

С.О. ПРИСТУПА, В.Ю. ЗАБЛОЦЬКИЙ

Луцький національний технічний університет

О.П. ДАХНЮК

ДП Луцький ремонтний завод «МОТОР»

## ПРИРОДА ЛАТЕНТНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПІДШИПНИКІВ

*В статті досліджено механізм формування геометричних параметрів поверхні в контексті накопичення латентної енергії деформування та її вплив на формування експлуатаційних параметрів робочих поверхонь кілець роликотідшипників.*

*Ключові слова: дислокація, вакансія, кристалічна ґратка, поверхневий шар, ядро дислокації, латентна енергія деформації.*

S. PRYSTUPA, V. ZABLOTSKY

Lutsk National Technical University

O. DAKHNIUK

State Enterprise Lutsk Repair Plant "Motor"

### NATURE OF THE LATENT STRAIN ENERGY AND ITS IMPACT ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS BEARING DETAILS

The paper investigates the mechanism of formation of geometrical parameters of the surface in the context of the accumulation of latent energy of deformation and its influence on the operating parameters of the working surfaces of roller rings.

*Keywords: dislocation, vacancy crystal lattice, the surface layer, the core dislocation latent energy of deformation.*

**Постановка задачі.** Однією з основних задач сучасного машинобудування є забезпечення необхідної якості поверхневого шару деталей, оскільки саме від якості залежить більшість експлуатаційних властивостей деталей машин. Зношування і руйнування деталей машин найчастіше розпочинається з поверхонь. Саме тому від їх стану залежить надійність і довговічність роботи деталей машин. Попередніми експериментальними дослідженнями встановлено, що енергетичні критерії якості являються комплексними характеристиками якості поверхневого шару робочих і базових поверхонь кілець підшипників зокрема.

Тому дослідження зв'язків експлуатаційних властивостей робочих поверхонь кілець роликотідшипників з параметрами якості поверхневого шару на основі оцінки поглиненої енергії в процесі механооброблення є актуальною науково-практичною задачею.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Увага до енергетичної оцінки поверхневого шару деталей відображена в роботах [1–4], які присвоюють поглиненій енергії деформації статус комплексного показника енерговитрат і відмічають, що вона ефективніше корелює з експлуатаційними властивостями ніж геометричні характеристики поверхні такі як: шорсткість, наклеп та залишкові напруження.

У відповідності з дослідженнями різних авторів чимало експлуатаційних властивостей деталей підшипників, таких як втомна міцність, корозійна стійкість, зносостійкість тощо, визначаються енергетичним станом матеріалу поверхневого шару, тобто величиною накопиченої енергії в процесі механічного оброблення [3–5].

Так в роботі [3] показано, що в процесі механічної взаємодії (розглянуто на прикладі циклічних деформацій) в поверхневому шарі оброблюваної деталі накопичується надлишкова енергія, яка акумулюється в об'ємах, що деформуються, як дефекти кристалічної ґратки (вакансії, дислокації). На основі цієї енергії можна прогнозувати фізико-механічні параметри поверхневого шару деталей підшипників.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Механізм накопичення енергії заготовкою в процесі деформації заснований на двох концепціях: наявності деформацій ґратки та існування недосконалості кристалічної структури [5].

Недосконалості, насамперед, пов'язані з рухомістю атомів матеріалу. Інтенсивне коливання атомів навколо вузлів кристалічної ґратки не припиняється навіть при температурі, близькій до абсолютного нуля. Внаслідок обміну кінетичною енергією атоми з підвищеною енергією долають потенціальні бар'єри, що їх оточують, переходять із вузлів кристалічної ґратки у міжвузля або навколишній простір.

Атом, який вийшов із рівноважного положення в міжвузлі, прийнято називати дислокованим, а порожнє місце у вузлі ґратки, яке залишене атомом, — вакансією чи діркою. Слід відмітити, що енергія, яка запасається при утворенні вакансій становить, лише незначну частину від загальної поглинутої енергії. В загальному випадку вирішальну роль в механізмі поглинання енергії деформації відіграє утворення лінійних дефектів кристалічної структури і дислокацій. Розрізняють два основних види дислокацій: крайові (або лінійні) і гвинтові. Область поблизу дислокаційної лінії, де спотворення ґратки найбільш значні, називають ядром дислокації [3].

Слід відмітити, що метал в якому не утворюються дислокації володіє найвищою (теоретичною) міцністю. У суворо контрольованих умовах отримують високоміцні волокна (наприклад з бору), близькі за будовою до бездефектних монокристалів. На основі цих волокон виготовляють металокомпозиційні матеріали зі значною міцністю на розрив. З таких легких і міцних матеріалів розпочато виготовлення

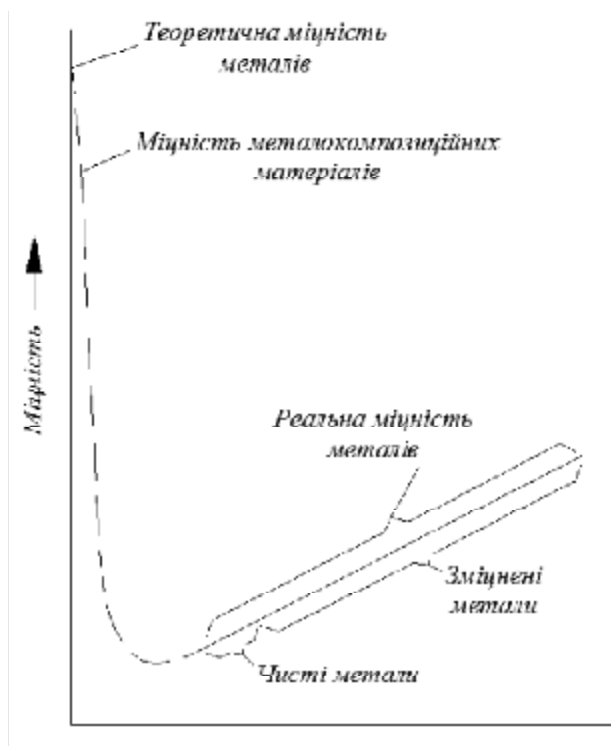


Рис. 1. Крива міцності

деформації буде одночасно задіяне щораз більше число атомів і реальна міцність підвищиться. Зміцнення поверхневого шару полягає в насиченні кристала дефектами за рахунок гартування, легування або механічного наклепу. Легування призводить до появи в ґратці чужорідних атомів. Загартування викликає подрібнення зерен полікристала, причому границі зерен є двовимірними дефектами. На них розсіюються дислокації. Деформаційне зміцнення і наклеп, призводить до утворення величезної кількості нових дислокацій, які перешкоджають власному взаємному переміщенню [1].

Наявність дислокацій в кристалічній структурі матеріалу проявляється через збільшення внутрішньої енергії системи, яку називають запасеною, прихованою, поглинутою, латентною енергією деформації.

Наявність дислокацій в кристалічній структурі матеріалу проявляється через збільшення внутрішньої енергії системи, яку називають запасеною, прихованою, поглинутою, латентною енергією деформації.

З кожною дислокацією пов'язана енергія  $W_D$ , пружних дефектів спотворень, яка рівна роботі, затраченій на утворення дислокацій. Загальна енергія спотворень складається з двох частин: енергії ядра дислокації  $W_j$ , радіус якого  $r_0$  та енергії її пружних спотворень  $W_n$ .

$$W_D = W_j + W_n \quad (1)$$



Рис. 2. Дислокаційні структури

Визначимо пружну енергію  $W_y^{(e)}$ , краюї дислокації. Для цього знайдемо роботу зовнішніх сил при її утворенні в кільці роликопідшипника зовнішнім радіусом  $R_0$  шляхом розрізу по площині  $q=0$  (рис 3) вздовж осі  $x_3$  від  $r=r_0$  до  $r=R_0$  і відносного зміщення країв поверхні різання на величину вектора

Бюргерса  $b$  дислокації (вздовж осі  $x_1$ ). Для виконання останнього необхідно прикласти до поверхонь розрізу дотичні напруження  $s_{rq}$ , які при утворенні дислокацій (при рості зміщення від 0 до  $b$ ) згідно з [4] збільшуються від 0 до  $\frac{Gb}{2p(1-m)} \cdot \frac{1}{r}$ . При цьому на ділянці площадки ковзання  $dr$  здійснюється робота,

рівна  $\frac{Gb^2}{4p(1-m)} dr$ . Проінтегрувавши від  $r_0$  до  $R_0$  отримаємо:

$$W_y^{(e)} = \frac{1}{4p} \cdot \frac{Gb^2}{1-m} \int_{r_0}^{R_0} \frac{dr}{r} = \frac{Gb^2}{4p(1-m)} \ln \frac{R_0}{r_0}. \quad (2)$$

де  $G$  – модуль пружності;  
 $m$  – коефіцієнт Пуассона.

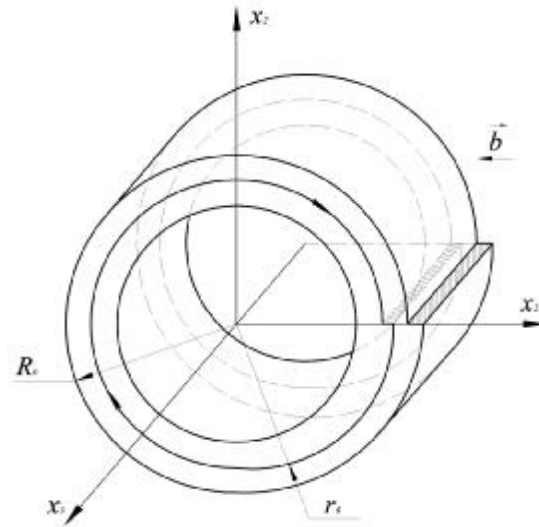


Рис. 3. Утворення красвої дислокації

Аналогічно визначається пружна енергія  $W_y^{(s)}$  гвинтової дислокації, при цьому в площині ковзання діє напруження  $s_{rq}$ , та інтегрування від  $r_0$  до  $R_0$  дає:

$$W_y^{(s)} = \frac{Gb^2}{4p} \ln \frac{R_0}{r_0}. \quad (3)$$

Щоб оцінити енергію ядра дислокації, припустимо, що на ділянці області ковзання всередині циліндра радіусом  $r_0$  при утворенні дислокації досягається теоретичний опір зсуву  $t = \frac{G}{10}$ . Якщо прийняти  $r_0 = 2b$  то отримаємо:

$$W_y \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{G} = \frac{Gpb^2}{50}. \quad (4)$$

Таким чином, для  $R_0 \geq 200b \cdot W_y < 0,1W_n$  і енергія дислокації визначається в основному величиною  $W_n$ . Співставлення (2) та (3) показує, що в ізотропному пружному середовищі крайова дислокація має енергію в  $\frac{1}{1-m}$  раз (приблизно в 1,5 разу) більша, ніж гвинтова, для прямолінійно зміщеної дислокації:

$$W_\partial = \frac{Gb^2}{4p(1-m)} (1 - m \cos^2 a) \ln \frac{R_0}{r_0}, \quad (5)$$

де  $a$  – кут між вектором Бюргерса і лінією дислокації.  
 Формулу (5) можна представити в наступному вигляді:

$$W_\partial = Q \cdot G \cdot b^2, \quad (6)$$

де  $Q$  – коефіцієнт,  $Q = \frac{1}{4p(1-m)} (1 - m \cos^2 a) \ln \frac{R_0}{r_0} \approx 0,5 \dots 1$ .

Для існуючої в металі на даний момент щільності дислокацій  $\Lambda$ , що розподілені в деякому об'ємі

$V$ , енергія визначається з співвідношення:

$$W_0 = Q \cdot G \cdot b^2 \cdot L \cdot V. \quad (7)$$

Наявність полів напружень, що оточують дислокації, призводить до утворення сили взаємодії між ними. Однойменні краєві дислокації відштовхуються, а різнойменні притягуються по вертикалі, величина сили протягування обернено пропорційна відстані між дислокаціями [4].

Відповідно до того, як дислокації утворюють щільні скупчення, починають взаємно знищувати різноманітні складові напружень, що фактично означає зниження ефективної енергії деформації, що припадає на одиницю довжини дислокації.

**Висновки.** Колориметричні дослідження показують, що практично вся механічна енергія, затрачена на здійснення процесу різання, перетворюється в теплову. Це положення було багаторазово підтверджено роботами не тільки вітчизняних, але й зарубіжних науковців. Проте слід відмітити, що незначна частина механічної енергії (не більше 2%) перетворюється у внутрішню енергію деформованого металу. В практичних розрахунках цією енергією нехтують. Тим не менше саме ця частина енергії  $W$ , що вносить зміну в енергію міжатомних зв'язків металу, впливає на зміну властивостей контактних шарів, деталі і інструменту.

Таким чином, на основі проведених досліджень зрозуміло, що в деформованому металі одночасно існує не один дефект і кожен з них неможливо розглядати ізольовано від інших дефектів через їх взаємодію. Отже, будь-яка спроба оцінити долю накопиченої енергії, дислокаціями, можлива лише за наявності відомостей про щільність і розподілення дислокацій в матеріалі оброблюваної заготовки.

### Література

1. Гуляев А.П. Металловедение : [учебник для вузов] / Гуляев А.П. – М. : Метталургия 1977. – 647 с.
2. Прокофьев М. А. Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя деталей при шлифовании на основе исследования скрытой энергии деформации : дисс. ... канд. техн. наук / М. А. Прокофьев. Рыбинск, 2006. – 198 с.
3. Старков В. К. Алгоритм оптимизации процесса резания по энергетическому критерию / В. К. Старков, М. В. Киселёв // СТИН. – 1992. – № 10. – С. 18–20.
4. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов : справочник ; в 2-х ч. Механические испытания. Конструкционная прочность / Я. Б. Фридман. – изд. 3-е, перераб. и доп. – «Машиностроение», 1974. – Ч. 1. – 368 с.
5. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, Сулов А.Г., Федоров В.П. – М. : Машиностроение, 1979. – 237 с.
6. Інженерія поверхні : (підручник) / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К. – «Наукова думка», 2007. – 559 с.
7. Ящерицин П.И. Основы резания материалов и режущий инструмент / Ящерицин П.И., Еременко М.Л., Жигало П.И. – Минск. Вышэйш школа, 1975. – 528 с.

### References

1. Huljaev A.P. Metallovedeniye. [Uchebnyk dlia vtuzov] M.: Metallurhyya 1977 – 647s.
2. Prokofev, M. A. Tekhnolohycheskoe obespechenye parametrov naklepa poverkhnostnoho sloia detalei pry shlyfovanyu na osnove yssledovaniya skrytoi enerhyi deformatsyyi Tekst.: dyss. . kand. tekhn. nauk / M. A. Prokofev. Rybinsk, 2006. - 198 s.
3. Starkov, V. K. Alhorytm optymyzatsyyi protsessa rezaniya po enerhetycheskomu kryteriyu (Tekst). / V. K. Starkov, M. V. Kysel'ev // STYN. -1992.-# 10.-S. 18-20.
4. Frydman, Ya. B. Mekhanycheskiye svoystva metal lov( Tekst.: spravochnyk; yzd. 3-e, pererab. y dop. V 2-kh ch.) Ch. 1. Mekhanycheskiye uspytaniya. Konstruktsyonnaia prochnost / Ya. B. Frydman. — «Mashynostroeniye», 1974. -368 s.
5. Ryzhov E.V. Tekhnolohycheskoe obespechenye ekspluatatsyonnykh svoystv detalei mashyn / E.V. Ryzhov, Suslov A.H., Fedorov V.P. - M.: Mashynostroeniye, 1979.-237 s.
6. Inzheneriia poverkhni: (Pidruchnyk)/ K.A. Yushchenko, Yu.S. Borysov, V.D. Kuznetsov, V.M. Korzh; K. I «Naukova dumka», 2007.-559s.
7. Yashcherytsyn P.Y. Osnovy rezaniya materyalov y rezhushchyyi ynstrument /P.Y. Yashcherytsyn, M.L. Eremenko, P.Y. Zhyhalo. - Mynsk. Vysh'eish shkola, 1975. -528 s.

Рецензія/Peer review : 12.6.2013 р. Надрукована/Printed :22.9.2013 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., Марчук В.І., зав. кафедри приладобудування