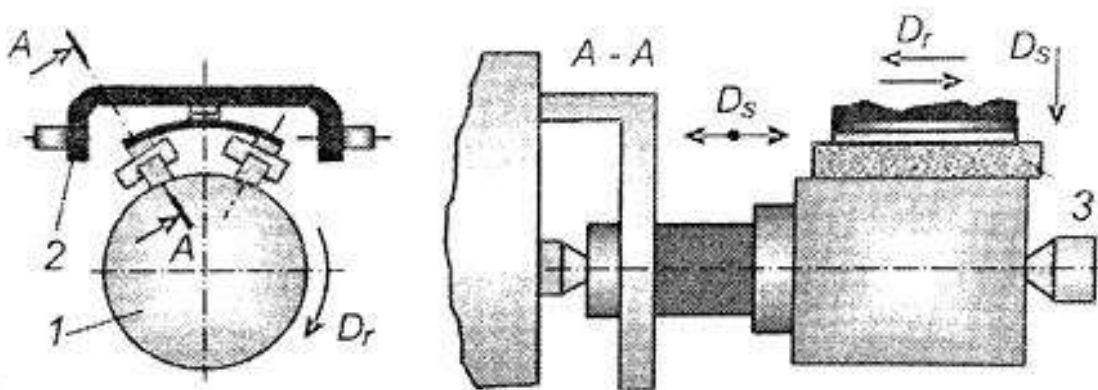


Рис. 3.16. Схема суперфінішування

Процес здійснюється закріпленими у тримачі – 2 брусками – 3, що коливаються з певною частотою й амплітудою під час обертання заготовки – 1 або у разі її одночасного обертання і зворотно-поступального переміщення.

Суть процесу суперфінішування полягає у мікрорізанні великою кількістю найдрібніших зерен і їх терті з пластичною деформацією металу. Осциляцією брусків досягається складний рух кожного абразивного зерна по оброблюваній поверхні, що приводить до різання різними гранями зерна.

На відміну від процесу хонінгування, де навантаження на зерна функціонально пов'язане з похибками форми деталі, для суперфінішування воно постійне.

Суперфінішування дозволяє отримати шорсткість поверхні $R_a = 0,08 \dots 0,04$ мкм майже без хвилястості та з мінімальною огранкою (0,5 мкм). Припуск на сторону призначається на 10...30 % більше висоти початкової шорсткості поверхні R_z . Рекомендації з вибору інструмента й режимів суперфінішування наведені у численних технологічних нормативних документах і стандартах.

3.11.3. Доведення

Доведення є процесом фінішного оброблення високоточних поверхонь деталей (плоских, профільних, сферичних, отворів). У результаті доведення досягається похибка розмірів і форми $IT = 0,5 \dots 0,1$ мкм при шорсткості поверхні $R_a = 0,04 \dots 0,02$ мкм.

Розрізняють два види доведення: вільним абразивом (пастами, суспензіями) і закріпленим (притирами, шаржованим абразивом). Найбільш поширеними матеріалами для притирів є сірий чавун, латунь, мідь.

Операції доведення поділяють на чорнові ($IT = 3 \dots 5$ мкм, $R_a = 0,32 \dots 0,16$ мкм), чистові ($IT = 1 \dots 2$ мкм, $R_a = 0,16 \dots 0,08$ мкм) і тонкі ($IT = 0,1 \dots 0,5$ мкм, $R_a = 0,04 \dots 0,02$ мкм).

Характеристики мікропорошків і паст, рекомендації з вибору режимів доведення наведено у галузевих нормативах і стандартах. Термін доведення також уживається для випадку остаточного загострення різальних кромки інструмента дрібнозернистими алмазними кругами.

3.11.4. Полірування і стрічкове шліфування

Полірування є процесом безрозмірного викінчувального оброблення і призначене для зниження шорсткості поверхні без виправлення похибок геометричної форми. Як абразивний інструмент у поліруванні використовують еластичні крути (на вулканітовій або полімерній зв'язці, повстяні, фетрові та ін.), абразивні шкурки й стрічки. Пружне закріплення абразивних зерен в інструменті знижує глибину різання, збільшує довжину контакту різальних мікрокромки із оброблюваним матеріалом.

Під час полірування еластичними кругами досягається шорсткість поверхні $R_a = 1,25 \dots 0,025$ мкм.

Полірування абразивною шкуркою і стрічкою виконується за двома схемами різання: з високими (10...40 м/с) і з низькими (0,15...1 м/с) швидкостями різання. У високошвидкісному поліруванні використовують

абразивні стрічки й гнучкі абразивні обертові диски, що виготовляються зі шкурки (пелюсткові круги). Попереднє полірування з великим зніманням металу здійснюють стрічками зернистістю 40...25, що дає шорсткість $R_a = 2,5 \dots 0,63$ мкм. Остаточне полірування здійснюється за допомогою стрічок зернистістю 16...8 забезпечує $R_a = 0,63 \dots 0,16$ мкм, а зернистістю 6 – 3 – $R_a = 0,16 \dots 0,04$ мкм.

Стрічкове шліфування застосовують для оброблення плоских, циліндричних (зовнішніх і внутрішніх) і складних профільних поверхонь, а також для зняття задирок і підготовки деталей для покриття.

Залежно від вимог до точності деталі й її форми, шліфування стрічкою проводять за двома основними схемами: вільною стрічкою або з підтисканням стрічки до поверхні заготовки (для забезпечення високої точності) за допомогою ролика, жорсткого копіру або пружного елемента.

Рекомендації з вибору інструмента (абразивного, алмазного, кубонітового) і режимів різання наведені у галузевих нормативах і типових технологічних процесах, створених за результатами всебічних експериментальних досліджень.

3.11.5. Віброабразивне оброблення

Віброабразивне оброблення залежно від характеру робочого середовища є процесом механічного або механохімічного знімання металу чи його оксидів із поверхні оброблюваних заготовок абразивними зернами. Під час зіткнення заготовок з абразивними тілами, окрім процесу мікрорізання, відбувається пластична деформація, що приводить до згладжування мікронерівностей.

Під час оброблення заготовки й абразивні тіла поміщають у віброуючий контейнер, що здійснює коливання за декількома ступінь свободи. Взаємні переміщення заготовок і абразивного середовища визначають результуючі рухи різання окремих мікрокромок.

Рекомендації з вибору режимів і умов оброблення наведено у численних типових технологічних процесах діючого виробництва.

3.11.6. Магнітно-абразивне оброблення

Магнітно-абразивне оброблення – абразивне оброблення, що здійснюється під час руху заготовки й абразивних зерен один відносно одного у магнітному полі. Одним із її видів є магнітно-абразивне полірування. На рис. 3.17 зображена схема процесу під час оброблення циліндричних поверхонь.

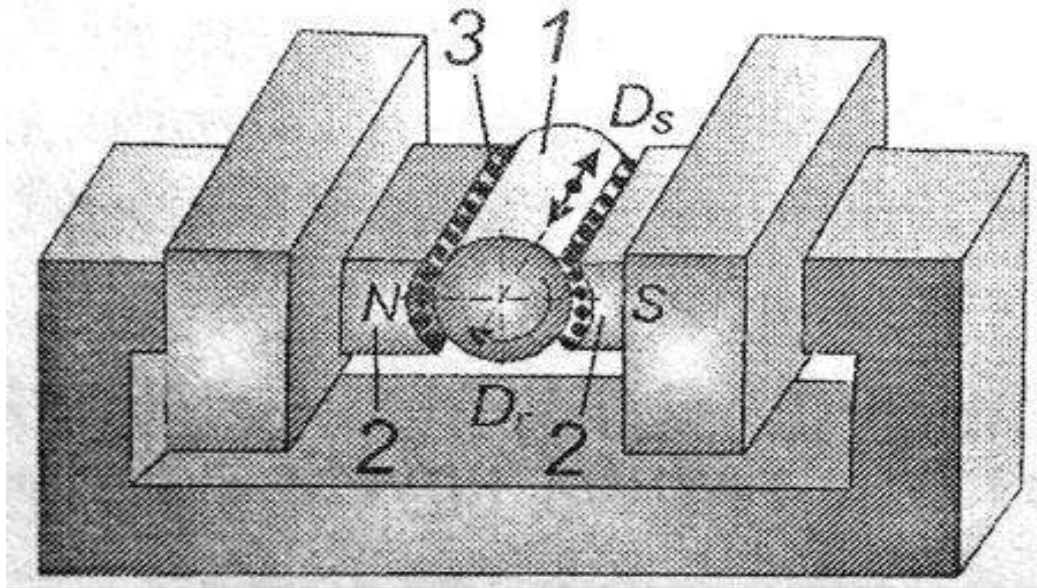


Рис. 3.17. Схема магнітно-абразивного оброблення

Оброблювана заготовка *1* розміщена між полюсними наконечниками *2* електромагнітів постійного струму з деяким зазором. У зазор подається феромагнітний абразивний порошок *3*. Заготовці надають обертального D_r і зворотно-поступального D_s рухів. Сили регульованого магнітного поля зерна порошку утримують у робочих зазорах і обробляють поверхню заготовки. У цьому випадку магнітне поле виконує функції пружної зв'язки інструмента.

Порівняно з традиційними методами оброблення продуктивність процесу підвищується в 3...5 разів, витрати на абразивний інструмент знижуються в 2...3 рази і забезпечується отримання шорсткості поверхні $R_a = 0,02...0,04$ мкм.

3.11.7. Оброблення потоком вільного абразиву

Оброблення потоком (умовно) вільного абразиву основане на використанні для процесу мікрорізання енергії абразивного середовища. У рух приводять або абразивні частки, або заготовку. У разі взаємодії з абразивним середовищем оброблювана поверхня піддається абразивному зносу. Виділяють такі види оброблення потоком вільного абразиву:

— **струминно-абразивне оброблення.** Потік складається з рідини, повітря й абразивних часток. Струминно-абразивне оброблення застосовують для очищення заготовок від окалини (піскоструминне оброблення) і полірування;

— **полірування ущільненим потоком вільного абразиву.** Потік

складається з рідини й абразивних частинок, його ущільнення відбувається під дією відцентрових сил;

— **турбоабразивне оброблення** основане на використанні техніки псевдозрідження сипких матеріалів у повітряному середовищі. Полягає у створенні абразивного киплячого (псевдозрідженого) шару, в який занурюють оброблювану заготовку, задаючи залежно від її форми різних видів рухів (обертальний, планетарний тощо);

— **різання (розкрювання) матеріалів** струменем рідини із введенням абразивних частинок.

3.12. Високопродуктивні й комбіновані процеси абразивного оброблення

3.12.1. Глибинне і швидкісне шліфування

Глибинне шліфування. Застосовують для оброблення достатньо жорстких заготовок зі зняттям припуску за один прохід. Основну роботу різання виконує забірنا частина круга, а калібрувальна лише зачищає оброблювану поверхню (див. рис. 3.2, в). Під час глибинного шліфування обмежувальним чинником є рівень різальної здатності абразивних інструментів. Перспективним напрямом вдосконалення процесу є використання спеціальних шліфувальних кругів: високопористих і торцевих багатошарових із шарами, характеристики яких змінюються у радіальному й коловому напрямках.

Швидкісне шліфування. Ефективність процесу шліфування безпосередньо залежить від швидкості різання. У разі її підвищення зменшується товщина шару матеріалу, зрізаного кожним абразивним зерном, змінюються умови стружкоутворення та інші параметри процесу оброблення.

Високі швидкості різання (60...120 м/с) рекомендують для збільшення продуктивності процесу шліфування у 2...6 разів для чорнового шліфування, коли з поверхні заготовки необхідно зняти великий припуск, а також для обдирного шліфування (зачистці) заготовок грубозернистими сегментними кругами на бакелітовій зв'язці. Використання швидкісного шліфування під час чистового й особливо викінчувального шліфування, можливе тільки у разі використання спеціальних заходів, що нейтралізують шкідливу дію підвищеного виділення тепла і рівня вібрацій, притаманних високим швидкостям різання. Одним із таких засобів є застосування спеціальних високопористих шліфувальних кругів.

3.12.2. Абразивне оброблення з використанням ультразвукових коливань

Абразивне оброблення з використанням ультразвукових коливань здійснюється за достатньо великою кількістю схем. Розглянемо найбільш вживані способи.

Ультразвукове розмірне оброблення заготовок із твердих крихких матеріалів (скло, кераміка, ситали, надтверді матеріали) алмазно-абразивними зернами, які рухаються під дією інструмента, що вібрує з ультразвуковою частотою. Схему оброблення зображено на рис. 3.18.

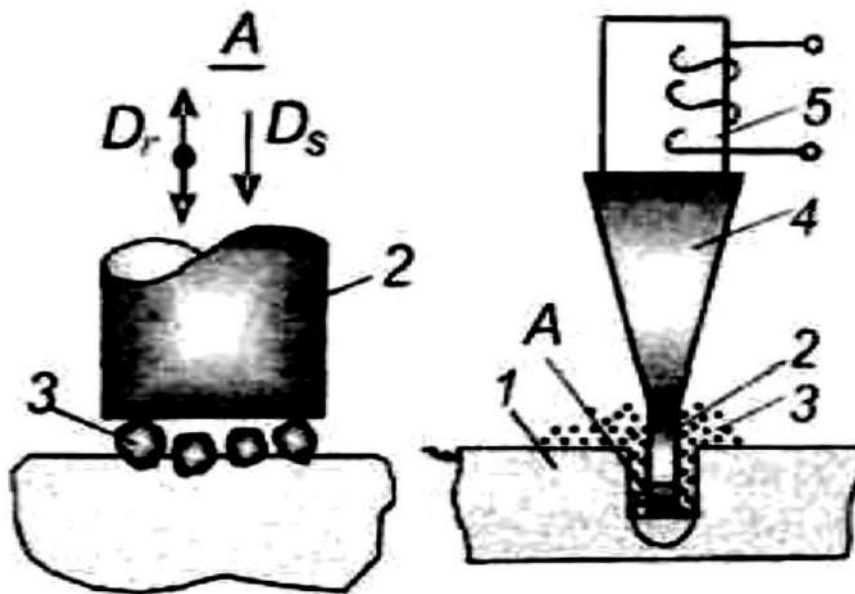


Рис. 3.18. Схема ультразвукового оброблення

Інструмент 2 з'єднаний через хвилевід-концентратор коливань 4 з ультразвуковим перетворювачем 5, що забезпечує ультразвукові коливання D_r , його торця з частотою 25...40 кГц. Торць інструмента із м'якого матеріалу підтискається до заготовки 1 з певним зусиллям подачі D_s і, вібруючи, ударяє по зернах суспензії 3, яка заповнює зазор між інструментом і заготовкою. Зерна виколують невеликі частинки матеріалу, продукти оброблення виводяться із зони оброблення разом із суспензією.

Інтенсифікацію процесів різання при підведенні вимушених ультразвукових коливань до абразивних інструментів застосовують під час шліфування, суперфінішування, хонінгування, доведення. Він дозволяє підвищити продуктивність процесів і стійкість інструмента.

Під час **очищення робочої поверхні шліфувального круга** ультразвуковий вібратор розміщують над робочою поверхнею круга. У простір між ними подається рідина, в якій під впливом ультразвуку виникає кавітація. Ефекти кавітації (гідравлічні удари під час закриття

бульбашок і мікропотоки, що виникають у рідині біля бульбашок) забезпечують інтенсивне очищення робочої поверхні круга від продуктів шліфування.

Контрольні запитання

1. На які основні групи поділяються абразивні матеріали?
2. Назвіть галузі раціонального використання абразивних порошоків із надтвердих матеріалів.
3. Опишіть основні види абразивних інструментів.
4. Чим абразивне оброблення відрізняється від лезового?
5. Як визначається кількість зерен в одиниці об'єму абразивного інструмента?
6. Як впливає кількість зерен на одиниці площі робочої поверхні абразивного інструмента на процес мікрорізання?
7. Які основні принципи лежать в основі імовірнісного опису будови абразивних інструментів?
8. Назвіть основні види шліфування.
9. Яка дуга контакту зерна із заготовкою залежить від виду шліфування?
10. Вкажіть миттєві параметри зрізаного шару під час шліфування.
11. Оцініть вплив параметрів зрізаного шару одним абразивним зерном на процес шліфування.
12. Як пов'язані між собою сили різання і потужність під час шліфування?
13. Назвіть особливості теплових явищ під час шліфування.
14. Які основні способи регулювання теплових процесів ви знаєте?
15. У чому полягають основні особливості процесу алмазного шліфування?
16. Які види зносу абразивних зерен ви знаєте?
17. Назвіть переваги і недоліки роботи шліфувальних кругів у режимах затуплення і самозагострення.
18. Виконайте порівняльний аналіз безалмазної й алмазної правки шліфувальних кругів.
19. Як забезпечити високу працездатність шліфувальних кругів?
20. У чому полягають особливості призначення режимів різання у шліфуванні?
21. Назвіть основні методи викінчувально-абразивного оброблення і дайте короткий аналіз їх характеристик.
22. Дайте порівняльний аналіз методів викінчувально-абразивного оброблення закріпленими і вільними зернами?
23. Яка принципова різниця між шліфуванням і поліруванням?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Богуслаев В. О.* Основи технології машинобудування : навч. посіб. / В. О. Богуслаев, В. І. Ципак, В. К. Яценко. – Запоріжжя : Мотор Січ, 2003. – 335 с.
2. *Боженко Л. І.* Технологія машинобудування / Л. І. Боженко. – Львів : Світ, 1996. – 367 с.
3. *Войтенко В. І.* Системи автоматизованого проектування технологічних процесів машинобудування / В. І. Войтенко. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 213 с.
4. *Гавриш А. П.* Алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів : монографія / А. П. Гавриш, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖДТУ, 2003. – 652 с.
5. *Гавриш А. П.* Досвід розробки і впровадження прогресивних високопродуктивних оздоблювально-зміцнювальних технологій / А. П. Гавриш, П. О. Киричок. – К. : Знання, 1989. – 36 с.
6. *Гавриш А. П.* Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, М. П. Підберезний. – К. : Наук. думка, 1995. – 174 с.
7. *Гавриш А. П.* Новітні технології фінішного оброблення композиційних підшипників ковзання для жорстких умов експлуатації : монографія / А. П. Гавриш, О. О. Мельник, Т. А. Роїк, М. Г. Аскеров, О. А. Гавриш. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 196 с.
8. *Гавриш А. П.* Прецизійна доводка та полірування деталей поліграфічних машин з високолегованих композитів : монографія / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Т. А. Роїк, О. В. Зоренко, В. Г. Олійник. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 498 с.
9. *Гавриш А. П.* Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин : монографія.- ч. 3 / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, В. Г. Олійник. – К. : Видавничий дім „АртЕк”, 2021. – 202 с.
10. *Гавриш А. П.* Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин : монографія.- ч. 2 / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Т. А. Роїк, В. Г. Олійник, Ю. Ю. Віцюк. – К. : Видавничий дім „АртЕк”, 2019. – 132 с.
11. *Гавриш А. П.* Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин : монографія.- ч. 1 / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк, В. Г. Олійник. – К. : Видавничий дім „АртЕк”, 2017. – 208 с.
12. *Гавриш О. А.* Системные технологии финишной обработки деталей / О. А. Гавриш, Т. А. Роик, А. П. Гавриш. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 388 с.
13. *Гевко Б. М.* Технологія сільськогосподарського машинобудування : підручник / Б. М. Гевко, І. С. Гевко, Д. Л. Радик. – К. : Кондор, 2006. – 490 с.
14. *Захаров М. В.* Безпечність технологічних систем і прогресивні методи обробки заготовок у машинобудуванні / М. В. Захаров, Ю. В.

Тимофеев, В. Я. Стороженко, А. П. Гавриш, Т. В. Кухтік. – К. : Вища шк., 1998. – 200 с.

15. *Киричок П. О.* Зміцнюючо-оздоблювальна обробка деталей у машинобудуванні / П. О. Киричок. – К. : Знання, 1990. – 36 с.

16. *Киричок П.О.* Фінішне оброблення зносостійких деталей друкарських машин : навч. пос.. 2-е видання перероблене та доповнене, ч. 1. / П. О. Киричок, А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк. – К. : Видавничий дім „АртЕк, 2018.- 408 с.

17. *Клименко С. А.* Фактральна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту / С. А. Клименко, Ю. О. Мельничук, Г. В. Встовский. – К. : ІНМ НАНА, 2009. – 168 с.

18. *Кравець И. А.* Ремонтная регенерация трибосистем / И. А. Кравец. – Тернополь: ТДТУ, 2003. – 300 с.

19. *Медвідь В. М.* Технологічні основи технології машинобудування / В. М. Медвідь, В. А. Шабайкович. – Львів : Вища шк., 1976. – 300 с.

20. *Петраков Ю. В.* Теорія автоматичного управління в металообробці / Ю. В. Петраков. – К. : НТУУ «КПІ», 1994. – 212 с.

21. *Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : навч. посіб. / І. С. Афтаназів [та ін.].* – Житомир : Житомир. інж.-техн. ін-т, 2001. – 516 с.

22. *Роїк Т. А.* Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації : монографія / Т. А. Роїк, П. О. Киричок, А. П. Гавриш. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 404 с.

23. *Роїк Т. А.* Сучасні системи технологій заготівельного виробництва в машинобудуванні : монографія / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. А. Гавриш. – К. : ЕКМО, 2010. – 212 с.