

РОЗДІЛ 3

ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

3.1. Загальні відомості про поверхню твердих тіл та її якість

Природа поверхні твердих тіл, її хімічний склад і структура великою мірою визначають триботехнічні характеристики пар тертя. Навіть часткове покриття поверхні твердого тіла (деталі) моношаром адсорбованих атомів або молекул істотно позначається на адгезії і терті. Лише 1% легованого елемента, що міститься в матеріалі, у разі дифузії до поверхні може визначати зносостійкість матеріалу. Те саме стосується присадок до мастильних матеріалів, котрі взаємодіючи з поверхнею твердих тіл, ефективно захищають їх від різних видів зношування.

Взаємодія твердих тіл в умовах зовнішнього тертя локалізована в найтонших поверхневих і приповерхневих (підповерхневих) шарах, що трансформуються у процесі як технологічної обробки, так і експлуатації. Руйнування деталей вузлів тертя починається здебільшого у поверхневих шарах. У зв'язку з цим підвищується роль поверхні деталі в підвищенні надійності й довговічності вузлів тертя, що потребує розгляду її основних характеристик.

Характеристики зовнішнього тертя, змащування і зношування безпосередньо пов'язані з якістю поверхонь деталей, які в процесі роботи труться. В техніці під поверхнею деталі розуміють зовнішній шар, який за будовою та іншим фізичним властивостям відрізняється від внутрішньої частини. Комплекс властивостей, набутих поверхнею деталі в результаті обробки, характеризуються загальним поняттям "якість поверхні".

Якість поверхні деталей машин впливає на такі їх службові властивості, як опір втомі, зносо-, ерозіє- і корозостійкість та пов'язаних з такими властивостями спряжень, як міцність посадок з натягом і щільність рухомих і нерухомих з'єднань.

Якість поверхонь деталей машин розглядається у вихідному і робочому (експлуатаційному) стані (рис. 3.1). Вона визначається геометрією поверхні, будовою і фізико-хіміко-механічними властивостями поверхонь шарів і напруженнями в них.

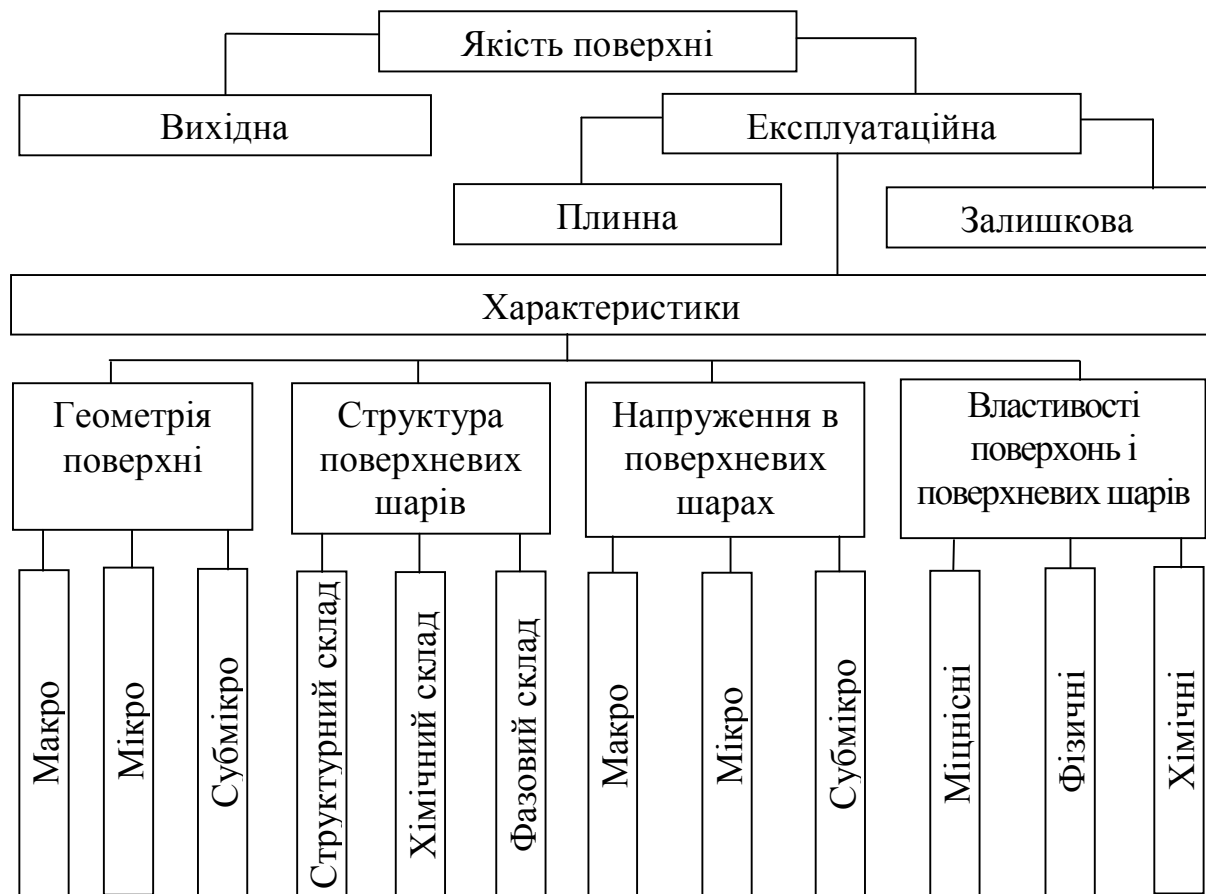


Рисунок 3.1. Основні показники якості поверхні

Вихідна якість зумовлюється технологією обробки. Її значення особливо велике для початку роботи спряжень, які труться (періоду припрацювання і подальшого зберігання в процесі експлуатації заданих посадок).

Реальні деталі в результаті механічної обробки заготовок мають відхилення від ідеальної форми, зображеної на робочих кресленнях цих деталей. Такі відхилення називають похибками.

Похибки обробленої поверхні з точки зору причин їх утворення і методів вимірної техніки, що застосовуються для їх визначення, можна поділити на макро-, мікро- і субмікрогеометричні відхилення.

Характер контактування двох твердих тіл, окрім геометрії поверхонь, визначається механічними, фізичними і хімічними властивостями тонких поверхневих шарів і їхнім напруженим станом. Такі поверхневі шари, товщина яких становить від десятків ангстремів до сотих і рідко – десятих часток міліметра, мають як правило іншу структуру і властивості, ніж матеріали усередині виробу. Відмінність властивостей тонких поверхневих шарів від властивостей серцевини зумовлена трьома основними факторами:

а) станом атомів металу в поверхневих шарах, що відрізняється від стану атомів в об'ємі, наслідком чого є наявність вільної поверхневої енергії і велика адсорбційна активність;

б) сумою механічних, теплових і фізико-хімічних впливів на поверхню металу під час остаточних і попередніх операцій технологічної обробки;

в) сумою повторних циклічних, механічних, теплових і фізико-хімічних впливів на поверхню металу у разі навантаження тертям в експлуатації.

В процесі експлуатації вихідний технологічний рельєф швидко зникає. Хімічний склад і геометрія поверхонь тертя повністю змінюється. Формується нова якість поверхні. Перехід від вихідного стану до експлуатаційного здійснюється під дією факторів зовнішнього тертя: навантаження, швидкості руху, температури в зоні контакту і середовища. Зміни якості поверхні й особливого стану тонких поверхневих шарів під час роботи пари, яка треться, можуть бути зворотними, які зникають після зняття навантаження, і незворотними, залишковими. Тому експлуатаційну якість поверхні визначають не тільки залишковими характеристиками після зняття навантаження, але й плінними змінами в процесі тертя.

3.2. Геометрія поверхні деталей машин

Оцінка геометричних параметрів поверхні деталей машин включає оцінку макро-, мікро- і субмікрівідхилення з урахуванням природи і механізмів утворення геометричних відхилень, тобто з розподілом на складові, які викликаються механічною обробкою, внутрішньою будовою і навантаженням при експлуатації.

Під макрогеометрією розуміють відхилення від форми поверхні всієї деталі або великих її ділянок. Макронерівності являють собою відхилення поверхні від номінальної форми всієї деталі: відхилення контуру від округлості: для циліндрів – конусоподібність, некруглість, бочкоподібність, сідловитість; для площин – неплоскостність, випуклість, угнутість та інші.

Мікрівідхилення поділяються на хвилястість, шорсткість і субмікрошорсткість.

Мікрогеометричні відхилення можуть бути технологічними і експлуатаційними. Технологічні макровідхилення зумовлені недостатньою точністю верстата, інструмента, режимами обробки, температурними напруженнями і деформаціями. Експлуатаційні макровідхилення зазвичай спричиняються нерівномірністю зношування, що виникає в результаті неправильного установаження деталей рухомого з'єднання, вібраціями і перевантаженнями в процесі роботи. Залежно від ступеня точності виготовлення деталі, у відповідних стандартах наводяться граничні відхилення від плоскості, прямолінійності, форми циліндричних поверхонь, радіального биття, паралельності і перпендикулярності. З підвищенням якості машин, їхньої надійності і довговічності механічні вимоги до форми деталей машин зростають.

Під хвилястістю поверхонь розуміють сукупність більш чи менш регулярно почергових підвищень чи впадин з кроком хвилі значно більшим за її висоту.

Хвилястість являє собою сукупність вершин і впадин, які періодично повторюються на поверхні, на відстані меншій, ніж у макронерівностей, і більшій, ніж у мікронерівностей.

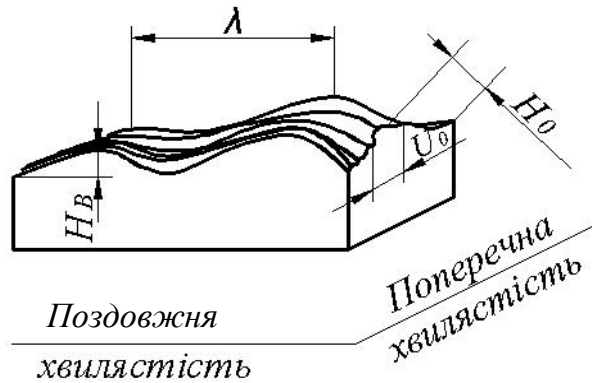


Рисунок 3.2. Схема хвилястості поверхні:
 λ – крок хвилі в поздовжньому напрямку;
 H_B – висота хвилі в поздовжньому напрямку; λ_0 – довжина хвилі в поперечному напрямку; H_0 – висота хвилі в поперечному напрямку

Форма коливань близька до синусоїди з періодом порядку 10 мм. Для хвилястості відношення кроку до висоти нерівностей змінюється від 150 до 500.

Хвилястість у напрямі головного руху при різанні називають поздовжньою, а в перпендикулярному напрямі поперечною (рис. 3.2).

Мікрогеометрія (шорсткість) – характеристика форми і розмірів поверхневих нерівностей з відносно малим кроком на базовій довжині (відношення кроку до висоти нерівностей повинно бути менше 50). Шорсткість поверхні – розмірна характеристика поверхні і регламентована ГОСТом 2789-73, ГОСТом 2309-73 та методичними вказівками у впровадження згідно з ГОСТом 2789-73. У відповідності з цими державними стандартами передбачається 6 основних параметрів, що характеризують шорсткість поверхні: 3 висотних – R_a , R_z , R_{max} , 2 крокових – S і S_m , відносна опорна довжина профілю t_p (рис. 3.3).

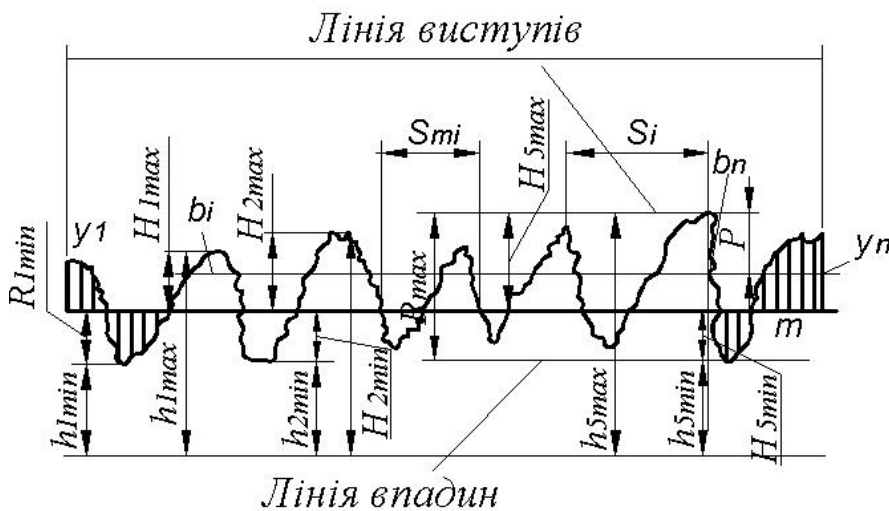


Рисунок 3.3. Вихідна шорсткість

Середнім арифметичним відхиленням профілю R_a , називають середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини l :

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \text{або} \quad R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y(x)| dx. \quad (3.1)$$

На профілограмі розміщення середньої лінії профілю визначають так, щоб площі виступів і впадин контуру профілю F по обидва боки від неї були рівні, тобто

$$F_1 + F_3 + F_5 \dots F_{n+1} = F_2 + F_4 + F_n \quad \int_0^l y(x) dx = 0. \quad (3.2)$$

Відносна однорідність мікронерівностей поверхні деталі дозволяє судити про шорсткість у даному напрямку за результатами дослідження ділянки порівняно невеликої довжини. Довжину базової лінії, що використовується для виділення нерівностей, які характеризують шорсткість поверхні, називають базовою довжиною l .

Висота нерівностей профілю по 10 точках R_z являє собою суму середніх абсолютних значень висот з п'яти найбільших виступів профілю і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{l=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{l=1}^5 |y_{vi}| \right), \quad (3.3)$$

де y_{pi} – висота найбільшого i -го виступу профілю;
 y_{vi} – глибина i -ї найбільшої впадини профілю.

Найбільша висота нерівностей профілю R_{max} є повною висотою профілю, тобто відстанню між лінією виступів профілю і лінією впадин профілю в межах базової довжини.

Середній крок місцевих виступів профілю S – середнє значення кроків місцевих виступів профілю в межах базової довжини:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i. \quad (3.4)$$

Середній крок нерівностей профілю S_m – середнє значення кроку нерівностей профілю по середній лінії в межах базової довжини:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}. \quad (3.5)$$

Параметри S і S_m дають уяву про відстані між характерними точками перетину профілю із середньою лінією.

Відносна опорна довжина профілю t_p – відношення опорної довжини профілю, що дорівнює сумі довжин відрізків, які відсікаються на заданому рівні в матеріалі профілю лінією, еквівалентною середній лінії в межах базової довжини до базової довжини:

$$t_p = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{l}. \quad (3.6)$$

Параметр t_p характеризує форму нерівностей профілю, даючи уяву про розподіл висоти нерівностей по рівнях січення профілю.

Параметри S і S_m в комплексі з висотними параметрами R_a і R_z дозволяють визначити, крім висоти нерівностей, і їх нахил, що має значення для антифрикційних характеристик поверхонь, які труться.

Графічне зображення реального профілю за даними вимірювань шорсткості називають профілограмою шорсткості.

Субмікрогеометрія характеризує вид нерівностей, які є геометричним відображенням структури поверхневих шарів металу і його недосконалень. Субмікроскопічний рельєф розглядається на ділянках поверхні від одного і до кількох мікрометрів. Параметри субмікрорельєфу кількісно визначаються за допомогою електронної фрактографії, зокрема, такі параметри: відносна площа поверхні, покритої плівками вторинних структур, площа ділянок і ювінільних ділянок, товщина вторинних структур, висота субмікронерівностей на плівках і ювінільних ділянках.

Вихідна поверхня характеризується наявністю розвиненого субрельєфу, утвореного в процесі фінішної технологічної обробки шліфування.

При зношуванні, в режимі структурно-енергетичної пристосованості поверхні тертя, покриття плівками вторинних структур мають слабо виражений субмікрорельєф.

Субрельєф поверхонь тертя, покритих вторинними структурами її типу, зумовлений в основному наявністю вигладжених ділянок, покритих плівками і ділянок зі зруйнованою плівкою. Субмікросорсткість вигладжених ділянок незначна.

В міру припрацювання відбувається зростання значення субмікрорельєфу, при цьому роль вихідного мікрорельєфу зменшується.

Різка різниця в масштабі величин шорсткостей, які утворюються при структурно-енергетичній пристосованості, на відміну від шорсткостей при технологічній обробці і процесах пошкодження виявляється за допомогою аналізу топографії поверхні.

3.3. Геометрія поверхні як функція процесу механічної обробки деталей машин

Виникнення макрогеометричних відхилень відбувається в основному через неточності металорізального верстата, на якому проходить обробка, відхилень при встановленні заготовок, силових і температурних деформацій системи верстат–пристрій–деталь–інструмент (ВПД) і зношування інструменту в процесі обробки деталі.

Хвилястість поверхні утворюється в результаті нерівномірності подачі при точінні й шліфуванні, неплоскостності направляючих і вимушених коливань системи верстат–пристрій–інструмент–деталь, що виникають через нерівномірність сили різання, наявність неврівноважених мас і т.д. Серед інших причин копіювання хвилястості різального інструменту, спотворення форми шліфувального круга і нерівномірності зношування його, а також похибки при русі інструменту або виробу.

Утворення мікронерівностей поверхні (шорсткості) зумовлене взаємодією різального інструменту з заготовкою, що обробляється, процесом зняття стружки. На величину мікронерівностей при обробці різальним інструментом впливають такі фактори: режими різання – подача і швидкість; пружна і пластична деформації матеріалів; геометрична форма різального інструменту; жорсткість системи верстат–пристрій–інструмент–деталь і пов'язані з нею вібрації.

Але шорсткість обробленої поверхні зумовлена не тільки геометрією процесу різання, але й пластичними деформаціями матеріалу при цьому процесі, і вібрацією інструменту. Для ілюстрації викладеного розглянемо як приклад точіння пластичного матеріалу (сталь 45) з точки зору якості поверхні, яка при цьому формується.

При швидкості різання 1...2 м/хв вуглецевих конструкційних сталей утворюється стружка зколювання (елементна стружка). Вона легко відділяється при малому тепловиділенні і без суттєвої пластичної деформації поверхні, що обробляється. Мікронерівності незначні, а форма їх впадин близька до форми вершин різання. При збільшенні швидкості різання до 20...30 м/хв змінюється характер утворення стружки і шорсткість поверхні зростає, що супроводжується підвищенням температури в зоні різання і значним тиском (кілька тисяч гігаскалей), який викликає пластичну текучість як у металі, що відокремлюється, так і в заготовці вище і нижче лінії різання (рис. 3.4).

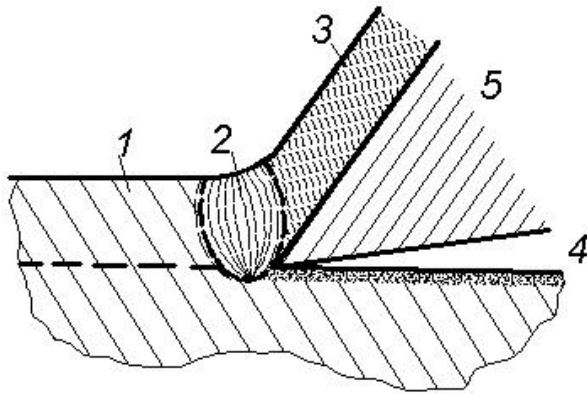


Рисунок 3.4. Утворення деформованого шару при різанні пластичного металу: 1 – основна структура металу; 2 – зона пластичної деформації; 3 – стружка; 4 – пластично деформований поверхневий шар; 5 – інструмент

Вершина наросту, виступаючи спереду леза інструменту, ріже метал, залишаючи глибокі борозни (рівчаки) на оброблюваній поверхні, а в борознах сліди досить нерівної кромки (рис. 3.5).

Час від часу вершина наросту обламується і відноситься частково стружкою, а частково втискується в оброблену поверхню, збільшуючи її шорсткість. Процес утворення наросту повторюється. Наріст має найбільшу висоту і стійкість при температурі, близькій до 200°C. У цій області конструкційні сталі мають найвищу границю міцності. Збільшення швидкості різання вище 20 м/хв призводить до збільшення теплоти, що виділяється в процесі стружкоутворення і до підвищення температури наросту. Міцність наросту зменшується, і він руйнується при меншій висоті. При швидкості різання більше 80 м/хв наріст не утворюється.

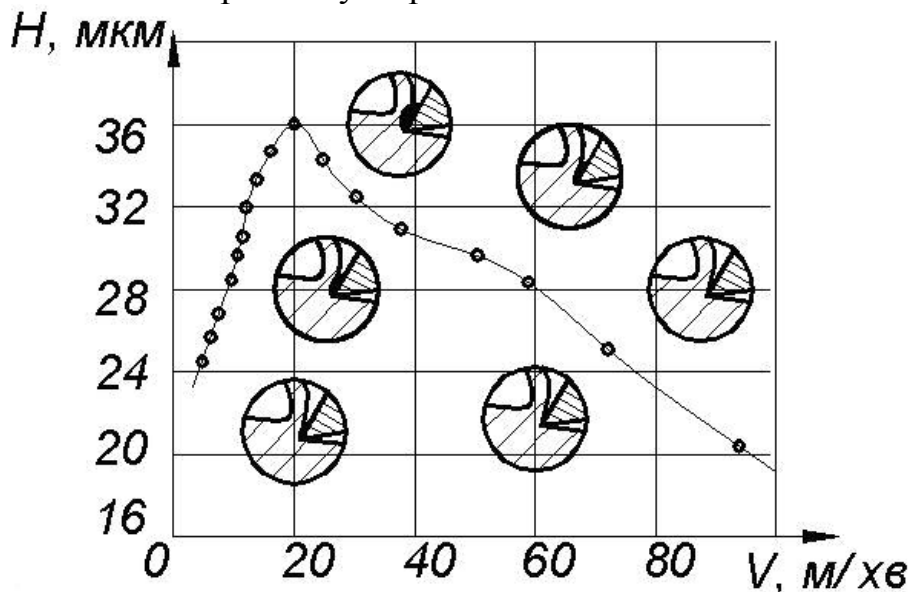


Рисунок 3.5. Висота нерівностей залежно від швидкості різання сталі 45

Відсутність наросту при різанні не означає, однак, що дійсний профіль обробленої поверхні, навіть за відсутності вібрацій, буде співпадати з теоретичним. Пластичні деформації матеріалу в зоні різання викликають додаткове збільшення висоти нерівностей. Окрім того, переміщення задньої грані інструмента по свіжоутвореній поверхні, яка ще не встигла покритися шаром окислів, супроводжується дрібними задирками, що відіграє суттєву роль в утворенні додаткових нерівностей.

Від вихідної шорсткості, яку ми отримуємо в результаті технологічної обробки деталі, значною мірою залежить шорсткість поверхні, яка утворюється під час тертя в результаті експлуатації цієї деталі.

Орієнтовні значення шорсткості поверхні, яку можна отримати в результаті того чи іншого виду механічної обробки матеріалу деталей, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Мікрогеометрія поверхні після різних видів механічної обробки

Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм	Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм
Точіння: обдирочне середнє чистове тонке	80-5 80-0,63 10-0,32 2,5-0,16	Шліфування кругами: чорнове чистове тонке	10-0,04 10-0,04 10-0,04
Розточування: обдирочне чистове тонке	80-0,63 80-0,63 2,5-0,08	Шліфування на шайбах: чорнове чистове тонке	— 5-1,25 —
Циліндричне фрезерування: обдирочне чистове	80-0,32 40-0,32	Шліфування абразивним склом: грубе чистове тонке	2,5-0,63 0,63-0,16 0,2-0,08
Торцеве фрезерування: обдирочне чистове викінчувальне швидкісне	80-1,25 40-1,25 80-0,32 2,5-0,08	Зубошліфування, хонінгування: грубе (попереднє) тонке (завершальне)	0,63-0,16 1,25-0,02 1,25-0,02
Стругання: чорнове чистове викінчувальне Свердління і зенкерування:	80-10 10-0,63 1,25-0,16 20-1,25	Мікрохонінгування, притирка: чистова тонка Полірування: чистове тонке "доведення"	0,32-0,04 0,08-0,02 1,25-0,025 1,25-0,025 1,25-0,025

Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм	Вид механічної обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм
Шевінгування: зубчатих коліс	0,63-0,16	Суперфінішування: чистове тонке	0,63-0,025 0,32-0,025
Зубодовбання: чорнове чистове	5-0,63 2,5-0,63	Обкатування роликками: Нарізання різьби різцем:	0,32-0,08 2,5-0,32
Шабрування різьби різцем: попереднє чистове тонке слюсарне опилення	1,0-1,25 2,5-0,16 0,32-0,08 20-0,63	ПРИМІТКА: Параметри шорсткості (один або кілька) вибирають за ГОСТом 2789-73	

3.4. Будова поверхневих шарів

В процесі технологічної обробки в поверхневих шарах деталей машин виникає дуже інтенсивна пластична деформація металу, локальні об'єми металу перебувають під впливом високих температур, фізико-хімічної дії робочих середовищ, змащувально-охолоджувальних рідин, кисню повітря.

При оцінці якості деформованої обробленої поверхні деталі розглядають дві зони: контактну (поверхневу) і підповерхневу (приповерхневу). Контактна зона безпосередньо прилягає до поверхні тертя і має глибину порядку кількох десятків або сотень тисячних мікрометрів. Ця зона характеризується специфічними механізмами пластичної деформації і орієнтованою ультрадисперсною будовою, яка зумовлює аномалію процесів адсорбції, дифузії, хімічних реакцій і руйнування. За цими прикметами контактну зону розглядають як тонкоплівковий об'єкт.

Критерієм тонкоплівкового стану служить критична товщина, нижче якої виникають аномалії властивостей, що розглядаються (механічних, хімічних, теплових, електричних, напівпровідникових, ультразвукових і т.д.), в порівнянні з "масивним" етапом. Специфіка напруженого стану і структури контактної зони є головним фактором, який зумовлює механізми структурно-енергетичної пристосовності матеріалів при терті.

Підповерхневі (приповерхневі) шари розташовані нижче контактної зони. Підповерхнева деформація може супроводжувати процеси нормального тертя, якщо деталі вузла тертя виготовлені з пластичних матеріалів, а напруження в спряженнях перевищує мікроскопічні границі текучості. Позитивний її вплив проявляється лише в деяких випадках, наприклад, у процесі припрацювання, коли за рахунок зношування поверхневих шарів дещо компенсуються відхилення від заданої макро- і мікрогеометрії, що дозволяє покращити прилягання спряжених деталей пари тертя. В умовах встановленого процесу

тертя вплив підповерхневої деформації різко відрізняється, бо вона є джерелом недопустимих процесів пошкодження робочих поверхонь деталей. Розвиток деформаційних процесів у підповерхневих шарах є найнебезпечнішим для деталей, виготовлених з матеріалів з низькою температурною рекристалізацією і, внаслідок цього, не схильних до зміцнення при деформації.

Структурні зміни на поверхнях контактування в підповерхневих шарах і в поверхневих зонах впливу оцінюють методами оптичної мікроскопії і зворотного рентгенівського знімання за методом Лауе.

Глибина поверхневого (контактного або граничного) шару і якість поверхні залежать від основного матеріалу, виду обробки, основних параметрів інструменту, режимів обробки і виду змащувально-охолоджувальної рідини.

Властивості поверхневих і при поверхневих шарів істотно відрізняються від об'ємних властивостей матеріалу. Відмінність поверхневих від і при поверхневих шарів ідеально твердого тіла від шарів, розташованих в основному об'ємі, зумовлено двома причинами: 1) несиметричністю сил, що діють на частинки, розміщені в при поверхневих; 2) некомпенсованістю зв'язків цих частинок.

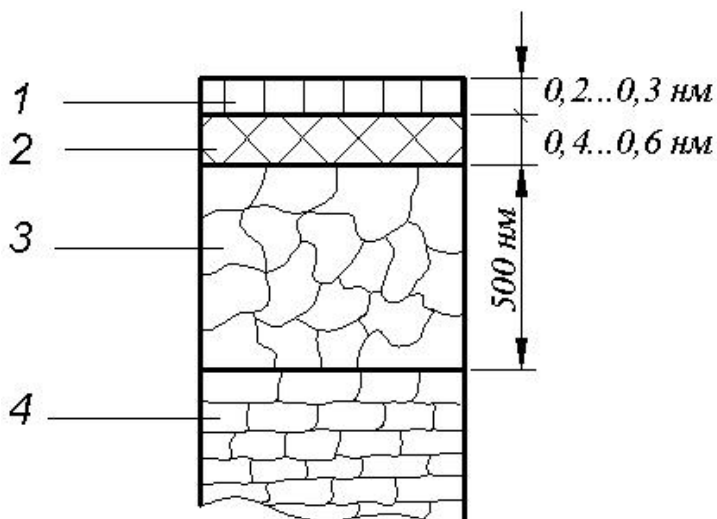


Рисунок 3.6. Структура поверхневого шару шліфованої деталі з вуглецевої сталі

Поверхневий шар неоднорідний за будовою (рис. 3.6). Він складається з адсорбованої плівки газів, вологи і змащувально-охолоджувальної рідини, яку можна усунути лише нагріванням деталі у вакуумі. Підповерхнева зона складається з кількох шарів.

Шар 2 сильно деформований, метал подрібнений, з викривленою кристалічною ґраткою кристалів. У ньому знаходяться оксиди і нітриди, пустоти, надриви і тріщини.

Шар 3 складається з зерен сильно деформованих під дією тиску різального інструменту, в ньому містяться структурно вільний цементит, що утворюється під дією високих температур. Шар 4 – метал з вихідною структурою.

В умовах структурно-енергетичної пристосовності поверхневі шари характеризуються іншою структурою, ніж основний матеріал виробу. Перехід від вихідного стану поверхні до робочого завершується утворенням вторинних структур.

Вторинні структури першого типу мають ультрадисперсну структуру пересичених твердих розчинів окислювачів у металах і різко відрізняються від структури, складу і властивостей глибинних об'ємів металу.

Вторинні структури другого типу мають ультрадисперсну будову і являють собою хімічне з'єднання окислювачів з металами нестехеометричного складу.

Вторинні структури при граничному терті оцінюються за інтенсивністю зношування, величинами сил тертя, трибо-електрорушійної сили, що виникають при терті, вентельному ефекті й т. д.

У вторинних структурах, при їх відділенні від поверхонь тертя, проходять процеси розпаду ультрадисперсної структури. Тому склад продуктів зношування не завжди відображає дійсний склад плівок вторинних структур, які утворилися на поверхнях тертя.

3.5. Напруження в поверхневих шарах

Важливою характеристикою стану поверхневих шарів деталей машин є їх напружений стан, який є наслідком досить високих пластичних деформацій. Деформацією називається зміна розмірів і форми тіла під дією зовнішніх зусиль. Деформації поділяються на пружні та пластичні. Пружні деформації після закінчення дії прикладених сил зникають. Пластичні деформації залишаються після припинення дії прикладених сил. В основу пластичних деформацій залишаються після припинення дії прикладених сил. В основу пластичних деформацій покладено незворотні переміщення атомів металів від вихідних положень рівноваги.

Залишковими напруженнями називають напруження, що існують в тілі при відсутності зовнішньої силової дії на нього.

Залишкові напруження виникають в результаті, як технологічної обробки деталей машин, так і в процесі їх експлуатації: при зміні об'єму металу, внаслідок фазових і структурних перетворень у тонких поверхневих шарах, або в результаті теплових впливів, що спричиняють залишкову деформацію металу в локальних ділянках поверхневих шарів (рис. 3.7, табл. 3.2). Залишкові напруження утворюють рівноважну систему. Залежно від об'єму, який охоплюється цією системою, розрізняють залишкові напруження трьох родів.

Напруження першого роду – макронапруження, яке охоплює області співрозмірні з розмірами деталей, які мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі.

Напруження другого роду – мікронапруження, які розповсюджуються на окремі кристалічні зерна металу або на групу зерен.

Напруження третього роду – субмікроскопічні, які відносяться до спотворення атомної решітки кристала; орієнтація їх пов'язана зі структурою атомної ґрадки.

Напруження другого і третього роду неорієнтовані відносно осей деталі. Залишкові напруження визначаються механічними, рентгенівськими і електрофізичними методами. Для оптично прозорих матеріалів чи покриттів можна застосувати поляризаційно-оптичні методи фотопружності і фотопластичності.

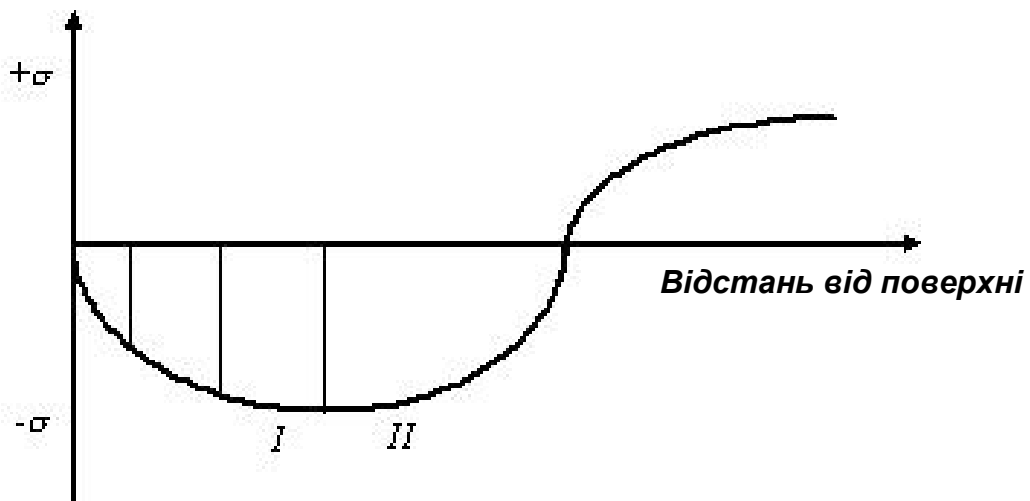


Рисунок 3.7. Зміна залишкових і робочих напружень у поверхневих шарах при зовнішньому терті: I – у процесі роботи; II – після зняття навантаження

Пластична деформація викликає зменшення щільності металу або збільшення його питомого об'єму. Пластично деформований при різанні шар не може вільно збільшуватися в об'ємі (цьому перешкоджає недеформований метал виробу), тому в зовнішньому шарі проявляються напруження стискування, а в решті об'єму – напруження розтягу.

У вузлах тертя поверхневий шар у результаті нагрівання розширюється і створюються тимчасові стискуючі напруження, які за певної температури викликають у поверхневих шарах пластичний стиск металу (рис. 3.8).

При терті металів і сплавів з метастабільною структурою виникнення напруження в поверхневих шарах може бути пов'язане не тільки з напруженнями теплового походження, але й з об'ємними (структурними) напруженнями, зумовленими фазовими перетвореннями.

Залежно від температури метал може бути в пружному і пластичному стані. В стані повзучості металу сили пружності не проявляються і деформація протікає без прагнення матеріалу до відновлення форми. За температуру t_p переходу з пружного стану в пластичний можна прийняти 450°C для вуглецевих сталей і 550°C – для легованих.

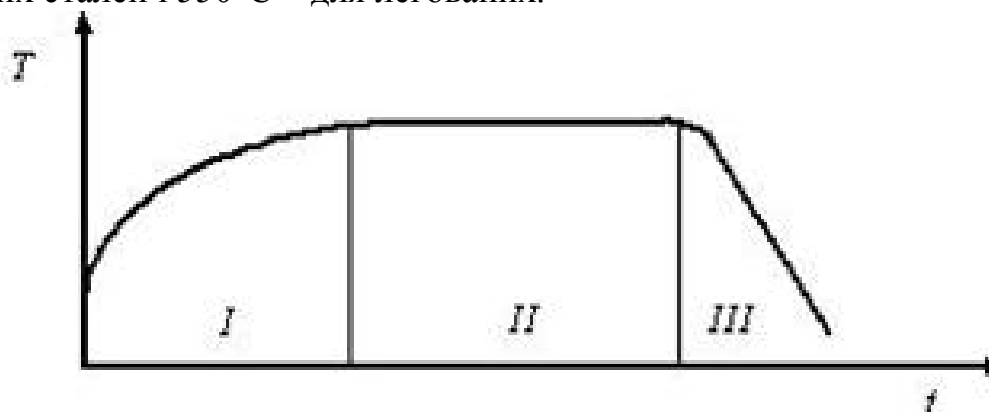


Рисунок 3.8. Зміна температури поверхневих шарів при зовнішньому терті: I – на початку роботи; II – при встановленому режимі; III – після зняття навантаження

Середня температура поверхневого шару сталі при шліфуванні складає 300...400°C, біля самої поверхні контакту – 800...850°C. Температури того ж порядку розвиваються при швидкісному точінні.

При обробці металу в його зовнішньому шарі під впливом пластичної деформації за відсутності повзучості розвиваються залишкові напруження стиску, а тепловий ефект від різання призводить до виникнення розтягуючих напружень. Так як обидва фактори діють сумісно, то знак залишкового навантаження в зовнішньому шарі залежить від того, який фактор є переважаючим. Зрозуміло, що коли температура на поверхні, яка обробляється, менша t_p , то температурні напруження є тимчасовими, після вирівнювання температури вони зникають.

Таблиця 3.2

Залишкові напруження в поверхневому шарі при механічній, термічній і термохімічній обробці деталей машин

Вид обробки	Оброблювальний матеріал	Залишкове напруження	Знак залиш. напруж.	Глибина розповсюд. залишков. напружень
1	2	3	4	5
Гартування	Вуглецева сталь	400-750	–	–
Обкатування поверхні роликми	Сталь	700-800	–	–
Азотування	Сталь Е 275	750-840	–	–
Азотування	Сталь 38ХМЮП	1200-1300	–	–
Хромування		400	–	–
Нікелювання		450	/–/	–
Покриття міддю		200	/–/	–
Кругле шліфування	Сталь 20	понад 180	/–/	0,25
Плоске шліфування	Маловуглец. сталь	350	/–/	0,35
–//–	Нержавіюча сталь	400	/–/	0,35
–//–	Сталь 45	160-180	/–/	–
Точіння	Сталь 20	880	–	–
Торцеве фрезерування	Сталь	1400-1500	–	–
Швидкісне різання з великими від’ємними кутами	Сталь 18ХНМА	900-1000	/+/	–

Вид обробки	Оброблювальний матеріал	Залишкове напруження	Знак залиш. напруж.	Глибина розповсюд. залишков. напружень
Торцеве фрезерування при швидкісному різанні 210 м/хв	Сталь 45	1000-1100	/-/	–
-//- при 610 м/хв	Сталь 45	500-600	/+/-	–
Зовнішнє кругове шліфування.	Сталь	400-1000	–	0,25-0,03
Точіння	Ст.загартована	300-400	/+/-	–
-//-	Сталь 40	400-600	/-/	0,006-0,15
Шліфування	Технічне залізо	400-1000	/+/-	0,005-0,08
-//-	Відпалена сталь	600-800	–	–
Точіння затупленим різцем	Сталь	1000	–	–
Швидкісне точіння	Сталь	–	–	–
Швидкісне точіння з переднім кінцем 30°	–	–	–	0,65
Точіння і фрезерування зі швидкісним різанням від 11-16 м/с до 210 м/с	–	–	/+/-	–
Торцеве фрезерування зі швидкісним різанням 490-610 м/с	–	–	/+/-	–

ПРИМІТКА: + – стискаючі напруження; – – розтягуючі напруження.

Пластична деформація металів зумовлює зміну мікроструктури. Безладно розташовані у вихідній структурі металу кристалічні зерна при пластичній деформації набувають однорідної орієнтації (температури). Більш глибокі зміни можливі при обробці металів методами зміцнюючої технології (наприклад, гартуванням). У результаті високого поверхневого нагріву, а також швидкого охолодження можливі фазові перетворення і структурні зміни.

3.6. Властивості поверхонь і поверхневих шарів у результаті технологічної обробки. Наклеп

При технологічній обробці поверхневі шари металу, що обробляються, різко змінюють свої властивості. У випадку холодної пластичної деформації металу підвищується його твердість. Це явище називають зміцненням металу, або наклепом. Оцінювання вихідних властивостей поверхневих шарів проводиться за допомогою вимірювання мікротвердості (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Види обробок і властивості поверхневих шарів (різання)

Вид обробки	Ступінь наклепу, поверхні Нм ·100% серцевина, Нм		Глибина наклепу, мкм	
	Середня	Найбільша	Середня	Найбільша
Точіння звичайне і швидкісне	120-150	200	30-50	200
Тонке точіння	140-180	220	20-60	-
Фрезерування торцеве	140-160	200	40-100	200
Фрезерування циліндричне	120-140	180	40-80	110
Свердління і зенкерування	160-170	-	180-200	250
Розгорткування	-	2	-	260
Протягування	150-200	-	20-75	-
Зубофрезерування і зубодовбання	160-200	-	120-150	-
Шевінгування зуба	-	-	до 100	-
Шліфування кругле: не гартована вуглецева сталь	140-160	200	30-60	-
маловуглецева сталь	125-130	-	20-40	-
гартована сталь	125-130	-	20-40	-
шліфування плоске притирка пастами	150	-	16-35	-
ГОІ	112-117	-	16-35	3-7

Застосування спеціальних методів обробки поверхонь деталей дозволяє змінювати їх фізико-хімічні і механічні властивості в потрібному напрямку (табл. 3.4).

При зміцненні поверхневих шарів деталей машин механічним наклепом зміна їх властивостей оцінюється ступенем пластичної деформації.

Таблиця 3.4

Значення твердості поверхневих шарів при різних технологічних методах зміцнення сталі

Методи зміцнення	Твердість Н
Поверхневий наклеп	300-390
Термічна обробка: гартування з відпуском	650-700
високочастотне гартування	740-760
гартування за допомогою опромінювання електронами	740-760
Хіміко-термічна обробка: цементування	570-780
азотування	1100-1200
термодифузійне хромування	1500-1600
борування	2200
ванадіювання	1800
ніобіювання	2000
Електролітичне покриття: хромування	900-1200
хромування і карбідизація	до 1800
нікелювання	600-1100
хімічне нікелювання	900-950
покриття марганцем	980-1100
фрикційно-дифузійне	1100-1300
електроіскрове	650

При хіміко-термічній обробці визначальний вплив на властивості поверхневих шарів чинить режим нагрівання й охолодження, а також дія спеціальних активних середовищ.

У випадку холодної пластичної деформації металу підвищується його твердість і границя міцності при одночасному зниженні відносного видовження і відносного поперечного звуження при розтягу.

Зміцнення поверхневого шару при обробці можна оцінити за зміною мікротвердості порівняно з вихідною. Мікротвердість падає в міру віддалення від поверхні деталі, причому, більш різко по товщині шару з роздрібненою структурою. Міцні й крихкі метали менш схильні до зміцнення, ніж маломіцні й пластичні. До того ж, температура при різанні високоміцних металів значно вища і сильніше відображається на факторі зменшення міцності. Наклеп металу під виступами нерівностей, як правило, більший, ніж під упадинами. Поверхневий шар залежно від вказаних вище обставин при точінні має товщину 0,25...2 мм, при шліфуванні – 12...75 мкм, при тонкому шліфуванні – 2...25 мкм, при поліруванні – 0,2 мкм.

Основними факторами, які викликають зміни поверхневих шарів деталей машин при експлуатації є пластичні деформації, які часто повторюються, температура, дії робочих газових і рідких середовищ зони контакту.

Оптимальна технологічна й експлуатаційна якості поверхні отримуються при виконанні таких умов:

Оптимальна технологічна якість поверхні:

– епюри напружень повинні забезпечити утворення нових поверхонь при максимальному руйнуванні й рівномірному зміцненні поверхневого шару;

– умови середовища повинні забезпечити зменшення поверхневої енергії, полегшення виходу дислокацій на поверхню, пластифікування й локалізацію деформацій у тонких поверхневих шарах;

– структурний стан поверхневого шару після обробки повинен характеризуватися однорідністю при мінімальній густині недоліків внутрішньої будови або їх нерівномірному розподілу.

Оптимальна експлуатаційна якість поверхні тертя:

– структурний стан повинен забезпечити утворення однорідного шару ультрадисперсної будови мінімальної товщини;

– поверхня повинна бути достатньо активована для протікання структурного пристосування, стійкість якого при терті зумовлюється динамічною рівновагою процесів утворення і руйнування вторинних структур, а також утворення граничного шару змазки;

– епюри напружень повинні відповідати максимально можливій деконцентрації зовнішнього навантаження поверхні металу, яка забезпечує рівномірність утворення текстур і руйнування плівок окислів.

Отримання оптимального експлуатаційного рельєфу і формування робочого стану поверхневого шару в цілому пов'язані з вихідним технологічним рельєфом і станом поверхневого шару.

3.7. Пластична деформація поверхневого шару

Невідповідність між реальною міцністю кристалу і теоретичною, розрахованою на основі оцінювання сил взаємодії між атомами кристалічної ґратки, давно встановлена. Ця невідповідність є наслідком наявності в реальних кристалах дефектів. Розрізняють точкові, лінійні, поверхневі і тривимірні дефекти кристалів.

Точкові дефекти – малі недосконалості в усіх напрямках – виникають внаслідок наявності в кристалі атомів домішок (рис. 3.9а) або утворення вакансій (рис. 3.9б), тобто порожніх місць у вузлах кристалічної решітки, не зайнятих атомами. Лінійними є недосконалості, малі у двох вимірах, відносно поширені в третьому напрямку. Поверхневі недосконалості є малими лише в одному напрямку і значними в двох інших вимірах (границі зерен, міжфазні границі, поверхні кристала). Тривимірні недосконалості – об'ємні пустоти, включення другої фази і т.д.

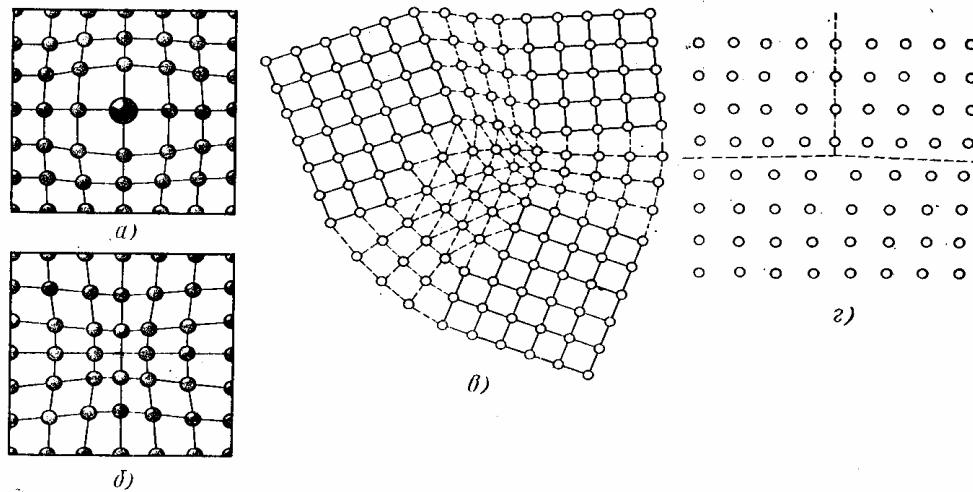


Рисунок 3.9. Дефекти кристалічної ґратки

Кристали металів зазвичай складаються з великої кількості областей розміром 1 мкм, розміщених під кутом десятої долі градуса.

Ці області з правильним розміщенням атомів називають блоками.

На границі між блоками упаковка атомів викривлена (рис.3.9в). До лінійних недосконалостей відносять дислокації (вклинювання) зайвих або недобудованих кристалічних площин (рис. 3.9г).

Ці недосконалості більшою мірою визначають механічні властивості кристала.

При теоретичних розрахунках міцності кристалів звичайно припускають, що всі атоми розміщені у відповідності з кристалічною структурою. При такій будові пластична деформація повинна бути розподілена по всьому об'єму кристалу, бо всі ділянки кристала однакові. В результаті можна було б припустити наявність одночасного ковзання паралельних площин (подібно зсуву карт у колоді). Всі атоми брали б участь у пластичній деформації, одночасно чинили б великий опір деформації.

Однак у реальних кристалах ковзання проходить по кристалографічних площинах, і пластична деформація зароджується на невеликих ділянках, поступово поширюючись по всій площині. В будь-який момент часу в ковзанні бере участь невелика кількість атомів кристалічної ґратки і, в результаті, ефективність використання сил міжатомних зв'язків виявляється дуже малою. На рис. 3.10 зображено зсув реального кристала. Перед початком ковзання кристал має правильну форму ґратки (рис. 3.10а).

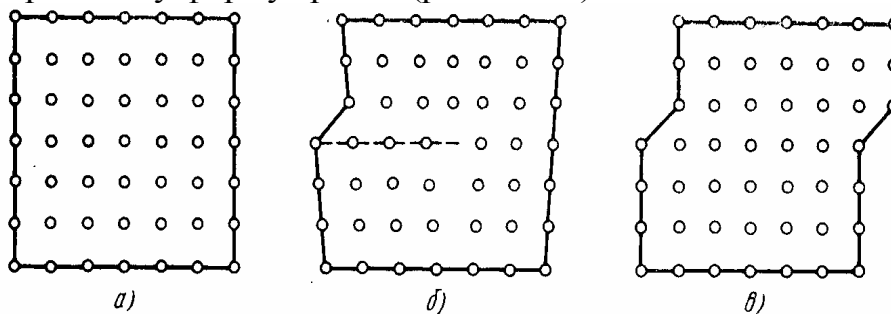


Рисунок 3.10. Схема пластичної деформації по механізму дислокації

Під дією напруги, прикладеної до однієї зі сторін кристала, утворюється зсув, при цьому в кристалі на границі виникає лінійне порушення розміщення атомів, яке Тейлор назвав дислокацією (рис.3.10б). Подальше поширення зсуву можна уявити як рух дислокації через весь кристал.

При виході дислокації на другу сторону кристала правильність будови кристалічної ґратки відновлюється, але одна половина кристала виявляється зсунутою відносно до другої на одну міжатомну відстань (рис. 3.10в). Відбувається елементарний зсув у кристалі, навколо дислокації створюється поле напруг. При пластичній деформації порушується правильність кристалічної ґратки і, внаслідок цього, подальше ковзання затруднюється. Починається ковзання по іншій площині і т.д.

Пластична деформація при різанні металів зумовлює зміну мікроструктури. Невпорядковано розміщені у вихідній структурі кристала кристалічні зерна при пластичній деформації набувають однорідної орієнтації (текстури). Більш глибокі зміни можливі при обробленні металів, що підлягають гартуванню. В результаті високого поверхневого нагріву, а також швидкого охолодження, можливі фазові перетворення і структурні зміни. У процесі шліфування гартованої і відпущеної сталі утворюється шар аустенітно-мартенситної структури із повторно гартованого металу.

Мікроскопічна неоднорідність фізико-механічних властивостей характерна для будь-якого твердого тіла. В металах вона зумовлена анізотропією кристалів. Оброблена поверхня у зв'язку з особливостями її утворення відрізняється незрівнянно більшою неоднорідністю як за хімічними, так і фізико-механічними властивостями. Крім того, вона має багато мікроскопічних дефектів у вигляді тріщин і пустот. Хоча подібні дефекти структури виникають у процесі утворення всієї маси металу, кількість їх у поверхневому шарі зростає в результаті механічної і теплової дії при обробці.

Дефекти структури можуть мати й атомний характер. Атоми кристалічної ґратки металу неперервно здійснюють безладні коливання навколо положення рівноваги з тим більшою амплітудою, чим вища температура. Для деяких атомів ця амплітуда може стати настільки значною, що атоми залишають свої місця в ґратці, порушивши тим самим кристалічний порядок. При будь-якій температурі завжди наявна деяка кількість атомів, що залишили своє стійке положення в ґратці, створивши в ній порожні місця. Ці "дірки" є дефектом будови твердого тіла, послаблюючи його міцність. Утворення дефектів у структурі може бути також викликано сторонніми домішками в металі.

Система дефектів, слабких місць поверхні деталі є основою, на якій, починаючи з найменших деформацій, розвиваються мікротріщини. Внаслідок наявності на поверхні дефектних місць природно очікувати, що руйнування при терті буде відбуватися саме в цих місцях, тобто процес зношування буде носити вибірковий характер. У міру зношування поверхні слабкі місця будуть виникати знову.