

Лекція 3

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ

План

- 3.1. Поверхнева енергія. Адгезія і когезія
- 3.2. Адсорбція і хемосорбція
- 3.3. Взаємне контактування деталей
- 3.4. Поняття про технологічний і експлуатаційний рельєф робочих поверхонь деталей

3.1. Поверхнева енергія. Адгезія і когезія

Тверде тіло складається з атомів. Атоми складаються з нейтронів, протонів і електронів. Між частинками, з яких складається тверде тіло, тобто між атомами, молекулами, іонами, відбувається взаємодія, що викликають його структуру і властивості.

Для опису атомно-кристалічної будови користуються поняттям просторових або кристалічних ґраток. ***Кристалічні ґратки являють собою уявлювану просторову сітку, у вузлах якої розміщуються атоми (іони), що утворюють кристалічне тіло. Кристалічні тіла характеризуються упорядкованим розміщенням у просторі, а аморфні – хаотичним.***

Поверхневий шар металу має велику активність. Це зумовлено тим, що всередині твердого тіла кожен атом кристала оточений іншими атомами і міцно пов'язаний з ними в усіх напрямках, а в атомів, які розміщені на поверхні, із зовнішнього боку немає "сусідів" у вигляді таких же атомів. Тому в поверхневому шарі атомів твердого тіла залишаються вільні зв'язки, наявність яких створює поблизу поверхні атомне (молекулярне) притягання. Щоб при такому несиметричному полі атом кристала був у рівновазі, розміщення атомів верхнього шару повинно бути іншим, ніж всередині кристала.

В кристалі, який розташований у рідині або який оточений яким-небудь твердим тілом, поверхневі атоми повинні перебудуватися, бо атоми або молекули зовнішнього середовища будуть взаємодіяти з поверхневим шаром кристала й зменшувати енергію зв'язку поверхневих атомів. Якщо кристал є у повітрі або в іншому газі, то силами притягання молекул газу до твердого тіла нехтують.

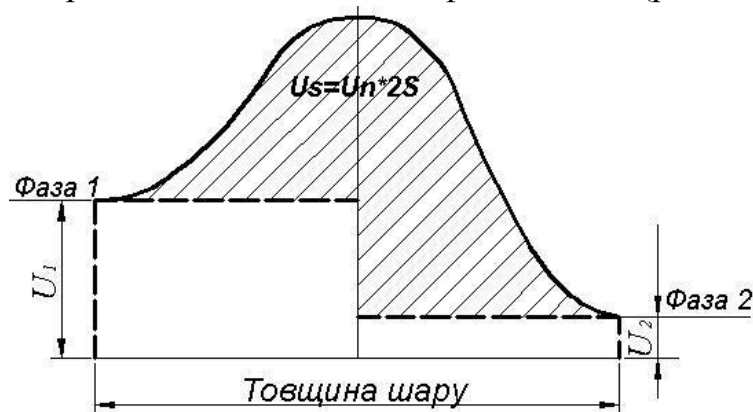
Поверхневі атоми внаслідок вільних зв'язків мають більшу енергію, ніж атоми всередині твердого тіла. ***Надлишок енергії, віднесений до одиниці поверхні, називають питомою поверхневою енергією, або просто поверхневою енергією.*** Повна енергія кристалу складається з внутрішньої і поверхневої енергії. Поверхнева енергія пропорційна поверхні розділу фаз, тому особливо зростає при диспергуванні твердих тіл. Вона багато в чому визначає властивості високодисперсних систем-колоїдів.

При дотиканні двох тіл поверхнева енергія зникає і може виділятися у вигляді теплоти або затрачатися на підпорядкування одного кристала іншому в кристалічній

гратці. Якщо поверхневу енергію даного кристала позначити U_n , а роботу руйнування на створення нової поверхні $2S \cdot U_s$, то $U_s = 2S \cdot U_n$, відповідно,

$$U_n = \frac{U_s}{2 \cdot S} \quad (3.1)$$

Зобразимо контакти S між фазами 1 і 2 (рис. 3.1).



При енергії U_1 і U_2 енергія всієї системи

$$U_1 + U_2 + U_n \cdot S.$$

Тоді

$$U = \frac{(U - (U_1 + U_2))}{S} = \frac{U_s}{S} \quad (3.2)$$

де U_s – ущільнення енергії в поверхневому шарі, яка є результатом переважної дії

Рисунок 3.1. Згущення енергії в активнішій фазі. поверхневому шарі

Відзначимо, що різні грані кристалів мають різні U_n .

Зарядом атомів (іонів, молекул) з яких складається верхній шар тіл, що контактують між собою, створюється поле сил. Це поле експоненціально зменшується зі збільшенням відстані від поверхні і на відстані 1–2 нм від поверхні практично зникає.

Поверхнєве явище, яке полягає в зчепленні поверхонь, що контактують, у результаті взаємодії цих полів сил називаються адгезією.

Адгезія і когезія викликаються одними і тими ж силами, різниця полягає в напрямках їх дії. **Якщо сили діють всередині тіла, то викликають когезію, якщо діють на поверхні – адгезію** (рис. 3.2).

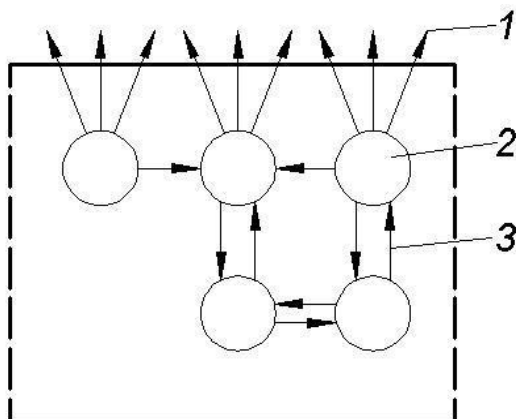


Рисунок 3.2. Сила адгезії (1) і когезії (3), елементи будови тіла (2) (атоми, молекули, іони)

Адгезійні явища мають велике значення в трибологічних дослідженнях, оскільки вони є джерелом значної частини опору тертя, особливо без мастильного середовища.

Згідно з Ф.П. Боуденом адгезія може бути ослаблена двома основними факторами: 1) наявністю оксидних або забруднених плівок; 2) впливом звільнених пружних напружень.

Сили адгезії тим більші, чим більший вплив електростатичних і електродинамічних сил у зоні контакту тіл. Це тісно пов'язано зі структурою тіл і, відповідно, їх поверхні. Чим більша реальна поверхня контакту (фактична площа контакту), тим міцніше адгезійне зчеплення.

Будь-який вплив, який призводить до відриву елементів тіла, зустрічає опір когезійних сил, а відривання або взаємне переміщення тіл, які стикаються (дотикаються) між собою, зустрічає опір адгезійних сил. При взаємному переміщенні тіл з ідеально гладкими поверхнями існував би тільки опір адгезійних сил. Взаємне переміщення реальних шорстких поверхонь контакту зустрічає не тільки адгезійний опір, але й опір нерівностей обох поверхонь, який виникає в результаті пружних і пластичних деформацій, зрізування нерівностей, дряпання і т.д. Цей вплив врівноважується силами зчеплення при декогезії матеріалу. Таким чином, тертя є наслідком дії сил адгезії і когезії.

Коли тіла, які переміщаються одне відносно одного, стикаються своїми зовнішніми поверхнями, мова йде про зовнішнє тертя. В тому випадку, коли елементи структури тіла (атоми, молекули) переміщуються одне відносно одного, виникає внутрішнє тертя. Внутрішнє тертя має місце у рідинах, газах і твердих тілах.

3.2. Адсорбція і хемосорбція

При взаємодії поверхні твердого тіла з газовим або рідинним середовищем, молекули газової або рідинної фази приклеюються до поверхні твердого тіла плівкою. Це відбувається в результаті взаємодії ненасичених силових полів твердого тіла з силовими полями молекул газу або рідини, що дотикаються до поверхні твердого тіла. Поверхня останнього покривається плівкою речовини, що міститься в навколишньому середовищі газів, парів води, парів інших рідин, а також речовин, розчинених у рідинах і дотичних до поверхні твердого тіла. ***Явище приєднання молекул до поверхні міжмолекулярними (вандерваальовими) силами називають фізичною адсорбцією, а хімічне з'єднання молекул з поверхнею – хемосорбцією.***

Найбільшу здатність до адсорбції мають поверхнево-активні речовини, тобто речовини, молекули котрих орієнтуються перпендикулярно до поверхні (наприклад, органічні кислоти, спирти і смоли). Характерною особливістю поверхнево-активних речовин є неспівпадання центрів ваги позитивних і негативних зарядів у їх молекулах навіть в ізольованому стані, тобто в їх молекулах існують немов два протилежних просторово розділених заряди. Такі молекули називають полярними, і вони притягуються і утримуються поверхнею тіла (наприклад, шаром товщиною в одну молекулу).

Адсорбований шар поверхнево-активних речовин є мономолекулярним. Штучним шляхом можна утворити багатомолекулярну плівку, в якій кожен шар буде складатися з молекул з однаковою орієнтацією. Насичений адсорбований моношар утворюється щільно розміщеними молекулами, які орієнтовані паралельно одна до одної і перпендикулярно до поверхні тіла. До металу приєднуються активні кінці молекул першого ряду, до їх хвостів можуть приєднуватися хвости другого ряду, а до їх активних кінців – кінці молекул третього ряду і т.д. (кінець молекули, що приєднується до металу, подібний до маленького магніту, який називають полярним

або активним. Іншу частину молекули складає так званий хвіст, наприклад, у спиртів – це гідрооксид OH , в інших речовин – група NH_2COCl та ін. Таким шляхом отримуються плівки товщиною у 1000 мономолекулярних шарів.

Взаємодію між молекулами в тангенціальному до поверхні напрямі називають поздовжньою когезією. Опір адсорбованої плівки протискуванню визначається силами поздовжньої когезії.

Молекули речовин, які адсорбовані на поверхні твердого тіла, мають здатність переміщуватися по поверхні з областей, де є їх надлишок, в місця, де їх недостатньо для повного покриття поверхні. Рухомість адсорбованих молекул залежить від виду адсорбції. При хімічній адсорбції (хемосорбції) полярні кінці молекул, зв'язуючись з поверхнею тіла, утворюють моношар, подібний до хімічної речовини. Рухомість молекул у результаті цього сильно обмежується.

Хемосорбція, на відміну від фізичної адсорбції, має вибірковий характер і протікає з більшою ефективністю в місцях дефектів порушення регулярності кристалічної решітки (включеннями або "дірками"). В багатьох випадках фізична і хімічна адсорбція протікають одночасно, але одна з них є переважаючою.

Сили взаємодії між молекулами поверхнево-активних речовин і металічною підкладкою різні за природою і залежать як від природи речовин, так і від металу. Існування адсорбованого шару визначається також температурою.

Адсорбція молекул призводить до зменшення поверхневої енергії. В результаті цього, під час адсорбції в навколишнє середовище виділяється деяка кількість енергії, яку називають енергією адсорбції, тобто, адсорбція – ізотермічний процес. Теплота фізичної адсорбції приблизно дорівнює конденсації адсорбата (як правило, менше 41,8 Дж/моль). Теплота хемосорбції може досягати 627 Дж/моль.

Інтенсивність процесу адсорбції оцінюється кількістю (об'ємом або масою) адсорбованої речовини. Процес адсорбції можна розглядати в часі, тобто визначається час, необхідний для адсорбції деякої кількості речовини.

Процес, зворотний адсорбції, тобто вивільнення адсорбованих молекул, називають десорбцією.

Тверде тіло, на якому адсорбуються молекули, називають адсорбентом. Речовина, адсорбована на адсорбенті – адсорбент.

Поверхнево-активне середовище впливає на процес деформації і руйнування твердих тіл, значно зменшуючи їх опір деформуванню й руйнуванню в результаті фізичної адсорбції. Цей ефект встановив П.А. Ребіндер. Він названий його іменем – ефект Ребіндера або адсорбаційний ефект зменшення міцності.

Розрізняють зовнішній і внутрішній адсорбційні ефекти. Зовнішній адсорбційний ефект відбувається в результаті адсорбції поверхнево-активних речовин на зовнішній поверхні деформованого тіла, що викликає пластифікування поверхні і зниження границі текучості. При цьому, завдяки адсорбуванню шару поверхнево-

активних речовин, зменшується поверхнева енергія твердого тіла, що призводить до полегшення виходу дислокацій. Ефект Ребіндера можна продемонструвати на прикладі протискання сталеві кульки через циліндричний отвір у металічному зразку (рис. 3.3а), де надлишковий шар металу пластично деформується, утворюючи наплив поперед кульки. При протисканні кульки без змащувального матеріалу в зону деформації залучається значно більше металу, ніж у присутності активного середовища. Сили протискання при змащуванні парафіном у три рази менші, ніж у випадку відсутності змащувального матеріалу (рис. 3.3б).

Внутрішній адсорбційний ефект викликається адсорбцією поверхнево-активних речовин на внутрішніх поверхнях розділу – зародкових мікротріщинах руйнування, що виникають у процесі деформації твердого тіла. Цей ефект полягає в адсорбції атомів поверхнево-активних речовин на поверхнях мікротріщин при деформації руйнування.

Відмінною особливістю ефекту Ребіндера є те, що він проявляється тільки при сумісній дії середовища і певного напруженого стану.

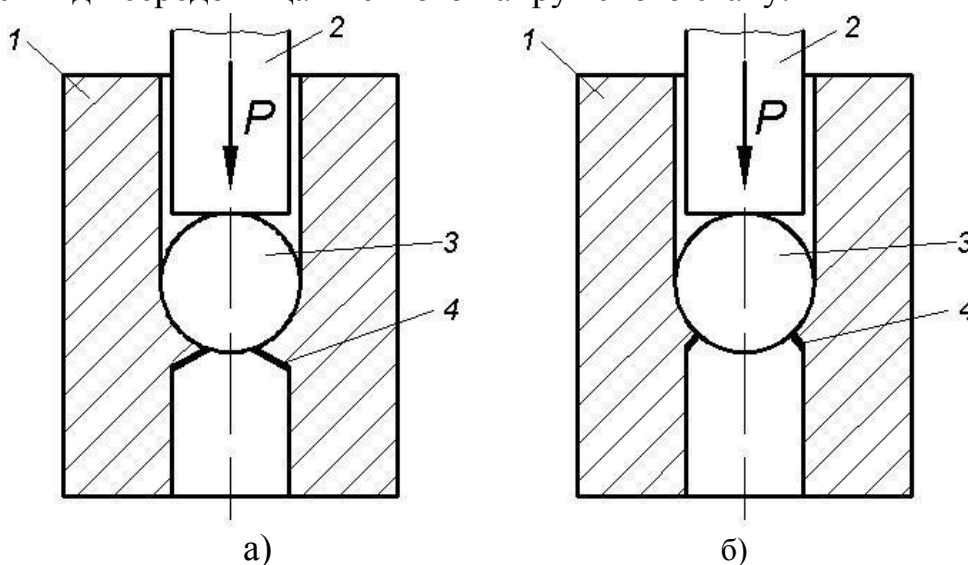


Рисунок 3.3. Наплив металу при протисканні металеві кульки без змащувального матеріалу (а) і з окисним парафіном (б): 1 – зразок, 2 – пуансон, 3 – кулька, 4 – наплив.

3.3. Взаємне контактування деталей

Поверхні твердих тіл завжди мають хвилястість і шорсткість, тому дійсний контакт при взаємному стикуванні деталей є дискретним, тобто відбувається в окремих зонах. При вивченні взаємодії поверхонь при зовнішньому терті розрізняють:

а) номінальну площу контакту (дотику) S_H – геометричне місце всіх можливих фактичних площадок контакту; вона обмежена розмірами і формою тіл, що стикуються;

б) контурну площу контакту (дотику) S_k , яка утворена деформацією локальних поверхневих об'ємів тіл; формування контурної площі зумовлене макронерівностями контактуючих поверхонь і навантаженням;

в) фактична площа контакту (дотику) S_ϕ , яка являє собою суму малих площадок фізичного контакту тіл; фактична площа контакту є функцією геометричного обрису окремих нерівностей і навантаження, яке на нього припадає.

В роботах Б.І. Костецького і його співробітників показано, що формування фактичного (істинного) контакту суттєвим чином пов'язано з субмікрорельєфом (фізичним рельєфом), розвиток якого зумовлений внутрішньою будовою твердих тіл, його дефектами,

Контурні площадки легко визначаються при перевірці якості спряжень деталей за допомогою фарби – утворюється пляма дотику. Для плоских деформаціями локальних поверхневих об'ємів металу і фізико-хімічною дією робочого середовища в зоні контакту. Схема контакту двох теоретичних поверхонь зображена на рисунку 3.4.

поверхонь, які не мають відхилень від площинності, контурна площа дорівнює номінальній.

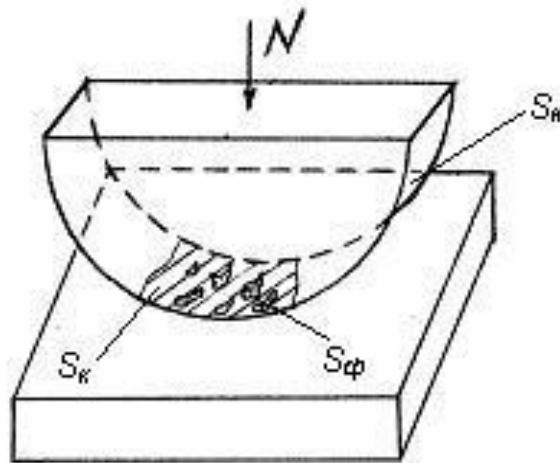


Рисунок 3.4. Три площі контакту (схема): S_n – номінальна; S_k – контурна; S_ϕ – фактична

Контурна площа контакту виникає в результаті деформаційних процесів, які зосереджені в поверхневих шарах тіл, що контактують, а тому суттєво залежить від навантаження і механічних властивостей.

Контурна площа контакту є фіктивною і вводиться як проміжна ланка для переходу від номінальної площі контакту до фактичної.

Фактична площа контакту – це сума елементарних площадок контакту, що виникають у результаті деформацій окремих нерівностей.

Площа фактичного контакту залежить від мікро- і макрогеометрії поверхонь, хвилястості, фізико-механічних властивостей поверхневого шару і від навантаження. При великих навантаженнях її зростання супроводжується збільшенням розмірів площадок дотику. При знятті навантажень залежно від їх величини зникає 30...70% площадок контакту.

При всіх умовах зовнішнього тертя номінальна площа контакту завжди більша контурної, яка, як правило, більша площі фактичного контакту, тобто $S_n > S_k > S_{\phi}$. Площа фактичного контакту навіть при дуже великих навантаженнях не перевищує 40% номінальної площі. У випадку контактування сталі по сталі при навантаженні 15 МПа, відношення площ складало 0,2 при шорсткості поверхонь $Ra = 2,5 \dots 1,25 \text{ мкм}$ і 0,35 при $Ra = 0,63 \dots 0,32 \text{ мкм}$.

Ступінь дискретності контакту, тобто співвідношення S_{ϕ}/S_n на початку роботи спряження, визначається, в основному, станом рельєфу, який утворився при викінчувальних операціях технологічної обробки поверхонь. Менший вплив здійснюють властивості матеріалів і особливості внутрішньої будови, причому, певне значення має і стан середовища в зоні тертя.

Дослідження контакту спряжених поверхонь відбувається експериментальними й аналітичними методами.

На практиці площа фактичного контакту при терті визначається за допомогою експериментальних методів. Серед найвідоміших методів площі фактичного контакту треба назвати такі.

Метод зміни електропровідності контакту.

Його використовували Р. Хольм, Ф.П. Боуден, Д. Тейбор, І.В. Крагельський та інші дослідники.

Ідея дослідів Ф.П. Боудена і Д. Тейбора полягала в тому, що стискувалися два циліндри, які перетиналися і фіксували слід контакту, що утворився. Знаючи залежність величини сліду контакту від навантаження, автори встановили, що площа контакту пропорційна силі стискання в степені $\frac{1}{2}$, що співпадало з розрахунками за формулою Треска для чистого пластичного контактування. Звідси було зроблено висновок про провідну роль пластичної деформації. Вказаний метод визначення площі фактичного контакту дуже неточний і важкий у виконанні.

Метод заснований на перенесенні речовини з однієї поверхні на іншу. Згідно з цим методом одна з поверхонь покривається фарбою, а на другій, після контактування, спостерігається відбиток. Шар фарби повинен бути дуже тонким, щоб відбиток відповідав не контурній, а фактичній площі дотику, а також не спотворювати геометрію мікровиступів тіл, що контактують, і бути меншим їх середньої висоти. Візуально виявляти відбиток такого тонкого шару майже неможливо, тому використовують фарбу, яка має люмінесцентні речовини.

Метод вугільних плівок. Запропонували Н.Б. Демкін і А.А. Ланковий. На одній із деталей розпиленням в вакуумі наноситься вугільна плівка. Після нанесення плівки зразки контактують і під навантаженням підлягають незначному мікрозсуву, завдяки чому в місцях контакту крихка вугільна

плівка руйнується. Після того, як зразки роз'єднуються, на фоні плівки чітко видно плями контакту.

Метод радіоактивних ізотопів. Розроблений в лабораторії якості поверхні Інституту машинознавства АН Росії. Одна з поверхонь, що контактують, покривається шаром радіоактивної речовини (розчин сірчаноокислого натрію, який містить радіоактивний ізотоп S^{35} , і розчин хлористого цинку, який містить ізотоп Zn^{65}). При контакті активний ізотоп переноситься на неактивну поверхню, де за допомогою авторадіографії визначається розподіл ізотопу.

Оптичні методи. Засновані на тому, що одну або обидві поверхні, що контактують, виготовляють із прозорого матеріалу. До оптичних відносять відомий метод Мехау. Шорстку поверхню притискають до призми, на яку подається паралельний пучок променів світла під певним кутом (більшим від граничного). Відбувається повне внутрішнє відбиття світла, яке порушується в точках контакту. Як наслідок, у відбитому світлі точки контакту видно у вигляді темних плям на дзеркальному фоні. Метод придатний для вимірювання площі контакту шорсткої поверхні з гладкою як в статичному стані, так і при русі.

Є.М. Швецова запропонувала оптичний метод визначення площі контакту двох прозорих зразків. Через поверхню контакту двох тіл проходить перелельний пучок променів світла. В точках контакту світло проходить без заломлення, а в інших місцях воно розсіюється. Як наслідок, у точках контакту відбувається яскраве світіння плямами на сірому фоні. Метод придатний як для рухомих зразків, так і для нерухомих.

І. Дайзон і В. Хірст запропонували оптичний метод, за яким шорстка поверхня притискається до гладкої скляної пластини, що покрита срібною плівкою. В місцях контакту пластина разом зі срібною плівкою деформується, що спостерігається через пластинку в мікроскопі. За допомогою методу фазового контакту можна виявити найменші нерівності плівки і помінити плями контакту.

3.4. Поняття про технологічний і експлуатаційний рельєф робочих поверхонь деталей

До цього моменту ми розглядали дотикання поверхонь, похибки яких зумовлені технологією обробки.

Схеми контакту поверхневих шарів після технологічної обробки і при експлуатації зображені на рис. 3.5 та 3.6.

Контактування поверхонь тіл під навантаженням, пов'язане з утворенням, унаслідок неоднорідності деформації, нового рельєфу поверхні (в першу чергу шорсткості).

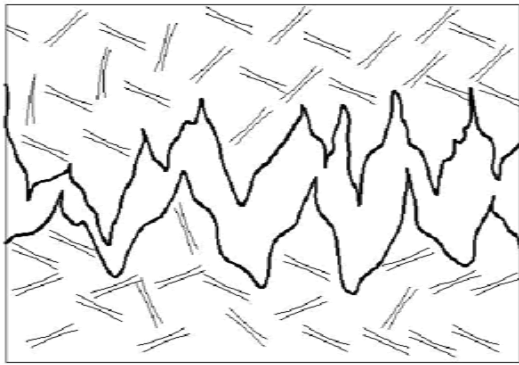


Рисунок 3.5. Схема контакту поверхонь
(технологічний рельєф)

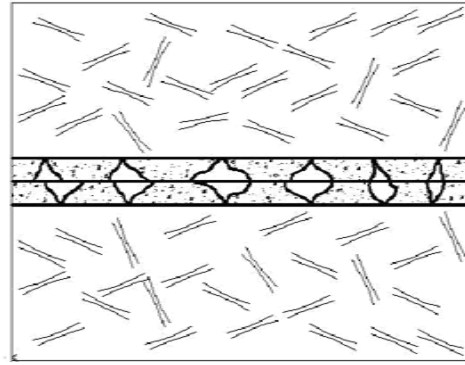


Рисунок 3.6. Схема контакту поверхонь
(робочий рельєф)

Різниця цих двох випадків контактування проявляється як в геометрії контакту, так і в його фізичній природі.

Процес припрацювання, неминучий для зовнішнього тертя, викликає трансформацію всіх основних характеристик стану поверхні. Ця трансформація є причиною різниці при контактуванні.

Процес нормального тертя характеризується сталими (встановленими) значеннями основних триботехнічних, фізико-хімічних, геометричних та інших показників системи тертя. Коефіцієнт тертя f , інтенсивність зношування I , температура T і робота тертя $A_{тер}$, в умовах паралельного тертя, мають лінійні залежності від питомого тиску P . У цьому випадку контакт здійснюється як зображено на рис. 3.6.

За патологічних умов тертя (проорювання, руйнування містків зварювання і т.д.) усі характеристики контакту – триботехнічні (f , I , $A_{тр}$, T), геометричні, фізико-хімічні різко змінюються. Різниця в значеннях характеристик істотна не тільки при співставленні нормального тертя з патологічним, але й для різних форм пошкоджуваності.

Умовами нормального тертя і зносу у відповідності зі структурно-енергетичною теорією проф. Б.І.Костецького є:

1. Відсутність руйнування основного металу.
2. Локалізація пластичної деформації й руйнування в тонких поверхневих шарах вторинних структур, які утворюються при терті.
3. Динамічна рівновага механохімічних процесів утворення і руйнування вторинних структур, яка забезпечує встановлене протікання процесу.

За цих умов на контакті спряжених поверхонь виконуються такі закономірності:

– постійність величини площі $S_{плівок}$, покритої захисними плівками,

$$\frac{S_{плівок}}{S_H} = const, \quad (4.3)$$

де S_H – номінальна площа контакту;

- процес руйнування і відновлення плівок автоматично регулюються;
- при порушенні динамічної рівноваги відбувається перехід від нормального тертя до недопустимих умов пошкоджуваності.