

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Одеська політехніка»
Інститут промислових технологій, дизайну та менеджменту
Кафедра технології машинобудування

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
«Інженерія поверхневого шару»

Конспект лекцій з дисципліни «Інженерія поверхневого шару» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 131 Прикладна механіка / Укладач Г.В. Баланюк – Одеса: Національний університет «Одеська політехніка», 2021 – 25 с.

*Затверджено на засіданні кафедри технології машинобудування
Протокол № 1 від 30.08.2021*

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ЛЕКЦІЯ 1. ВСТУП. ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ	5
1.1 Геометричні параметри якості поверхневого шару	5
1.2. Інженерія поверхні на етапах життєвого циклу	6
1.3. Напрямок подальшого розвитку інженерії поверхні	7
Питання для самоперевірки	7
ЛЕКЦІЯ 2. ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ	8
2.1. Інженерія поверхні з позиції контактної взаємодії твердих тіл	8
2.2. Роль інженерії поверхні в забезпеченні надійності виробів	9
2.3. Вибір і призначення параметрів якості поверхневого шару деталей машин	9
Питання для самоперевірки	10
ЛЕКЦІЯ 3. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЛЕЗОВІЙ, АЛМАЗНО-АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ	10
3.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при лезовій обробці	10
Питання для самоперевірки	11
ЛЕКЦІЯ 4. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ХОНІНГУВАННІ І ОБРОБЦІ СТРІЧКАМИ	11
4.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при хонінгуванні	11
4.2. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при обробці стрічками	12
Питання для самоперевірки	12
ЛЕКЦІЯ 5. ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ОБРОБЦІ ПОВЕРХНЕВО- ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ І ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДАХ	13
5.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при оздоблювально-зміцнювальній обробці поверхнево-пластичним деформуванням (ППД)	13
5.2. Формування якості поверхневого шару при електрофізичних методах обробки	13
Питання для самоперевірки	14
ЛЕКЦІЯ 6. ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ	14
6.1. Утворення частково регулярних мікрорельєфів поверхні деталі	14
6.2. Утворення регулярних мікрорельєфів поверхні деталі	15
Питання для самоперевірки	15
ЛЕКЦІЯ 7. МЕТОД ПОДІБНОСТІ В ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ	16
7.1. Вихідні співвідношення методу подібності при різанні матеріалів	16
7.2. Теоретико-експериментальні дослідження параметрів поверхневого шару при точінні	16
Питання для самоперевірки	17
ЛЕКЦІЯ 8. ХВИЛЯСТІСТЬ, ЇЇ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛІ	17
8.1. Хвилястість, її нормування	17
8.2. Механізм утворення хвилястості у процесі обробки	17
8.3. Хвилястість і структурна технологічна спадковість	18
Питання для самоперевірки	18
ЛЕКЦІЯ 9. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ НА УТВОРЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПОХИБОК ОБРОБКИ	18
9.1. Закономірності поопераційного копіювання геометричних похибок форми деталі	18
9.2. Роль внутрішніх напружень в утворенні похибки обробки	19
9.3. Перепони, котрі чинять спротив поопераційному копіюванню геометричних похибок форми деталі	20
Питання для самоперевірки	20
ЛЕКЦІЯ 10. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ НА ФОРМУВАННЯ ФІЗИКО- МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ	20
10.1. Структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах деталей при їх обробці	21
10.2. Вплив вихідної (токарної) шорсткості на фізико-механічні характеристики поверхонь після шліфування	21
Питання для самоперевірки	22

ЛЕКЦІЯ 11. ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ СПОЛУЧЕНЬ МЕТОДІВ ОБРОБКИ З ВРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ.....	22
11.1. Закономірності прояву технологічної спадковості за різних сполучень фінішних методів обробки.....	22
11.2. Використання математичних методів для вибору оптимальних сполучень видів технологічної обробки	23
Питання для самоперевірки	23
ЛЕКЦІЯ 12 КОНТРОЛЬ І ВИПРОБУВАННЯ	23
12.1. Метрологічне забезпечення геометричних параметрів якості в інженерії поверхні	23
12.2. Системи мікроскопії для дослідження параметрів поверхонь	24
Питання для самоперевірки	25
ЛІТЕРАТУРА	25

ВСТУП

Одним із основних показників якості машин є їх надійність. Як правило, всі руйнування деталей (зносні, корозійні, міцнісні, контактні, усталісні) починаються з поверхні.

Вивчення якості поверхневого шару за свою 100-річну історію здійснювалося від невизначеного обліку нерівностей до комплексної оцінки його стану, що враховує як всі види нерівностей (макровідхилення, хвилястість, шорсткість, субшорсткість), так і фізико-хімічні властивості (структуру, фазовий) і хімічний склад, наклеп, залишкові напруги, екзоелектронну емісію та ін.). Якість поверхневого шару викликає інтерес вчених різних напрямів: механіків, фізиків, хіміків, метрологів та технологів.

Розвиток сучасного машинобудування характеризується збільшенням швидкодійності машин, їх потужності, продуктивності і точності. Тому проблема надійності і збільшення терміну служби машин набуває першочергового значення.

Надійність машини залежить від надійності її складових деталей. Дослідники помітили той факт, що машини абсолютно однакових конструктивних компоновок мають різну надійність. Причиною цього в багатьох випадках є відмінності в технологічних процесах виготовлення деталей.

Слід відмітити, що підвищення надійності деталей безпосередньо пов'язана з якістю їх поверхневого шару, котра характеризується геометричними і фізико-механічними параметрами. Оскільки від якості поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості - опір втоми, зносостійкість, корозійна стійкість, опір контактної втоми та ін. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей свідчить про те, що оптимальна (з точки зору підвищення їх експлуатаційних властивостей) поверхня повинна бути достатньо твердою, мати стискаючі залишкові напруження, дрібнодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей з більшою опорною площею.

З іншого боку, кінцеві властивості деталей формуються протягом всього технологічного процесу, а не тільки на фінішних операціях. Загальна виробнича похибка складається з похибок: виготовлення заготовок, їх подальшою обробкою, складанням та ін.. З огляду на цю обставину, можна стверджувати, що властивості деталей технологічно успадковуються від попередніх операцій до наступних.

У зв'язку з цим майбутні фахівці повинні мати більш широкий кругозір і комплексність знань, для того щоб ефективно використовувати як відомі, так і нові наукоємні технологічні способи і методи виготовлення, ремонту і відновлення виробів з метою забезпечення їх функціонального призначення і якості.

ЛЕКЦІЯ 1. ВСТУП. ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ

План лекції:

- 1.1 Геометричні параметри якості поверхневого шару
- 1.2 Інженерія поверхні на етапах життєвого циклу.
- 1.3 Напрямок подальшого розвитку інженерії поверхні.

1.1 Геометричні параметри якості поверхневого шару

Забезпечення якості машини і тривалість його збереження суттєво залежить від стану поверхневого шару її деталей.

Світовий досвід експлуатації машин показує, що основною причиною виходу їх з ладу (~ 80% випадків) є знос поверхонь пар тертя. Решта 20% припадають на поломки деталей від перевантаження та корозійний знос.

Знос пар тертя, поломки через втомленість, корозійний знос значною мірою залежать від характеристик поверхневого шару. В техніці під поверхневим шаром деталі, який за структурою та іншими властивостями відрізняється від внутрішніх шарів. Сукупність властивостей, які набуваються поверхнею деталі в результаті її механічної, термічної, хіміко-термічної обробки характеризується узагальненим поняттям — «якість поверхні».

Поверхневий шар не є однорідним за будовою. Структура поверхнього шару шліфованої сталеві деталі показана на рис. 1.1.

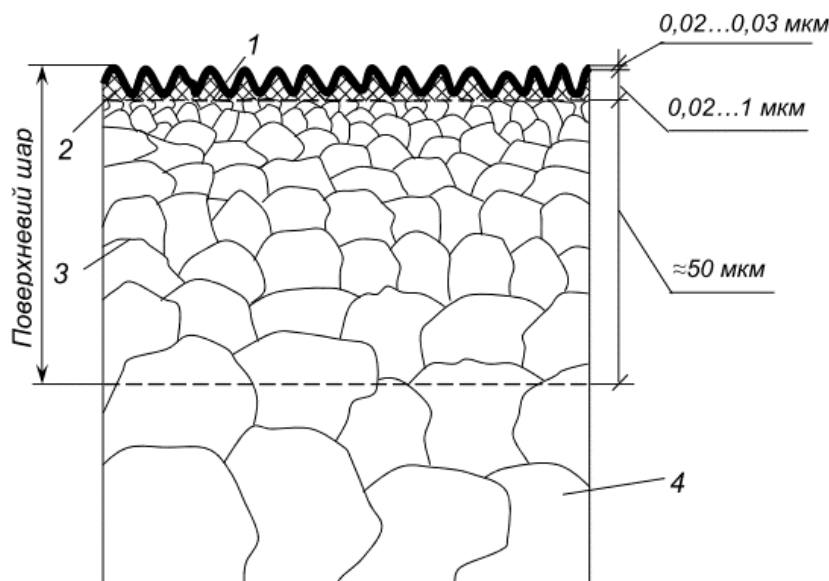


Рисунок 1.1. - Структура поверхнього шару шліфованої сталеві деталі

Граничний шар 1 складається з адсорбованої плівки газів, вологи та змащувально-охолодної рідини. Шар 2 складається із дуже подрібнених зерен металу із істотно спотвореною кристалічною решіткою. У цьому шарі містяться окисли, порожнини й мікротріщини, що утворились в процесі механічної обробки. Перехідний шар 3 складається із зерен, які помітно здеформувалися під дією сил різання. Шар 4 — це метал з вихідною структурою.

Товщина поверхнього шару в залежності від виду обробки зазвичай складає:

- після точіння — 0,25...2 мм;
- після шліфування — 12...75 мкм;
- після тонкого шліфування — 2...25 мкм;
- після полірування — 0,2 мкм.

Основними показниками стану поверхнього шару є:

- шорсткість;
- ступінь зміцнення (наклеп);
- величина і знак залишкових напружень.

1.2. Інженерія поверхні на етапах життєвого циклу

Шорсткість поверхні

Шорсткість поверхні — це сукупність нерівностей з відносно малими кроками, які утворюють мікрорельєф поверхні.

Величина шорсткості поверхонь, які є конструкторськими базами, значною мірою визначає експлуатаційні характеристики машин, оскільки суттєво впливає на тертя та знос в рухомих з'єднаннях, а також на стабільність і визначеність зазорів і натягів в нерухомих з'єднаннях.

Міцність деталей також залежить від шорсткості поверхні. Руйнування деталей під час їх експлуатації найчастіше починається з поверхнього шару через концентрацію напружень, які є наслідком наявних нерівностей. Чистова обробка деталей (пластичне поверхнєве деформування, полірування та ін.) істотно підвищують їх утомну міцність.

Для кількісного оцінювання шорсткості поверхні ГОСТ 2789-78 встановлені такі параметри:

- Ra — середнє арифметичне відхилення профілю;
- Rz — висота нерівностей профілю по десяти точках;
- Rmax — найбільша висота нерівностей профілю;
- Sm — середній крок нерівності профілю;

S — середній крок нерівностей профілю по вершинах;

t_p — відносна опорна довжина профілю.

Ступінь зміцнення (наклеп) металу поверхневого шару

Різання металів є складним процесом, який супроводжується низкою взаємопов'язаних явищ: пружного і пластичного деформування, інтенсивного тертя, виділення тепла, зношування інструмента, збільшення твердості і зміна структури як стружки, так і поверхневого шару обробленої заготовки.

Для того, щоб зрізати шар металу, необхідно його здеформувати аж до появи в ньому руйнівальних напружень. Таке деформування супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен, виникненням між- кристалічних напружень і спотворень кристалічної решітки. При цьому збільшується межа міцності металу, твердість і крихкість, зменшуються пластичність і в'язкість. Таке деформаційне зміцнення поверхневого шару називають наклепом.

Залишкові напруження в металі поверхневого шару. Встановлено, що під час механічної обробки у поверхневому шарі можуть виникати як залишкові напруження стиску, так і залишкові напруження розтягу. Згідно з, виникнення залишкових напружень в металі поверхневого шару в процесі механічної обробки пояснюється такими основними причинами.

1. Різальний інструмент, який знімає елементну стружку, витягує кристалічні зерна металу поверхневого шару, які при цьому піддаються пружному і пластичному деформуванню розтягу у напрямі різання.

2. Якщо обробляються пластичні метали з утворенням зливної стружки то після пластичного витягування кристалічних зерен металу поверхневого шару у напрямі швидкості різання відбувається їх додаткове витягування під впливом зв'язаної з оброблюваною поверхнею стружки у напрямку її сходу. У цьому випадку може відбутися повне переформування кристалічних зерен поверхневого шару з утворенням у напрямках швидкості різання і подачі залишкових напружень розтягу.

3. Теплота, що виділяється в зоні різання, за недостатнього охолодження може миттєво нагрівати тонкі поверхневі шари металу до високих температур, що збільшує його питомий об'єм. Але в нагрітому шарі не виникає внутрішніх напружень через те, що пружність металу зменшується, а пластичність збільшується. Після припинення процесу різання відбувається швидке остигання металу поверхневого шару, яке спричиняє його стиснення (усадку). Цьому протидіє холодніший шар металу, що розташований глибше. В результаті у поверхневому шарі виникають залишкові напруження розтягу, а глибших шарах — залишкові напруження стиску.

4. Довідні (фінішні) операції абразивної обробки (суперфініш, полірування, хонінгування) супроводжуються помітним пластичним деформуванням металу поверхневого шару за відносно невисоких температур. Це сприяє утворенню в поверхневому шарі залишкових напружень стиску.

1.3. Напрямок подальшого розвитку інженерії поверхні

На сьогодні можна виділити наступні напрямки розвитку вчення про інженерію поверхні:

1. Формування параметрів якості поверхневого шару деталей за різних методів їх обробки.
2. Дослідження впливу технологічного обладнання і оснащення на якість оброблених поверхонь деталей.
3. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару деталей.
4. Дослідження якості поверхневого шару деталей з неметалевих матеріалів, їх технологічне забезпечення.
5. Вивчення технологічного успадкування параметрів якості поверхневого шару, що дозволить встановити ступінь впливу їх вихідних на значення що формуються при різних методах обробки (лезовій, абразивній, поверхнево-пластичній деформації).

А також інші напрямки (на сьогодні понад 27).

Питання для самоперевірки

1. Поняття поверхневого шару деталей та його структура.
2. Як впливає спосіб обробки на глибину поверхневого шару?

3. Якими показниками оцінюється якість поверхневого шару?
4. Що розуміється під шорсткістю поверхні?
5. Якими параметрами характеризується шорсткість поверхні?
6. Від яких факторів залежить шорсткість поверхні?
7. Поясніть характер впливу швидкості різання, глибини різання, подачі на шорсткість поверхні.
8. Як впливають на шорсткість поверхні фізико-механічні властивості матеріалу заготовки?
9. Поясніть характер впливу технологічних факторів на величина і знак залишкових напружень в поверхневому шарі.

ЛЕКЦІЯ 2. ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ

План лекції:

- 2.1. Інженерія поверхні з позиції контактної взаємодії твердих тіл.
- 2.2. Роль інженерії поверхні у забезпеченні надійності виробів машинобудування.
- 2.3. Вибір і призначення параметрів якості поверхневого шару деталей машин.

2.1. Інженерія поверхні з позиції контактної взаємодії твердих тіл

Найважливішим етапом життєвого циклу робочих поверхонь деталей є проектування, коли закладаються вимоги до їх якості або безпосередньо до експлуатаційних властивостей (зносоустійкості, контактної жорсткості, корозійної стійкості, контактної міцності та ін.). Ці вимоги повинні формуватися, виходячи з фізичної картини контактної взаємодії деталей та забезпечення оптимальної надійності виробів машинобудування.

Враховуючи, що всі реальні поверхні деталей, що контактують, мають макровідхилення, хвилястість, шорсткість і субшорсткість, початковий їх контакт повинен відбутися тільки в трьох точках. Напруги в цих точках через небагато фактичної площі контакту значно перевищують напруги зсуву, що виникають на критичній глибині під поверхнею контакту. Навіть при дуже малих навантаженнях ця напруга значно перевищує межу плинності матеріалу і викликає початок пластичних деформацій на вершинах виступів шорсткості, що вступили в контакт [1].

Якщо цей процес пластичних деформацій розглядати стосовно реальної поверхні деталі, що знаходиться в контакті під дією нормального навантаження, то ймовірно, що величина се пластичних деформацій визначатиметься формуванням фактичної площі контакту з урахуванням шорсткості, хвилястості та макровідхилення (рис. 2.1):

$$A_r = \frac{P}{C' \sigma_T} \quad (2.1)$$

де C' - Коефіцієнт стиснення.

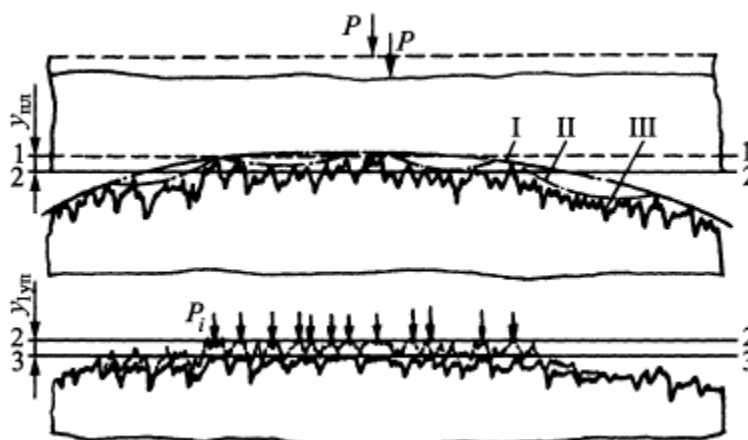


Рис. 2.1. Вихідна схема для розрахунку нормальних контактних переміщень:
 1 - 1 - вихідне положення поверхні, що контактує; 2 - 2 - положення поверхні контактуючої з урахуванням пластичних деформацій виступів; 3 - 3 - кінцеве положення

контактуючої поверхні (I - макровідхилення; II - хвилястість; III - шорсткість)

Очевидно, ці пластичні деформації будуть спостерігатися при первинному додатку навантаження до поверхонь, що контактують. Можна вважати, що при повторному додатку навантаження (десяте навантаження), за величиною, що не перевищує першу, без взаємного зміщення поверхонь матимуть місце пружні контактні деформації. Збільшення навантаження при повторному додатку на незміщені поверхні вище за початкову, очевидно, буде викликати додаткові пластичні деформації в діапазоні цього збільшення. Однак не слід думати, що при постійному підвищенні навантаження пропорційно збільшуються пластичні деформації. Природно, що зі зростанням навантаження відбуваються структурні зміни, які різко змінюють структурно чутливі механічні та фізичні властивості. Особливо сильно збільшується межа плинності.

Багаторазове застосування нормальних або дотичних навантажень призводить до контактного руйнування пластично насичених майданчиків контакту та утворення нових нерівностей. Очевидно, що цей процес буде ітераційним. Відомо, що контактне зближення поверхонь відбувається як внаслідок деформації вершин виступів, так і в результаті деформацій шарів нижче.

Таким чином, область дотичних контактних переміщень обмежується попереднім усуненням, при якому вона переходить у сферу тертя-ковзання.

2.2. Роль інженерії поверхні в забезпеченні надійності виробів

Під надійністю розуміють властивість об'єкта зберігати у часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції у заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. Порушення працездатного стану однотипних виробів відносять до випадкової події – відмови. Всі відмови та руйнування виробів відбуваються за одним з експлуатаційних показників (зносу, корродування та ін) і починаються, як правило, з поверхні деталей. Всі експлуатаційні властивості та їх показники тісно взаємопов'язані з геометричними та фізикомеханічними характеристиками поверхневих шарів.

Розглянемо деякі приклади, що відбивають роль інженерії поверхні у забезпеченні надійності.

Зношування сфери. Особливістю роботи сферичних поверхонь тертя є нерівномірність зношування вздовж твірної сфери, що пов'язано з розподілом тиску та швидкості відносного ковзання. Зміна первісної геометричної форми призводить до втрати працездатності сферичного шарніру. Це відбувається внаслідок локального підвищення температури та наявності у зоні контакту частинок зносу.

Моделі відмов при зношуванні. Для того, щоб система в цілому та її елементи були у працездатному стані, робочі характеристики їх повинні лежати в деяких допустимих межах, що визначаються функціональним призначенням системи. Так, зазор у сполученні, що збільшується при роботі внаслідок зношування трибоелементів, повинен лежати в межах, що забезпечують ненаголошене рух і необхідну кінематичну точність. Зазор, що визначається величиною лінійного зношування, є незнищувальною функцією. При досягненні цієї функції граничного значення настає відмова.

2.3. Вибір і призначення параметрів якості поверхневого шару деталей машин

Аналіз літературних даних показує, що експлуатаційні властивості деталей машин, котрі визначають їх надійність, залежать від системи параметрів якості їх робочих поверхонь: макровідхилень R_{max} , H_p ; хвилястості W_z , W_p , S_{m_w} ; шорсткості R_a , R_z , R_{max} , R_p , S_m , S , tr ; субшорсткості R_{max}' , S_m' ; фізико-хімічних властивостей $\sigma_{ост}$, $h_{\mu 0}$, $H_{\mu 0}$ (U_n), h_{μ} , ε , l_z , ρ_D .

Аналіз результатів проведених досліджень дозволяють сформулювати науково обґрунтовані рекомендації по стандартизації параметрів якості поверхневого шару деталей машин: для шорсткості - R_p , S_m ; для хвилястості - W_z , S_{m_w} ; для макровідхилень і субшорсткості - R_{max}' ; для фізико-механічних властивостей - $H_{\mu 0}$, $h_{\mu 0}$, $\sigma_{ост}$. Така стандартизація дозволить

покращити вирішення проблеми підвищення надійності і довговічності машин. Слід зазначити, що стандартизації повинні підлягати параметри, які мають основний вплив на експлуатаційні властивості деталей машин, технологічно керовані і метрологічно забезпечені.

Визначення чисельних значень параметрів якості поверхневого шару деталей машин виходячи з їх функціонального призначення може бути здійснено розрахунково-аналітичним, експериментальним і дослідно-статистичним (табличним) методами. Загальна структурна схема вирішення цієї задачі.

Питання для самоперевірки

1. Перерахуйте компоненти реального контакту твердих тіл.
2. Наведіть причини відмов деталей машин.
3. Перелічіть параметри якості їх робочих поверхонь впливають на експлуатаційні властивості деталей машин і визначають їх надійність.

ЛЕКЦІЯ 3. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЛЕЗОВІЙ, АЛМАЗНО-АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ

План лекції:

- 3.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при лезовій обробці
- 3.2. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при алмазно-абразивній обробці

3.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при лезовій обробці

Аналіз наявних результатів досліджень щодо формування шорсткості поверхонь при різних методах обробки дозволяє зробити висновок, що в загальному випадку на утворення шорсткості при механічній обробці впливають такі фактори.

- 1) геометрія робочої частини інструменту (різця, зерна, кульки, ролика, алмазного індентора тощо) та кінематика його робочого руху щодо оброблюваної поверхні;
- 2) коливальні переміщення інструменту щодо оброблюваної поверхні;
- 3) пружні та пластичні деформації оброблюваного матеріалу заготівлі в зоні контакту з робочим інструментом;
- 4) шорсткість робочої частини інструмента;
- 5) вириви частинок матеріалу, що обробляється.

Залежно від умов обробки, ступінь впливу кожного з цих факторів на утворення шорсткості поверхні буде різним. Перші чотири фактори викликають утворення систематичної складової профілю шорсткості, яка може бути описана математично. П'ятий фактор сприяє утворенню випадкової складової профілю та визначає розкид, або дисперсію, параметрів шорсткості.

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (3.1)$$

де h_1 - складова профілю шорсткості, обумовлена геометрією та кінематикою переміщення робочої частини інструменту; h_2 - складова профілю шорсткості, яка залежить від коливань інструменту щодо поверхні, що обробляється;

h_3 - складова профілю шорсткості, обумовлена пластичними деформаціями в зоні контакту інструменту та заготівлі; h_4 - складова профілю шорсткості, що вноситься шорсткістю робочих поверхонь інструменту.

Найбільший вплив на утворення шорсткості надає подача при її значеннях $s \geq 0,08$ мм/об. При менших значеннях ($s < 0,08$ мм/об) зміна подачі практично не позначається зміні шорсткості обробленої поверхні. При $s < 0,08$ мм/об висота шорсткості, що формується, визначається в основному радіусом при вершині різця, його шорсткістю, радіусом скруглення ріжучої кромки і фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу і матеріалу ріжучого інструменту. Підвищення межі плинності та зменшення зсувної міцності оброблюваного матеріалу призводять до збільшення мінімально досягається шорсткості при лезовій обробці.

3.2. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при алмазно-абразивній обробці

При абразивній обробці, зокрема шліфуванні, профіль шорсткості, як правило, формується багаторазовим проходженням ріжучих зерен в тому самому миттєвому перерізі (рис. 3.1).

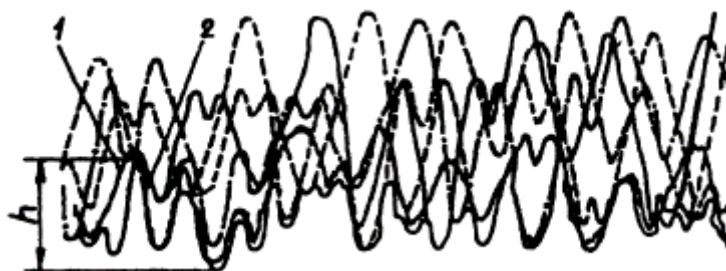


Рис. 3.1. Схема формування складової профілю шорсткості h_1 при чотириразовому ($n = 4$) проходженні ріжучих зерен через миттєвий поперечний переріз: - вихідний профіль шорсткості; 2 - профіль шорсткості після чотириразового проходження ріжучих зерен інструменту

При шліфуванні коливальні переміщення шліфувального кола щодо поверхні, що обробляється, викликають утворення хвилястості. Однак на складову профілю шорсткості при шліфуванні впливають пружні коливальні контактні переміщення одиничних зерен шліфувального кола, зумовлені різницею сил, що діють на них.

Аналіз наведених залежностей показує, що висотні та крокові параметри профілю шорсткості поверхонь при абразивній обробці залежать від режимів, характеристик шліфувального кола (зернистості, концентрації та матеріалу зерен, матеріалу зв'язування), жорсткості технологічної системи, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу та СОТС. При шліфуванні без виходжень основний вплив на утворення шорсткості мають зернистість, поздовжня подача, концентрація зерен та глибина шліфування. Збільшення числа виходжень призводить до зниження ступеня впливу перерахованих факторів на параметри профілю шорсткості та збільшення впливу фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу та матеріалу зерен.

Питання для самоперевірки

1. Перелічіть фактори, що впливають на утворення шорсткості при всіх методах механічної обробки.
2. Від чого залежать висотні параметри шорсткості поверхні деталей при лезвийній обробці.
3. Які параметри впливають на складову профілю шорсткості при шліфуванні.
4. Від яких параметрів залежать висотні і крокові параметри профілю шорсткості поверхонь при абразивній обробці?

ЛЕКЦІЯ 4. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ХОНІНГУВАННІ І ОБРОБЦІ СТРІЧКАМИ

План лекції:

- 4.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при хонінгуванні
- 4.2. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при обробці стрічками

4.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при хонінгуванні

Як фінішна обробка отворів деталей машин все більшого поширення набуває алмазне хонінгування, що дозволяє високопродуктивно, з високою якістю та економічно обробляти ряд матеріалів.

При обробці сталевих і чавунних деталей алмазним інструментом опорна поверхня і радіус закруглення вершин можуть бути збільшені в кілька разів при відповідному зменшенні кута нахилу профілю порівняно з обробкою інструментом абразивних матеріалів.

Однак утворення поверхонь з великою опорною площею призводить до того, що при подальшій обробці різко знижується контактний тиск, зерна абразиву не можуть впроваджуватися в поверхню, що обробляється, режим часткового самозаточування порушується, продуктивність падає. Тому для попередніх операцій необхідно підбирати такі характеристики брусків та режими, при яких виходить порівняно невелика опорна поверхня. Оптимальні параметри якості повинні бути забезпечені остаточною операцією алмазного хонінгування.

Алмазне хонінгування все ширше застосовують для обробки бронзових деталей. Враховуючи досвід використання алмазного інструменту, поряд з вивченням впливу характеристики алмазних брусків та режимів хонінгування на параметри шорсткості підбирали режими чорнового та чистового хонінгування деталей із бронзи, що забезпечують найбільшу продуктивність.

Зі збільшенням дозованої подачі зростає площа фактичного контакту брусків з поверхнею, чим утруднюється відведення стружки із зони різання, зростають сили тертя, в окремих випадках виникає навіть схоплювання зв'язування брусків з металом, що обробляється, що в кінцевому рахунку погіршує якість обробленої поверхні.

4.2. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при обробці стрічками

Одним із перспективних методів фінішної обробки деталей є шліфування та полірування їх поверхонь нескінченною стрічкою із синтетичних надтвердих матеріалів. Цей гнучкий інструмент знаходить широке застосування для шліфування та полірування складних криволінійних поверхонь деталей, штоків поршнів, формотворчих елементів прес-форм та інших, виготовлених із сталей, чавунів та твердих сплавів. Невеликі тиски та сили різання, що виникають при цьому методі шліфування, дозволяють успішно застосовувати його для обробки крихких матеріалів. У порівнянні з обробкою навколо шліфування стрічками має суттєві переваги.

При обробці гнучкою нескінченною стрічкою необхідність її балансування відпадає. Значна довжина робочої поверхні та еластичність, що у багато разів перевищують робочу поверхню та пружність шліфувального кола, сприяють більш інтенсивному розсіюванню та відведенню теплоти із зони шліфування, що дуже істотно при шліфуванні деталей із жароміцних сталей та сплавів. На відміну від кіл з відносно жорсткими закріпленням різальних зерен у зв'язці гнучкі стрічки дозволяють у широких межах змінювати площу контакту між інструментом та оброблюваною деталлю, що створює можливість керувати величиною та характером розподілу контактного тиску, кількістю ріжучих елементів у зоні різання відповідно до фізико-механічних властивостями оброблюваної деталі та технологічними умовами на її обробку.

При виборі характеристики еластичних стрічок необхідно враховувати, що стрічки з кубоніту забезпечують більш високу продуктивність обробки, ніж алмазні. У той же час алмазними стрічками можна отримати поверхню з меншою шорсткістю та більшою опорною площею. Причому зі збільшенням жорсткості зв'язування та зернистості алмазів характеристики шорсткості обробленої поверхні покращуються.

Найбільше зменшення шорсткості відбувається у перші 40-50 з обробки. Надалі зміна шорсткості поверхні незначна. Це тим, що у початковий період обробки контактування інструменту та деталі відбувається з окремих нерівностей оброблюваної поверхні. Після деякого часу на мікроступах поверхні утворюються майданчики, які призводять до більшої кількості контактуючих зерен інструмента з поверхнею деталі. Пружні властивості каучуковмісних зв'язок та еластичного підшару також сприяють участі в процесі обробки більшої кількості зерен. Тому зусилля, що припадає на одичне зерно, зменшується, глибина впровадження в оброблювану поверхню, отже, і знімання металу також зменшуються, і поступово процес різання перетворюється на полірування.

Питання для самоперевірки

1. Наведіть режими хонінгування.
2. Які відхилення від форми усуває хон?

3. Які бруски рекомендується використовувати для попереднього хонінгування чавунних не термооброблених деталей?

4. Які параметри процесу шліфування стрічками впливають шорсткість деталі?

ЛЕКЦІЯ 5. ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ОБРОБЦІ ПОВЕРХНЕВО-ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ І ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДАХ

План лекції:

5.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при оздоблювально-зміцнювальній обробці поверхнево-пластичним деформуванням (ППД)

5.2. Формування якості при електрофізичних методах обробки

5.1. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару при оздоблювально-зміцнювальній обробці поверхнево-пластичним деформуванням (ППД)

Оздоблювально - зміцнююча обробка поверхнево-пластичним деформуванням (ППД) полягає у пластичному деформуванні поверхневого шару деталей роликками, кульками, алмазними інденторами. Залежно від ступеня пластичного деформування обробно-зміцнююча обробка ППД може бути обробною, обробно-зміцнюючою або зміцнюючою. Цілком очевидно, що ступінь пластичного деформування при обробно-зміцнююча обробка ППД в основному і визначає формування якості поверхневого шару деталей за всіма його параметрами: шорсткості, хвилястості, макровідхилення, зміцнення та інших напруг. Так, при обробці на оздоблювальних режимах відбуваються пластичне деформування вихідних мікронерівностей та їх зменшення, а також деформування виступів хвиль, зокрема, зниження їх висоти. на макровідхилення,

При обробці на оздоблювально-зміцнювальних режимах спостерігається пластичне деформування всіх вихідних мікронерівностей, їх значне зменшення, а також пластичне деформування вихідних хвиль і зменшення останніх, макровідхилення практично не змінюється, збільшується зміцнення і з'являються залишкові напруги, що стискають поверхню.

При обробці на зміцнювальних режимах відбувається повне переформування вихідної шорсткості та хвилястості, зменшення вихідного макровідхилення, значні зміцнення, стискаючі поверхневі залишкові напруги.

5.2. Формування якості поверхневого шару при електрофізичних методах обробки

Формування якості поверхневого шару деталей розглянемо одному з найбільш поширених у промисловості електрофізичних методах – електроерозійної обробки.

Електроерозійна обробка полягає у зміні форми, розмірів, шорсткості та властивостей поверхні заготівлі під впливом електричних розрядів внаслідок електричної ерозії. Схема електроерозійної обробки представлена на рис. 5.1.

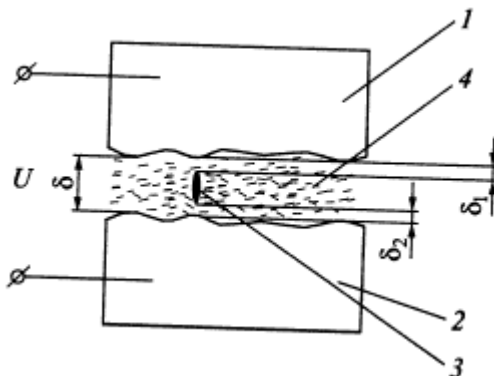


Рис. 5.1.. Схема електроерозійної обробки: 1 – електрод-інструмент; 2 - електрод-заготівля; 3 - електропровідна частка; 4 - діелектрична рідина

При зближенні двох металевих електродів 1 та 2 (рис. 5.1) що знаходяться під напругою U , настає момент, коли між ділянками електродів, розташованими на мінімальній відстані один від

одного, створюється електричне поле високої напруженості. Остання зростає обернено пропорційна відстані між електродами:

$$E = U / \delta, \quad (5.1)$$

де U - напруга між електродами 1 та 2; δ - відстань між електродами

При електроерозійній обробці важливу роль відіграють матеріал, з якого виготовлений електрод-інструмент, та діелектрична рідина. Найчастіше як матеріали для електродів-інструментів використовують мідь М1, М2, латунь, алюмінієві сплави Д1, АК7ч, АЛЗ, АК5М, мідний сплав МЦ4, сірий чавун, вольфрам, спеціальний графітований матеріал ББГ. Латунні та мідні електроди забезпечують хороші результати обробки, але схильні до досить великого зносу (до 60... 120 %). Як робочі рідини при електроерозійній обробці застосовують дистильовану воду, гас, індустриальні масла, дизельне паливо та інші подібні рідини, а також всілякі суміші з перерахованих рідин.

В результаті електроерозійної обробки поверхня набуває специфічної шорсткості, параметри якої визначаються розмірами та геометрією двох груп нерівностей: 1) отриманих в результаті взаємного перетину лунок і 2) утворених внаслідок спотворення профілю лунки.

Перша група нерівностей значною мірою визначатиметься розмірами лунок радіусом r і глибиною h , і навіть коефіцієнтом взаємного перекриття лунок β , тобто. факторами, за допомогою яких можна визначити ті чи інші параметри шорсткості. Друга група нерівностей повністю визначається випадковими чинниками.

Таким чином, можна розділити реальний профіль шорсткості на дві складові: систематичну та випадкову. Випадкову складову профілю шорсткості, яка становить 10...15 % від систематичної, зараз розрахувати досить складно.

Систематична складова профілю шорсткості в основному залежить від наступних факторів:

- 1) режимних параметрів процесу (напруги U , струму I , тривалості імпульсу і коефіцієнта корисного використання енергії імпульсу η);
- 2) фізико-механічних властивостей матеріалу деталі та інструменту (питомої теплоємності c ; щільності матеріалу ρ ; температури плавлення матеріалу T);
- 3) властивостей робочої рідини;
- 4) коефіцієнта перекриття лунок

Питання для самоперевірки

1. Перелічіть види ОЗО ППД залежності від ступеня пластичного деформування.
2. Які параметри ППД впливають на формування хвилястості поверхні.
3. Перелічіть параметри шорсткості при ОЗО ППД в залежності від робочого тиску.
4. Поясніть механізм утворення шорсткості при електроерозійній обробці.
5. Які фактори електроерозійної обробки впливають на систематичну складову профілю шорсткості.

ЛЕКЦІЯ 6. ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ

План лекції:

- 6.1. Утворення частково регулярних мікрорельєфів поверхні деталі
- 6.2. Утворення регулярних мікрорельєфів поверхні деталі

6.1. Утворення частково регулярних мікрорельєфів поверхні деталі

Досвід експлуатації машин, приладів, апаратів переконливо показує, що якість, надійність, довговічність залежать від характеру контактування деталей, що сполучаються один з одним або з рідким, газовим або іншим середовищем, що визначається станом поверхневого шару контактуючих деталей. Тому оптимізації якості поверхонь, що знаходяться в контакті, приділяється останнім часом все більша увага. Особливо слід виділити оптимізацію мікрогеометрії поверхонь, що контактують. Розв'язання цього завдання складно, що з двома

чинниками: різноманіттям технічних контактів і контактних явищ; складним взаємозв'язком службових властивостей контактів з мікрогеометрією поверхонь, що контактують.

Під регулярним розуміється такий мікрорельєф, ступінь регулярності нерівностей якого за висотою, формою та взаєморозташуванням забезпечує достатню для інженерних розрахунків точність лінійних та інших параметрів мікрогеометрії та залежних від них експлуатаційних властивостей поверхонь, що перевищують мінімум на один порядок точність подібних розрахунків для шорстких поверхонь.

Складна технологічна завдання освіти на поверхнях регулярних мікрорельєфів вирішується різними шляхами як щодо способу на оброблюваний матеріал (хімічного, механічного та інших.), і щодо принципу регуляризації мікрорельєфу. Складність завдання посилюється не тільки тим, що необхідно створювати на поверхнях різних матеріалів (головним чином, металів) регулярний мікрорельєф, але й дуже тонко і у великих межах «керувати» ним, тобто варіювати значення всіх його параметрів: висотних, крокових н по площі. При цьому варіювання значення кожного параметра має бути незалежним, тобто таким, щоб при зміні значення одного параметра значення інших залишалися незмінними. Наприклад, при зміні висоти нерівностей крок їх не повинен змінюватися, як це відбувається при точенні та шліфуванні.

Створення на робочих поверхнях деталей машин і приладів з метою оптимізації їхньої мікрогеометрії різноманітних заглиблень, що виконують найчастіше роль «мастильних кишень», практикується давно і зіграло свою роль у підвищенні працездатності та довговічності вузлів.

6.2. Утворення регулярних мікрорельєфів поверхні деталі

Утворення регулярного мікрорельєфу по всій поверхні (РМР) завдання ще складніше, ніж утворення поглиблення.

Нижче наведено основні вимоги до способів утворення РГАР*

1 Створюваний регулярний мікрорельєф повинен бути високо однорідним за формою, розмірами та взаєморозташуванням виступів і западин.

2. Форма, розмір і взаєморозташування нерівностей регулярного мікрорельєфу повинні бути функціонально пов'язані з параметрами режиму обробки, що визначає можливість аналітичних розрахунків параметрів РМР - при вирішенні прямої задачі та параметрів режиму - при вирішенні зворотного завдання.

3Спосіб повинен забезпечувати можливість тонкого і більших межах варіювання значень параметрів РМР, що визначають форму, розмір і взаєморозташування, тобто він повинен бути добре керованим.

4Необхідно передбачити можливість незалежного регулювання - управління утворенням регулярного мікрорельєфу з різними параметрами: зміна значень висотних (Параметрів не повинно призводити до зміни крокових параметрів або взаєморозташування нерівностей).

5. Повинна бути створена можливість технологічного забезпечення.печіння та управління освітою не тільки стандартизованих параметрів, але й інших, вельми інформативних, що визначають службові властивості поверхонь параметрів числа виступів і западин на одиницю площі, довжини профілю, радіусів виступів та западин нерівностей та ін.

6. Спосіб повинен бути універсальним, продуктивним, стабільним у часі, простим у здійсненні, економічним.

Нині ще створено спосіб освіти поверхнях регулярного мікрорельєфу, який у повною мірою задовольняв би переліченим вимогам. Найбільшою мірою відповідає цим вимогам запропонований та розроблений спосіб вібраційного накопчування.

Питання для самоперевірки

1. Класифікація поверхонь з регулярним мікрорельєфом.
2. Наведіть класифікацію найбільш широко застосовуваних способів утворення заглиблень на поверхнях деталей.
3. Перелічіть основні вимоги до способів освіти РМР.
4. Наведіть схеми освіти РМР.

ЛЕКЦІЯ 7. МЕТОД ПОДІБНОСТІ В ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ

План лекції:

7.1. Вихідні співвідношення методу подібності при різанні матеріалів.

7.2. Теоретико-експериментальні дослідження параметрів поверхневого шару при точінні.

7.1. Вихідні співвідношення методу подібності при різанні матеріалів

Процеси механічної обробки пов'язані з виникненням у зоні обробки складних фізичних явищ, обумовлених високими температурами і силами різання, тертям поверхонь, що контактують, та ін. Математичний опис цих явищ представляє складне завдання. Експериментальне дослідження також утруднене у зв'язку як зі складністю проведення експериментів, а й з великим обсягом.

У різних галузях науки і техніки щодо таких явищ широкого поширення набула теорія подоби, що дозволяє з урахуванням небагатьох експериментів отримувати узагальнені висновки. Щодо процесів обробки матеріалів різанням вперше методи теорії подоби були використані проф. С.С. Силінім. Ці методи засновані на аналізі результатів експериментального дослідження значень температури і сили різання, а також зношування інструменту та ін. за допомогою безрозмірних комплексів, що включають найважливіші параметри досліджуваних процесів. Вони перебувають шляхом аналізу загальних теоретичних рівнянь процесу різання.

Конкретна залежність між критеріями подібності встановлюється з урахуванням експериментів, коли результати дослідів обробляються з одержання залежностей між цими критеріями. Метод подібності дозволяє поширити дані невеликої кількості дослідів на групу подібних процесів обробки різанням та отримати узагальнені теоретико-експериментальні залежності у вигляді критеріальних рівнянь. У цьому випадку складні теоретичні рівняння, що встановлюють взаємозв'язок між безліччю окремих параметрів, що характеризують процес різання, спрощуються та стають функціональними залежностями між критеріями подібності, число яких значно менше від числа окремих параметрів.

7.2. Теоретико-експериментальні дослідження параметрів поверхневого шару при точінні

У загальному випадку залишкові напруги в поверхневому шарі деталей при механічній обробці визначаються як сума алгебри теплових і силових залишкових напруг. У зв'язку з цим у даному розділі представлена методика розрахункового визначення залишкових напруг у поверхневому шарі деталі з урахуванням одночасного впливу на поверхневий шар температури та сили різання. Запропонована методика застосовна для обробки лезовим інструментом (точіння, розточування, стругання, фрезерування), а також шліфуванням.

Залишкові напруги, обумовлені структурними і фазовими перетвореннями, не враховуються, що може бути справедливо при обробці жароміцних сплавів, так як вплив їх на сумарні залишкові напруги в цьому випадку незначно.

Таким чином, завдання зводиться до розрахунку теплових залишкових напруг і залишкових напруг, обумовлених силовим впливом на поверхневий шар. Оскільки залишкові напруги є пружними, а для складання останніх застосовуємо метод накладання, сумарні залишкові напруги визначаються підсумовуванням алгебри теплових і силових залишкових напруг. Для того щоб визначити залишкові напруги від кожного фактора окремо, необхідно встановити закономірність визначення температури в поверхневому шарі деталі, що обробляється, а також визначити силу різання, що діє на оброблювану поверхню.

Глибина наклепу обробленої поверхні, як доведено рядом досліджень, визначається глибиною залягання пластичних деформацій у поверхневому шарі. Відповідно до умови пластичності Хубера-Мізеса пластичні деформації в поверхневому шарі виникають при створенні напруг, рівних межі плинності.

Виникнення пластичних деформацій у поверхневому шарі обумовлено одночасним впливом температури та сили різання, тому глибина залягання пластичних деформацій повинна визначатися з умови рівності межі плинності алгебраїчної суми напруг, обумовлених силовим та

тепловим впливами. Для отримання розрахункових залежностей були проаналізовані закономірності впливу технологічних факторів виходячи з умов виникнення наклепу як від роздільної, так і спільної дії температури і сили різання. Розміцнювальна дія температури при цьому не враховувалася. При точінні дисків глибина наклепу, обумовленого тепловим впливом поверхневий шар.

Питання для самоперевірки

1. Класифікація поверхонь з регулярним мікрорельєфом.
2. В чому суть метода проф. С.С. Силіна?
3. Як визначаються залишкові напруги при механічній обробці?.
4. Як визначається глибина наклепу при точінні?

ЛЕКЦІЯ 8. ХВИЛЯСТІСТЬ, ЇЇ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛІ

План лекції:

- 8.1. Хвилястість, її нормування.
- 8.2. Механізм утворення хвилястості у процесі обробки.
- 8.3. Хвилястість і структурна технологічна спадковість.

8.1. Хвилястість, її нормування

Хвилястість, як і шорсткість, є однією з основних характеристик якості поверхні, що надає великий вплив на багато експлуатаційних властивостей деталей машин. Насамперед це пов'язано з тим, що наявність хвиль призводить до зменшення опорної площі в 5-10 разів у порівнянні з рівною шорсткою поверхнею. Хвилястість являє собою сукупність піднесень, що періодично повторюються, і западин з взаємною відстанню значно більшою, ніж у нерівностей, що утворюють шорсткість. Такий підхід до поділу шорсткості та хвилястості є вельми умовним і сформованим у процесі вивчення нерівностей під впливом розвитку техніки вимірів. Так, як кроковий кордон між шорсткістю та іншими видами нерівностей була регламентована «базова довжина» — довжина базової лінії, що використовується для виділення нерівностей,

Таким чином, фізично обгрунтованої, а тим більше природної фізичної межі між шорсткістю, з одного боку, і хвилястістю поверхні як сукупністю нерівностей з кроками, що перевищують базову довжину, з іншого боку немає. При обраній базовій довжині за допомогою різного роду фільтрів (механічних, електричних та ін) виділяють шорсткість і хвилястість із загальної сукупності рівнів поверхні. Виділення відбувається автоматично, наприклад, при вимірюваннях та записах нерівностей за допомогою частотних фільтрів, вбудованих в електромеханічні профілометри.

Шорсткість і хвилястість профілю поверхні мають складні спектральні склади, причому кроки і висоти нерівностей, що відповідають їм, варіюють по довжині профілю і, звичайно, ще більшою мірою на різних профілях поверхні деталі. Тому ще на початку розвитку формування та контролю нерівностей виникла ідея кількісної оцінки нерівностей у вигляді деяких середніх величин. Такі оцінки, що визначаються на профілях, стали традиційними, вони фігурують у національних стандартах різних країн та у міжнародній нормативній документації.

8.2. Механізм утворення хвилястості у процесі обробки

У загальному випадку на утворення хвилястості поверхонь деталей машин при механічних методах обробки впливають такі фактори:

- 1) вихідний стан поверхневого шару оброблюваної заготовлі H_1 ;
- 2) биття заготовки та інструменту H_2 ,
- 3) геометрія інструменту та кінематика його переміщення відносно оброблюваної поверхні H_3 .

Залежно від методів та режимів обробки ступінь впливу перерахованих факторів на утворення хвилястості буде різним. Таким чином, середня висота хвилястості, що утворюється

на поверхні деталі при механічних методах обробки, складається з усіх перерахованих складових відповідно до правил підсумовування випадкових величин:

$$W_z = 1,2\sqrt{H_1 + H_2 + H_3}, \quad (7.1)$$

Аналіз наведених залежностей показує, що основний вплив на хвилястість при точенні робить жорсткість технологічної системи, швидкість, подача та глибина різання. При шліфуванні формування хвилястості поверхні визначається ємністю технологічної системи, швидкістю обертання деталі, її биттям та умовами виправлення кола. Як і шорсткості, явище технологічної спадковості особливо яскраво проявляється при ОУО ППД. Висота хвилястості, що утворюється, залежить від її вихідного значення, зусилля накочування і геометрії інструменту.

8.3. Хвилястість і структурна технологічна спадковість

Хвилястість сама по собі не має властивість поопераційного копіювання, проте в результаті утворення циклічних структурних змін і наявності безлічі концентраторів напружень при цьому все ж має місце так звана «структурна» технологічна спадковість.

Це означає, що на наступній операції вихідна структура і напружений стан зовнішнього шару металу повністю не видаляються і в якійсь мірі взаємодіють з тими полями напружень і структурою, які знову утворюються.

В цьому і полягає сутність явища технологічної спадковості в умовах утворення хвилястості на поверхні деталі.

Отже, хвилястість не можна вивчати тільки з геометричних позицій, а потрібно враховувати також і фізичні явища. Якщо відсутнє поопераційне геометричне копіювання, то є «структурний» копіювання.

Макровідхилення поверхні при механічних методах обробки визначається чотирма факторами:

- 1) геометричною неточністю верстата H_1 ;
- 2) різницею пружних деформацій технологічної системи при обробці поверхонь H_2 ;
- 3) температурними деформаціями технологічної системи у процесі обробки поверхні H_3 ;
- 4) зношуванням ріжучого інструменту при обробці поверхні H_4 . Додавання цих складових макровідхилень за довжиною, шириною або діаметром поверхні при визначенні H_{\max} проводиться геометрично:

$$H_{\max} = H_1 \pm H_2 \pm H_3 \pm H_4, \quad (7.2)$$

Питання для самоперевірки

1. Поясніть хвилястість поверхні, наведіть її характеристики.
2. Поясніть механізм утворення хвилястості при шліфуванні.
3. Які характеристик впливають на утворення шорсткості при обробці різанням.
4. Які ви знаєте параметри хвилястості?
5. Якими факторами визначається макровідхилення при механічних методах обробки?

ЛЕКЦІЯ 9. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ НА УТВОРЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПОХИБОК ОБРОБКИ

План лекції:

- 9.1. Закономірності поопераційного копіювання геометричних похибок форми деталі.
- 9.2. Роль внутрішніх напружень в утворенні похибки обробки.
- 9.3. Перепони, котрі чинять спротив поопераційному копіюванню геометричних похибок форми деталі.

9.1. Закономірності поопераційного копіювання геометричних похибок форми деталі

Усі об'єкти машинобудування – деталі та вироби загалом – мають відповідні показники якості. Ці показники встановлюють, виходячи зі службового призначення об'єктів. Для одних

головними є розміри, для інших – шорсткість поверхні або форма, напруження поверхневих шарів, взаємне розташування поверхонь тощо. Похибки обробки та збирання виникають завжди. Виробів без відхилень від номінального значення показників якості немає. Проте будь-яке відхилення має бути у допустимих межах - допусках. Причому важливо як визначити якісно і кількісно дане відхилення, а й встановити, чому воно виникло, які умови сприяли його виникненню, як це відхилення формувалося у процесі виготовлення виробу у часі, починаючи з вибору матеріалу для заготівлі конкретної деталі, її обробки тощо. буд.

Проблеми забезпечення та підвищення якості виробів ґрунтуються на розгляді фізичних причин їх відмов у роботі та пов'язані з розвитком дослідницького апарату, здатного описати всю складну еволюцію умов та наслідків, що призводять до відмови. Будь-який об'єкт виробництва, перебуваючи в різноманітних зв'язках і взаємодіях з навколишніми об'єктами, беручи участь одночасно в декількох формах руху, є концентратом умов, в яких він (об'єкт виробництва) формувався в часі.

Технологічним успадкуванням називається явище перенесення якостей об'єктів від попередніх технологічних операцій до наступним. Ці властивості можуть бути як корисними, так і шкідливими. Збереження цих властивостей в об'єктів називають технологічної спадковістю. Такі терміни є досить ємними. З їх допомогою та за відповідними методиками можна простежити за станом об'єкта виробництва у будь-який момент часу з урахуванням усіх попередніх технологічних впливів, що мали місце у минулому. У процесі передачі властивостей важливу роль відіграє так звана спадкова інформація. Вона полягає в матеріалі деталей та поверхневих шарах цих деталей. Інформація є великий перелік показників якості.

Дуже суттєвими є встановлення загальних закономірностей технологічного успадкування, визначення кількісної сторони технологічного успадкування таких параметрів, як конструктивні форми заготівель і деталей, похибки технологічних баз, похибки форми та просторові відхилення заготовки, їх хвилястість, фізико-механічні властивості, поверхневих шарів. мають спадкові похибки при складанні.

Технологічна спадковість передбачає взаємозв'язок окремих елементів системи. Під системою можна розуміти як технологічний процес, і сам об'єкт обробки.

9.2. Роль внутрішніх напружень в утворенні похибки обробки

Звичайно, залишкові напруження в заготовках знаходяться у рівновазі й зовнішньо не виявляються. Проте знімання певної частини металу у вигляді припуску, розрізки, термообробки і ряду технологічних операцій порушує її. У результаті відбувається деформація заготовки та перерозподіл залишкових напружень до нової рівноваги.

Розрізняють три види залишкових напружень. Напруження першого роду зрівнюються у межах об'єму матеріалу, що співрозмірні з габаритами оброблюваних заготовок. Напруження другого роду утворюються у мікроскопічних об'ємах, а третього роду – в ультрамікроскопічних об'ємах і зрівнюються у межах кількох чарунків кристалевих ґрат. У технології машинобудування найбільший вплив мають напруження першого роду.

Залежно від застосованого технологічного методу виробництва заготовок розрізняють наступні залишкові напруження:

- литтєві, що виникають під час охолодження зливок;
- ковани, що утворюються у поковках і гарячештампунаних заготовках;
- термічні, що утворюються при термообробці;
- зварювальні;
- від наклепу, що виникають при холодній прокатці та штампуванні, волочинні, дрібноструминної обробки та ін.;
- виникаючі при обробці різанням;
- утворюються при електролітичному покритті деталей.

Для зменшення або повного знімання залишкових напружень в конструктивному плані розробляють форму деталі, що відповідає рівномірному охолодженню усіх частин заготовки, а при обробці різанням в обов'язковому порядку чорнову обробку виділяють в окрему операцію. Після чорнкової обробки заготовки створюють умови для вільного деформування під впливом

перерозподілу внутрішніх напружень шляхом звільнення від затискачів. Значно зменшуються послідовні деформації при застосуванні природного та штучного старіння заготовок.

9.3. Перепони, котрі чинять спротив поопераційному копіюванню геометричних похибок форми деталі

Зниження негативного впливу технологічної спадковості при підвищенні точності обробки може бути досягнуто різними способами, зокрема найбільш традиційним методом є підвищення жорсткості технологічної системи ВПД.

Збільшення жорсткості технологічної системи прискорює процес округлення деталі або в загальному випадку прискорює усунення геометричних похибок, що утворилися на попередній операції. Проте, підвищення жорсткості системи ВПД є складним технічним завданням, так як зі збільшенням жорсткості власне самих деталей необхідно підвищувати контактну жорсткість стиків.

Було встановлено, що контактна жорсткість в значній мірі залежить від основних характеристик якості поверхонь деталей, що сполучаються, а отже, і від технології їх виготовлення. Тому, виходячи з цієї величини контактної жорсткості, можна призначати певні умови обробки (технологічний метод, режим обробки і т. д.), для того щоб забезпечити отримання поверхні з необхідними параметрами шорсткості, мікротвердості і т. д.

Другим важливим напрямом є використання різних пристроїв активного контролю з автоматичними підналагоджувачами. Принцип їх роботи полягає в тому, що імпульс від вимірювального приладу, вбудованого у верстат, призводить до спрацьовування реле, яке включає механізм корекції даного верстата. Більш точне підналагодження може бути проведене при отриманні команди на основі статистичних характеристик групи оброблюваних деталей.

Робота верстата з використанням названих засобів управління може здійснюватися за двома основними схемами. Для першої схеми, автоматичні підналагоджувачі зі зворотним зв'язком, деталь після обробки на верстаті надходить у вимірювальний пристрій, а результати вимірювання передаються на механізм, що коректує налаштування верстата.

На відміну від першої схеми автоматичний підналагоджувач з попередніми регулюваннями має вимірювальний пристрій для заготовок і забезпечує за допомогою спеціального механізму регулювання верстата для кожної конкретної деталі, що значно знижує вплив випадкових похибок.

Розглянуті пристрої дозволяють досить ефективно усувати негативний вплив технологічної спадковості, пов'язане з перенесенням похибки форми заготовки до обробленої деталі.

Останнім часом все більша увага приділяється дослідженню нових методів обробки, які б дозволили суттєво зменшити вихідні геометричні похибки форми деталі, т.т. характеризувалися б високим коефіцієнтом уточнення.

Питання для самоперевірки

1. Суть явища поопераційного копіювання.
2. Які причини виникнення залишкових напружень.
3. Які методи використовують для зняття внутрішніх напружень.
4. Перелічіть способи і методи для зниження післяопераційного копіювання геометричних похибок.

ЛЕКЦІЯ 10. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ НА ФОРМУВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

План лекції:

- 10.1. Структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах деталей при їх обробці.
- 10.2. Вплив вихідної (токарної) шорсткості на фізико-механічні характеристики поверхонь після шліфування.

10.1. Структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах деталей при їх обробці

Явища технологічної спадковості необхідно використовуватиме підвищення будь-якого параметра якості виробів.

При окремих методах механічної обробки, що відрізняються значним впливом силового та температурного факторів на поверхневий шар деталі, відбуваються структурно-фазові перетворення. Так, шліфування загартованих сталей за певних режимів різання призводить до явища відпочинку, що знижує поверхневу мікротвердість деталі. При цьому виді обробки можуть відбуватися і більш складні явища.

Зазвичай причини виникнення похибок пов'язують із фінішними, останніми операціями. Використовуючи принцип технологічної спадковості, можна стверджувати, що властивості виробів формуються як на останній операції, а й у протязом всього технологічного процесу. Причину відмови (зносу) можна знайти, розглянувши весь технологічний ланцюжок.

У ході технологічних процесів успадковуються практично всі властивості матеріалу та поверхневих шарів заготовок та деталей.

Велике значення має технологічне наслідування конструктивних форм деталей. Воно проявляється завжди, але іноді спадкові похибки виявляються малими та їхній вплив на службові характеристики маловідчутні.

У переважній більшості випадків технологічне наслідування конструктивних форм слід розглядати як шкідливе явище. Боротися з ним необхідно за допомогою конструктивних заходів, навіщо важливо визначати відхилення форми кількісно. Розрахунковий метод знаходження похибок дозволяє для низки деталей оцінювати пружні переміщення під дією сил різання та закріплення з дуже високою точністю. Для великогабаритних прецизійних деталей використання розрахункового методу особливо бажане, оскільки такі деталі неможливо встановити на вимірвальні прилади, наприклад кругломіри.

Найбільш типовий випадок виникнення відхилень форми через змінну жорсткість заготовок, оброблюваних на верстатах токарної і шліфувальної груп. Загалом заготовки немає симетричних поперечних перерізів. Для розрахунків їх слід схематизувати та замінювати балками, що складаються з ряду ділянок, кожна з яких має свою жорсткість.

10.2. Вплив вихідної (токарної) шорсткості на фізико-механічні характеристики поверхонь після шліфування.

При шліфуванні сталевих деталей, грубо обточеної токарним різцем і потім загартованої, її поверхневих шарах протікають теплові процеси, дія яких представлена на рис. 10.1.

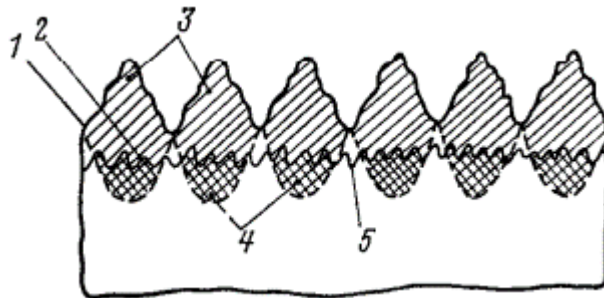


Рисунок 10.1. Вплив термічних ударів на фізико-механічні властивості шліфованої поверхні: 1 - мікрорельєф поверхні після токарної обробки; 2 - мікрорельєф шліфованої поверхні; 3 - теплові поля, що утворилися в результаті дії термічних ударів; 4 - залишкові зони термічних ударів; 5 - граничні зони

При врізанні шліфувального кола у вихідну шорстку поверхню 1 виступи миттєво зрізаються. У зоні кожного виступу створюється термічний удар, тобто відбувається локалізоване нагрівання зі швидкістю кілька сотень градусів в 1 сек. Теплові зони 3 поширюються вглиб металу, і в них майже завжди спостерігаються зміни вихідної структури. Ці зони часто залишаються у поверхневому шарі після шліфування (дільниці 4).

Оскільки різні структури мають різний питомий обсяг, цілком зрозуміло, що в місцях, що розділяють суміжні теплові зони, виникають високі напруги, які можуть призвести до утворення мікротріщин. На травлених мікрошліфах при відповідному збільшенні завжди видно світлі і темні смуги, що чергуються. Це свідчить про наявність різних структур, що мають різний ступінь, трави- мості. Їх утворення є наслідком нерівномірності теплового впливу шліфувального кола на кожен елементарну ділянку поверхні, що шліфується або наслідком термічних ударів. Імовірність утворення на граничних ділянках граничних напруг збільшується ще й внаслідок наступної шок, охолоджуючись, розтягують граничні зони. У цей момент тріщини збільшуються в розмірах або виникають заново за наявності високої напруги біля дна западин.

Питання для самоперевірки

1. При шліфуванні стали ШХ15 і інших високолегованих загартованих сталей часто утворюються дві якісно різні зони структурного стану, назвіть їх, поясніть механізм утворення.
2. Як проявляється технологічна спадковість поверхні обробленої на фінішних операціях.
3. Як впливають доводочні операції на поверхневий шар.
4. Поясніть вплив шорсткості попередньої токарної обробки на утворення шорсткості після шліфування.

ЛЕКЦІЯ 11. ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ СПОЛУЧЕНЬ МЕТОДІВ ОБРОБКИ З ВРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ

План лекції:

11.1. Закономірності прояву технологічної спадковості за різних сполучень фінішних методів обробки.

11.2. Використання математичних методів для вибору оптимальних сполучень видів технологічної обробки.

11.1. Закономірності прояву технологічної спадковості за різних сполучень фінішних методів обробки

Для отримання готової деталі при призначенні виду та послідовності механічних операцій є досить широкий вибір відомих у практиці методів обробки. При цьому найбільш відповідальні поверхні послідовно піддаються дедалі більш тонким процесам обробки. У практиці зазначений порядок призначення технологічних операцій витримується головним чином з метою отримання деталі із заданою кресленням геометричною точністю та необхідною шорсткістю. Зазвичай технічними умовами не обумовлюються інші дуже важливі експлуатаційні характеристики остаточно оброблених деталей, наприклад хвилястість поверхні, мікротвердість зовнішнього тонкого шару металу, його структура, величина і знак залишкових напруг і т. д.

Розглянемо можливість визначення раціональних поєднань методів обробки для отримання робочих поверхонь шарикопідшипників з оптимальною шорсткістю ($R_a=0.08-0.063$ мкм), мінімальною хвилястістю та максимальною мікротвердістю.

Найбільш поширеним у машинобудуванні (і особливо в підшипниковій промисловості) способом отримання загартованих деталей високої точності та з оптимальною шорсткістю поверхонь є шліфування з подальшим поліруванням абразивною шкіркою.

При звичайному шліфуванні набувають шорсткість оброблених поверхонь $R_a=1,25-0.63$ мкм, а хвилястість із середньою висотою хвилі $H_v = 2-5$ мкм. Наступним поліруванням досить важко отримати шорсткість поверхні $R_a=0.08-0.063$ мкм (слід зазначити, що дана шорсткість є оптимальною для робочих поверхонь підшипників кочення). У зв'язку з цим виникає необхідність знайти такий метод шліфування, який економічно вигідно забезпечував би $R_a=0.32-0.25$ мкм, після чого поліруванням можна гарантовано та стабільно отримувати шорсткість $R_a=0.08-0.063$ мкм та мінімальну хвилястість. Одним із таких методів є обробка гнучкими абразивними кругами, що застосовується після звичайного шліфування. Ці круги виконуються на гумовій зв'язці з додаванням штучних смол.

Введення після звичайного шліфування додаткової операції шліфування гнучким кругом дає можливість стабільно отримувати шорсткість поверхні $Ra=0.32-0.25$ мкм.

Для отримання високої чистоти поверхні та найкращих експлуатаційних властивостей найбільш вигідним виявляється звичайне шліфування деталей на $Ra=1,25-0.63$ мкм з подальшим поліруванням до шорсткості $Ra=0.16-0.063$ мкм.

11.2. Використання математичних методів для вибору оптимальних сполучень видів технологічної обробки

Вплив великої кількості технологічних факторів на формування характеристик якості поверхні на різних етапах обробки ускладнює оцінку впливу окремих методів попередньої та остаточної обробки. Однак це завдання може бути вирішена на основі використання ймовірнісних та статистичних методів при плануванні та проведенні експериментів, а також при обробці отриманих даних.

Застосування різних методів математичної теорії планування експерименту дозволяє зовсім по-новому підійти до завдання дослідження технологічної спадковості, перейшовши від методології однофакторного експерименту до методів комплексного багатфакторного дослідження аналізованих процесів.

Одним із таких методів є дисперсійний аналіз, за допомогою якого досліджувався вплив попередніх та остаточних методів, а також їх взаємодія на характеристики якості поверхні та експлуатаційні властивості деталей.

Питання для самоперевірки

1. Який вплив справляють поєднання операцій на кінцеву шорсткість.
2. Яка з операцій шліфування забезпечує поверхню без рисок.
3. Яке поєднання операцій дозволяє отримати поверхню з невеликими величинами хвилястості і шорсткості.
4. Назвіть метод, за допомогою якого досліджувався вплив попередніх і остаточних методів, а також їх взаємодію на характеристики якості поверхні і експлуатаційні властивості деталей?

ЛЕКЦІЯ 12 КОНТРОЛЬ І ВИПРОБУВАННЯ

План лекції:

- 12.1. Метрологічне забезпечення геометричних параметрів якості в інженерії поверхні
- 12.2. Системи мікроскопії для дослідження параметрів поверхонь.

12.1. Метрологічне забезпечення геометричних параметрів якості в інженерії поверхні

Для контролю параметрів шорсткості необхідно виконати такі процедури.

1. Вибрати метод контролю з урахуванням вимог креслення за номенклатурою та рівнем вимірюваних параметрів залежно від форми та розмірів деталі, типу та положення поверхонь, параметри шорсткості яких потрібно визначити. При виборі методу контролю шорсткості необхідно виходити з можливостей проведення вимірювань безпосередньо на деталі, без її руйнування або вибірково після руйнування деталі, що обумовлено серійністю виробництва, трудомісткістю виготовлення та стабільністю технологічного процесу обробки.

З урахуванням зазначених умов призначають метод виміру параметрів шорсткості поверхонь у лабораторних умовах або в цеху, вибірково або по всій партії деталей.

2. За результатами аналізу, зробленого за п. 1, призначити засоби вимірювання параметрів шорсткості деталей з урахуванням реальних можливостей підприємства (наявності чи можливості придбання необхідних приладів та матеріалів).

3. Залежно від обсягу та заданої точності вимірювань вибрати спосіб визначення значень параметрів шорсткості (ручною обробкою профілограм, за показаннями приладу, розрахунком на ЕОМ, методом порівняння з еталоном та ін.).

Шорсткість поверхні контролюють:
вимірювання параметрів приладами;
визначенням параметрів із філограм, оброблених вручну;
визначенням параметрів із профілактограм з використанням ЕОМ;
з використанням електронної цифрової приставки до профілометрів;
з використанням автоматизованих систем з урахуванням ЕОМ;
порівнянням із зразками.

Сучасні засоби вимірювання шорсткості ділять в основному на дві групи, безконтактні та контактні. З безконтактних засобів вимірювання параметрів шорсткості найбільш поширені оптичні прилади, дія яких ґрунтується на принципах світлового перерізу (ПСС), тіньового перерізу (ПТС), інтерференції світла (МІІ) та застосування растрів (ОРІМ).

З-поміж контактних найбільш поширені засоби вимірювання, що отримали назву щупових, принцип дії яких заснований на обмацуванні досліджуваної поверхні голкою з дуже малим радіусом закруглення. Щупові прилади для вимірювання шорсткості ділять на профілометри, що безпосередньо показують значення вимірюваних параметрів, і профілографи, що записують профіль мікронерівності поверхні.

Для контролю параметрів шорсткості поверхонь складної форми у важкодоступних місцях, а також за відсутності цехових засобів вимірювання застосовують так званий метод зліпків. Сутність методу полягає у знятті зліпків з поверхонь для подальшого виміру нерівностей поверхонь цих зліпків.

Для відносної якісної оцінки шорсткості обробленої поверхні робочому місці можуть бути використані зразки шорсткості. Порівняння контрольованої поверхні з поверхнею робочого зразка або зразкової деталі є найбільш простим та економічним методом контролю шорсткості.

12.2. Системи мікроскопії для дослідження параметрів поверхонь

Параметри хвилястості поверхні можуть бути визначені тими ж методами та засобами, що й параметри шорсткості, причому профілометри "Talysurf", "Homel - Tester" та "Pert - Metr" мають відповідні електричні фільтри, що дозволяють при перемиканні переходити з вимірювання параметрів шорсткості на вимірювання параметрів хвилястості або записувати хвилеграми на тих же трасах.

Вітчизняні профілометри можуть бути використані для вимірювання параметрів хвилястості, але із застосуванням механічного фільтра. Як такий фільтр рекомендується застосовувати щуп радіусом $r = 15$ мм, збільшуючи відсічення кроку, як мінімум, у 4 рази порівняно з вимірюванням параметрів шорсткості. Параметри хвилястості успішно можуть бути визначені і з хвилеграм, записаних на профілактографах і кругомірах мод. 218 та мод. 255.

Вимірювання та оцінку макровідхилення поверхонь потрібно проводити на ділянці довжини, що нормується, а вплив параметрів шорсткості поверхні має бути виключено вибором радіуса вимірювального наконечника або застосуванням частотних фільтрів в ланцюзі перетворення і реєстрації вимірювального сигналу.

При вимірі відхилень від прямолінійності можна використовувати технічні засоби з відліковим пристроєм. За відхилення від прямолінійності приймають різниця алгебри між найбільшим і найменшим показаннями. Крім цього, можна використовувати профілограму вимірюваного профілю, яку обробляють за спеціальною методикою.

При вимірі відхилень від площинності використовують в основному дискретні методи отримання інформації по окремих точках поверхні. Число точок регламентовано. Вимірювальні прилади повинні містити сферичні наконечники, що коливаються. Вимірювана поверхня є математичну модель, тобто. сукупність значень відстаней від базової площини до вимірюваної закодованих точках.

Відхилення від круглості контролюють у перерізах деталі, які заздалегідь обмовляють.

Його оцінюють або за показаннями відлікових пристроїв або обробкою профілактограм.

При вимірюваннях та контролі відхилень від циліндричності використовують інформацію щодо окремих точок або профілів, що лежать на поверхні. Використовують чотири методи вимірювання відхилень від циліндричності: поперечних перерізів, що утворюють гвинтову лінію, екстремальних значень.

Використовують серію методів вимірювань відхилень від паралельності площин, осі щодо площин, прямих у площині та осей у просторі. Під прямими також розуміють кромки деталей, що утворюють циліндричні поверхні. Усі засоби вимірювання мають зразкову площину (перевірочні плити, плоскопаралельні пластини або планки).

Питання для самоперевірки

1. Перерахуйте недоліки існуючих приладів для вимірювання характеристик поверхні.
2. Особливості створених віртуальних приладів.
3. Які параметри поверхонь і шарів дозволяє вимірювати віртуальний прилад.
4. Режими роботи системи «Мікро-ПК».

ЛІТЕРАТУРА

1. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
3. Демин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демин, Э.В. Рыжов. – М: Машиностроение, 1981. – 238с.
4. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
5. Ящерицин П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверчиков . – Минск: Наука и техника, 1977. – 253 с.