

# ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛІВ. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИСТРОЇВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ПЛАСТИЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет; факультет Машинобудування  
та транспорту; кафедра Галузевого машинобудування

## Анотація

Розглянуто фізичні основи та механізм зміцнення металевих деталей машин за допомогою пластичного поверхневого деформування (ППД).

Наведено огляд методів та пристроїв для ППД, здійснено порівняльний аналіз їх переваг та недоліків.

Ключові слова: пластичне поверхнєве деформування; міцність; кристалічна ґратка; дислокація; вектор Бюргерса.

## Abstract

The physical foundations and mechanism of strengthening of metal parts of machines by means of plastic surface deformation (PSD) are considered.

The review of methods and devices for PSD is given, a comparative analysis of their advantages and disadvantages is made.

Key words: plastic surface deformation; strength; crystal lattice; dislocation; Burgers vector.

## Фізичні основи деформаційного зміцнення металів

Метали – це кристали з трьохмірною періодичністю атомів. Геометрична модель кристалічної структури металів має вигляд тривимірної ґратки, в просторі якої розміщуються атоми. В залежності від характеру розміщення атомів в кристалічній ґратці структури чистих металів поділяються на ряд типів [1]. Переважна більшість металів має кубічну об'ємноцентровану, кубічну гранецентровану або гексагональну щільноукладену ґратку

Стабільність кристалічної ґратки забезпечується певним співвідношенням між силами відштовхування і притягання між атомами.

Енергію взаємодії двох атомів кристалічної решітки можна визначити за допомогою рівняння [2]:

$$U = \left( -\frac{A}{r^m} \right) + \left( \frac{B}{r^n} \right) \quad (1)$$

де  $A$  і  $B$  - константи;  $m$  і  $n$  - показники степені для сил протягування і відштовхування ( $n$  завжди більше  $m$ );  $r$  - відстань між атомами.

Мінімум потенціальної енергії пари атомів ( $U = U_0$ ) досягається для  $r = r_0$ , коли  $dU/dr = 0$  і  $Am/r_0^{m+1} = Bn/r_0^{n+1}$ .

З врахуванням цього рівняння (1) набуде вигляду рівняння сил зв'язку:

$$\frac{dU}{dr} = P = \frac{Am}{r_0^{m+1}} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{m+1} - \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n+1} - \right] \right] \quad (2)$$

де  $P$  - рівнодійна міжатомних сил.

Прикладення зовнішнього напруження до кристалічної решітки призводить до зміни відстані між атомами  $r = r_0 + \Delta r$  і, відповідно з рівняннями (1) та (2), до зміни потенціальної енергії і сили  $P$ .

Розрахунки з використанням формули (2) показують, що напруження, яке необхідно прикласти до ідеального кристала для здійснення деформації  $\Delta r / r_0$ , значно (на два – три порядки) перевищують напруження, які експериментально зафіксовані в реальних матеріалах.

Сучасні погляди на будову матеріалів пояснюють суттєву різницю між теоретичною та фізичною міцністю металів наявністю в них структурних дефектів кристалічної ґратки.

Структурні дефекти суттєво впливають на зміцнення та руйнування металів при пластичній деформації, тому без розуміння механізму впливу цих дефектів на міцність металу неможливо зрозуміти фізичну сутність деформаційного зміцнення. Дані дефекти виникають у кристалах у результаті кристалізації металу, термічної обробки, пластичної деформації тощо. За геометричними ознаками їх поділяють на 4 групи: точкові, лінійні, поверхневі (плоскі), об'ємні [3].

Точкові дефекти за своїми розмірами порівнювані з розмірами атома. У чистих кристалах можливі два типи точкових дефектів (рис. 1, а): вакансії або міжвузлові атоми.

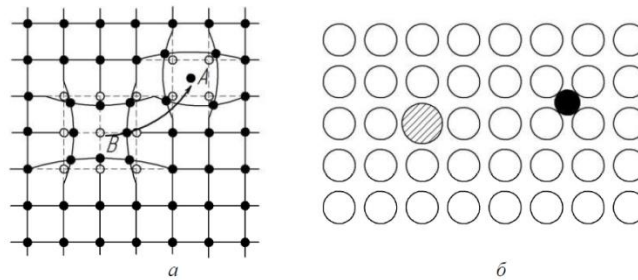


Рисунок 1 – Точкові дефекти в площині простих кубічних ґрат: а – дислокований атом А та вакансії В; б – домішкові атоми проникнення та заміщення

Вакансії утворюються в разі видалення атома з вузла ґрат, а міжвузловий атом – у випадку введення атома в міжвузловий простір.

Створення вакансій і міжвузлових атомів пов'язане з тим, що атоми в положенні рівноваги можуть під впливом привнесеної ззовні енергії виходити з цього положення, створюючи після себе у вузлі кристалічних ґрат порожнину (вакансію) та відповідно – міжвузловий атом. Більшість вакансій і міжвузлових атомів може бути збільшена різким охолодженням металу, пластичною деформацією, опромінюванням високоенергетичними променями, магнітним полем та ін. Наприклад, кількість точкових дефектів у кристалах під час пластичної деформації можна визначити за формулою

$$n / N = (10^{-5} \dots 10^{-6}) \varepsilon \quad (3)$$

де  $n$  - гранична кількість рівноважних точкових дефектів;  $N$  - загальна кількість атомів;  $\varepsilon$  - деформація.

Лінійні дефекти кристалічних ґрат мають розміри, близькі до атомних, у двох вимірах і значну протяжність у третьому. До цього виду дефектів належать дислокації, найпростішими з яких є крайові та гвинтові.

Поверхневі дислокації – це дефекти, які мають значну довжину у двох напрямках. До них належать межі між субзернами, зернами, міжфазні межі, дефекти упаковки кристалічних ґрат, скупчення дислокацій в одній площині та ін.

Об'ємні дефекти мають протяжність в усіх трьох вимірах. До них належить сукупність точкових, лінійних і поверхневих дефектів, які призводять до спотворення кристалічних ґрат за великих об'ємів кристала. Крім того, до об'ємних дефектів відносять наявність фаз, дисперсних виділень, різних краплень, а також нерівномірність розподілу напружень і деформацій у макрооб'ємах.

Наявність дефектів у кристалічних ґратах спричиняє їх спотворення. Мірилом спотворення ґрат є вектор Бюргерса (рис. 2), що характеризує енергію дислокації та сили, які діють на них.

Вектор, який необхідно вводити в досконалий кристал для замкнення контуру Бюргерса (відрізок MQ на рис. 2, б), і є вектор Бюргерса [1, 3].

Щільність дислокацій розраховують за формулою

$$\rho = L_{\Sigma} / V \quad (4)$$

де  $\rho$  - щільність дислокацій,  $см^{-2}$ ;  $L_{\Sigma}$  - сумарна довжина усіх дислокаційних ліній,  $м$  ;  
 $V$  - об'єм,  $м^3$ .

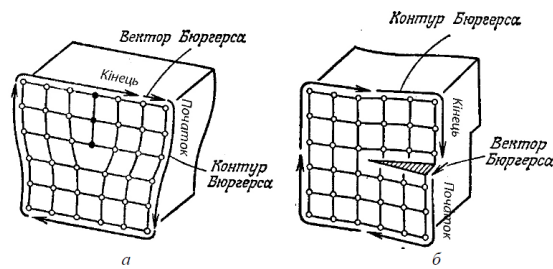


Рисунок 2 – Контур Бюргерса: а – для крайової дислокації; б – для гвинтової дислокації

У теорії дислокацій вивчають численні механізми виникнення останньої.

У полікристалічних тілах (металах) кристали (зерна) відрізняються просторовою орієнтацією. У середині зерен існують субзерна, у яких є блоки, дезорієнтовані відносно один одного на кут, менший  $10^\circ$ . Межі зерен і блоків – джерела зародження дислокацій.

Як бачимо зі схеми малокутової межі (рис. 3), ґрати блоків пружно сполучаються в усіх сферах, крім тих, у яких знаходяться дислокації. Відстань між дислокаціями на межі визначають таким чином:

$$D = b_0 / \alpha_3 \tag{5}$$

де  $b_0$  - вектор Бюргерса;  $\alpha_3$  - кут дезорієнтування зерен.

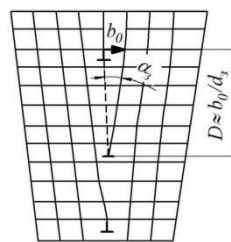


Рисунок 3 – Схема малокутової межі:  $D$  – відстань між дислокаціями;  $b_0$  – вектор Бюргерса;  $\alpha_3$  – кут дезорієнтування зерен.

Дислокації, які виникли під час кристалізації, можуть розмножуватися або зникати під час пластичної деформації, термообробки або інших видів енергетичного впливу. Одну з моделей множення дислокацій за пластичної деформації, запропоновану Франком і Рідом, подано нижче (рис. 4).

Відрізок дислокації  $AB = L$  (рис. 4, а) закріплений на кінцях. На нього діє нормальна сила  $\tau_b$ . Під дією зростаючого напруження лінійна дислокація поводить себе як пружна нитка – вигинається. З умови рівноваги напруження, що перешкоджає цьому згину, визначають за формулою

$$\tau = 0,5Gb/R, \tag{6}$$

де  $G$  - модуль зсуву;  $b$  - вектор Бюргерса;  $R$  - радіус кривизни.

Максимальне значення напруги  $\tau_{max}$  відповідає  $R = L/2$  (рис. 4, б).

Збільшення довжини відбуватиметься за напружень, менших  $\tau_{max}$

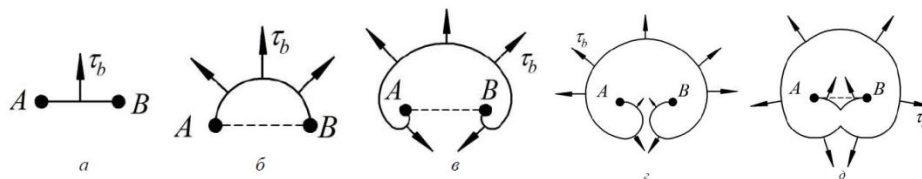


Рисунок 4 – Схема дії джерела Франка – Ріда

Подальший цикл розмноження дислокацій показано на рис. 4, в, г. Цикл завершується створенням замкненої петлі дислокації (рис. 4, д), а ділянка АВ «готується» для генерації нової петлі.

Пластична деформація та термічна обробка призводять до збільшення щільності дислокацій. Для прикладу, нижче приведені типові значення щільності дислокацій для різних станів матеріалу,  $см^{-2}$ :

- для монокристалу –  $10^2...10^4 см^{-2}$  ;
- відпаленого монокристалу –  $10^4...10^6 см^{-2}$  ;
- відпаленого полікристалу –  $10^7...10^8 см^{-2}$  ;
- металу після холодного пластичного деформування –  $10^9...10^{12} см^{-2}$  .

### Методи поверхневого пластичного деформування

Існує велика кількість методів та пристроїв для зміцнення металевих деталей машин методом ППД. Кожен із пристроїв побудований для вирішення певної технологічної задачі або ряду задач. Всі вони можуть бути класифіковані на п'ять основних груп у відповідності із схемою деформування поверхні металу в зоні контакту з інструментом. Класифікація різних методів ППД наведена в таблиці 1 [5].

Таблиця 1 – Методи ППД

Група	Метод	Способи зміцнення
I	Накатування	1. Накатування роликком. 2. Накатування кулькою. 3. Вібраційне накатування з поперечною вібрацією. 4. Вібраційне накатування з поздовжньою вібрацією
II	Зміцнення зв'язаним ударним інструментом	1. Зміцнювальна чеканка з гідроприводом. 2. Зміцнювальна чеканка з пневмоприводом. 3. Зміцнювальна чеканка з механічним приводом. 4. Відцентрова обробка роликами. 5. Відцентрова обробка кульками.
III	Вигладжування	1. Вигладжування сферичним наконечником. 2. Вигладжування конічним наконечником.
IV	Дорнування	1. Дорнування проштовхуванням дорну. 2. Дорнування протягуванням дорну. 3. Вібраційна ударна обробка.
V	Динамічне зміцнення	1. Вібраційна ударно-імпульсна обробка 2. Вібраційно-відцентрова зміцнювальна обробка. 3. Гідрогалтування дробом. 4. Гравітаційна обробка дробом. 5. Гідродробоструменева ежекторна обробка. 6. Гідродробометна обробка. 7. Пневмогідродробоструменева обробка. 8. Пневмодинамічна обробка. 9. Дробоструменева обробка

В залежності від розмірів, конфігурації, матеріалу деталі, призначення обробки, серійності виробництва та інших факторів в кожному конкретному випадку вибирають найбільш оптимальний метод ППД.

До першої групи відносяться різноманітні методи накатування (обкатування і розкачування), під якими розуміють поверхневе пластичне деформування при коченні інструмента (кульки або ролика) по поверхні матеріалу, що деформується. Пластичне деформування при накатуванні здійснюється в умовах тертя кочення інструмента по поверхні деталі, контакт інструмента і деталі – точковий або по лінії. Даний метод найчастіше використовується для деталей правильної геометричної форми твердістю 45...50 HRC [6].

До другої групи методів ППД належать методи зміцнення зв'язаним ударним інструментом. Найбільш яскравими представниками даної групи є зміцнювальна чеканка, відцентрова обробка і обробка механічними щітками. Загальною ознакою даних методів ППД є наявність ударної взаємодії зв'язаного інструмента (наконечник при чеканці) або інструментів (кульки або ролики при відцентровій обробці і щітки при зміцненні механічними щітками) з поверхнею деталі, що обробляється. Наявність ударної взаємодії при цьому забезпечує більш високу ступінь зміцнення і рівень залишкових напружень стиску в поверхневому шарі матеріалу деталей, що обробляються, ніж при зміцненні методами, які належать до першої групи.

До третьої групи методів ППД відносяться методи зміцнювальної обробки вигладжуванням, сутність якого полягає в пластичному деформуванні поверхні, яка обробляється, ковзаючим по ній інструментом. При цьому нерівності поверхні, які залишились від попередньої обробки, згладжуються частково або повністю,

підвищується твердість поверхневого шару, в ньому утворюються залишкові напруження стиску. Вигладжування застосовують для обробки деталей з твердістю >50HRC [6].

Четверта група методів ППД – дорнування, яке застосовується для обробки отворів, сутність якого в тому, що інструмент – дорн, робочий діаметральний розмір якого декілька більший розміру отвору, що обробляється, проштовхується або протягується крізь нього. Використовується, в основному, для зміцнення різних отворів проушин на деталях.

Найбільш ефективним і перспективним, із точки зору подальшого розвитку, є методи ППД, які належать до п'ятої групи, так звані методи динамічного зміцнення, засновані на динамічній дії (ударі) інструмента або інструментів на оброблювану поверхню деталі. Основними представниками цієї групи методів ППД є дробоструменева (гідродробоструменева, пневмодинамічне зміцнення, гідрогалтування) і вібраційна зміцнюючі обробки. Деталі більш складної конфігурації (пружини, ресори, шатуни, лопатки), які неможливо обробити накатуванням, чи алмазним вигладжуванням, доцільно обробляти віброударними методами і обробкою дробом.

Із цієї групи особливу увагу слід звернути на вібраційну ударно-імпульсну обробку, з використанням гідроімпульсних приводів [7]. Цей тип приводу у пристроях для ППД поєднує переваги ударних методів ППД з покращеними параметрами забезпечення технологічності, швидкодії, малогабаритною конструкцією, широким діапазоном технологічних можливостей пристроїв.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Халл Д. Введение в дислокации. М.: Атомиздат, 1968. 280 с.
2. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов К. М. Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов. М. : Металлургия, 1982. 584 с.
3. Новиков И. Н. Дефекты кристаллической решетки металлов. М. : Металлургия, 1968. 168 с.
4. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М. : Машиностроение, 1978. 152 с.
5. Паливода Ю.Є. Методи підвищення експлуатаційної надійності і довговічності дисків бурякозбиральних машин // Сільськогосподарські машини: збірник наукових статей ЛНТУ № 31 / Левкович М.Г., Гудь В.З., Гупка А.Б. – М., 2015. – С. 121 – 127.
6. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М. : Машиностроение, 1987. 328 с.
7. Обертюх Р. Р. Пристрої для віброточіння на базі гідроімпульсного приводу : монографія / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 164 с.

Марущак Михайло Володимирович – аспірант кафедри Галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет. Електронна адреса – [Ohitsmichaels@gmail.com](mailto:Ohitsmichaels@gmail.com).

Науковий керівник: Роман Романович Обертюх – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри Галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет.