

УДК 631.3–192:662.63

РОЗПОДІЛ ЕНЕРГІЇ В ПРОЦЕСІ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ВУЗЛІВ І АГРЕГАТИВ

Журавель Д.П., д.т.н.,

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь, Україна.

Основним недоліком сучасної теорії тертя, змащування і зношування пар тертя вузлів і агрегатів, що спонукало постановку даної роботи, є слабкий зв'язок аналітичних і експериментальних результатів із властивостями речовин, зношування матеріалів і змащування поверхонь тертя. У задачу дослідження входило обґрунтування процесів, які відбуваються при дії абразиву на поверхневу структуру металів пар тертя, на прикладі сірих чавунів, вузлів і агрегатів в середовищі БПММ.

Тверде тіло руйнується, якщо кристалічна решітка перестає при навантаженні поглинати енергію, яка підводиться ззовні. Це означає, що даний об'єм металу насичений енергією граничної величини, яка визначається силами зв'язку в його кристалічній решітці.

Енергія вдавлення індентора в поверхню металу. Оскільки процеси вдавлення індентора твердоміра при вимірюванні твердості і проникненні шорсткості контртіла в поверхневі шари металу аналогічні, можна вважати, що здатність сплаву до опору зближення поверхонь контролюється тими ж властивостями, які характеризують його твердість.

Знаючи твердість робочої поверхні сплаву після тертя, можна визначити роботу, яку потрібно зробити при вдавлюванні індентора на глибину зносу за один робочий цикл. Якщо прийняти, що проникнення індентора в поверхню відбувається в результаті подолання опору з боку металу, чисельно рівного твердості, то витрачена при цьому енергія вдавлення:

$$E_{вд} = H \cdot \Delta h \cdot S, \quad (1)$$

де H - твердість поверхневого шару металу після тертя; Δh – глибина вдавлення індентора в метал (величина зносу за один робочий цикл); S – площа перетину індентора на глибині вдавлення в метал на величину, рівну зносу за один робочий цикл.

$$S = \pi \Delta h (2r - \Delta h) \quad (2)$$

При радіусі індентора $r = 1$ мм і малій глибині вдавлення за один робочий цикл (зазвичай $\Delta h = 1,27 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ мм); при цьому вираз в дужках може бути прийнято рівним $2r$. Таким чином:

$$E_{вд} = 2\pi H \Delta h 2r \quad (3)$$

Енергія зародження і розвитку тріщин. При переміщенні індентора по поверхні деталі відбувається деформація металу і утворення мікротріщин. Подальший розвиток мікротріщин призводить до руйнування поверхневих мікрооб'ємів, що і складає акт зношування. Тріщини зароджуються по лінії, що відповідає наприклад проекції на вертикальну вісь тієї частини індентора радіусом r , яка занурена в метал, тобто:

$$l = 2 \pi \alpha r / 360,$$

де α - центральний кут, град. При $r = 1$ і величиною зносу за один цикл від $1,27 \cdot 10^{-5}$ до $1,3 \cdot 10^{-4}$ мм, величина l знаходиться в межах діаметра зерна сталі, приблизно дорівнює 0,125 мм. Формально тріщина може бути інтерпретована як скупчення n крайових дислокацій з вектором Бюргерса b . Відповідно до даних [1], енергія мікротріщин E_{tr} шириною $H = nb$ і довжиною l становить:

$$E_0 = \frac{n^2 b^2 E}{4\pi(1-\mu)\ln\left(\frac{4R}{l}\right)} + 2E_y l - \frac{\pi(1-\mu)l^2 \sigma^2}{8E} - \sigma n b l \quad (4)$$

де E - модуль пружності; R - протяжність поля напружень від вершини тріщини; E_p - ефективна поверхнева енергія; σ - прикладені напруження, призводять до утворення і розвитку тріщин; μ - коефіцієнт Пуассона.

Перший член у виразі характеризує енергію E_{zt} , необхідну для утворення тріщини, і відповідає відомому критерію зародження тріщин Гріффітса. Другий член являє собою енергію, яка витрачається на створення двох нових поверхонь. Третій член E_y - пружна енергія тріщини в полі прикладених напружень. Енергія пружної деформації поверхнього шару зношуемого металу зосереджена в тих викривлення кристалічної решітки, які після зняття навантаження реалізуються при відновленні форми і розмірів. Четвертий член у виразі - робота E_{rt} , вироблена прикладеним напруженням при розкритті тріщини.

При модулі зсуву G і векторі Бюргерса b справжня поверхнева енергія становить $E_0 = 0,1 G b$ [1-3]. Площа поверхні утворює тріщини

$$2 S = 2 n b l.$$

Скупчення дислокацій, що утворюють тріщину, може бути прийнято $n = 500$. Таким чином, справжня поверхнева енергія тріщини:

$$E = 10^2 G b^2 l, \text{ Дж} \quad (5)$$

Енергія руйнування карбідів. Значна крихкість і мала здатність до пластичної деформації дозволяє застосувати відому методику [4-6] до розрахунку величини енергії, потрібної для руйнування карбідів, боридів, нітридів і оксидів в зносостійких сплавах.

Для плавлення, тобто порушення міжатомних зв'язків в матеріалі, нагрітому до температури плавлення, коли його кристалічна решітка

гранично перекручена внаслідок теплових коливань атомів, необхідно підведення додаткової теплової енергії, яка визначається схованою теплотою плавлення. При механічній деформації порушення міжатомного зв'язку в гранично спотвореній кристалічній решітці відбудеться при повідомленні йому енергії, чисельно дорівнюємій величині прихованої теплоти плавлення. Оскільки деформація при терті відбувається зазвичай при температурі, меншій, ніж температура плавлення, то величину енергії, яка витрачається на руйнування міжатомних зв'язку (плавлення), можна визначити по рівнянню Кірхгофа, що описує зміну теплоти реакції (плавлення, поліморфних перетворень і т.д.) з температурою:

$$L_u = L_{\text{пл}} - \int_{T_u}^{T_{\text{пл}}} \Delta C_p dT \quad (6)$$

де L_u - прихована теплота плавлення при температурі тертя; T_u - температура тертя; $T_{\text{пл}}$ - температура плавлення; ΔC_p - різниця питомих теплоємностей в рідкому стані і при температурі тертя.

Оскільки теплові коливання атомів сприяють порушенню міжатомних зв'язків, енергія, що витрачається на здійснення цього процесу в гранично спотвореній кристалічній решітці, буде визначатися:

$$E_p = L_u - \int_0^{T_u} \Delta C_p dT \quad (7)$$

де $\int_0^{T_u} \Delta C_p dT$ - енергія теплових коливань атомів

Таким чином, при механічному навантаженні питома енергія порушення міжатомних зв'язків в об'ємах матеріалу з граничними статистичними спотвореннями складе:

$$E_p = L_{\text{пл}} - \int_{T_u}^{T_{\text{пл}}} \Delta C_p dT - \int_0^{T_u} \Delta C_p dT \quad (8)$$

Прихована енергія деформації при терті. У процесі пластичної деформації металу під впливом взаємодії нерівностей частина механічної енергії переходить в тепло, частина витрачається на подолання сил міжатомних зв'язків і утворення нових поверхонь і частина акумулюється в металі.

Величина поглиненої (латентної) енергії близька до енергії дислокацій. Причому зі збільшенням ступеня пластичної деформації величина акумулюємої металом енергії зростає, підвищуючи його внутрішню енергію. Чим більшою здатністю запасати енергію, яка підводиться має сплав в даному структурному стані, тим вище повинен бути його опір руйнуванню при терті.

Прихована енергія деформації при терті складається з величини енергії, зосередженої в дислокаціях, точкових дефектах, дефектах упаковки і залишкових напружень, що утворилися в процесі тертя, а також з енергії утворення мартенситу деформації і виділення нових фаз.

Внесок в приховану енергію деформації від дислокацій відбувається як за рахунок енергії, безпосередньо пов'язаної з енергією спотворення кристалічної решітки від одиначної дислокації, так і за рахунок енергії взаємодії дислокацій один з іншим, з конденсованими атмосферами розчинених атомів і інших видів взаємодії. Енергія дислокацій залежить від характеру розташування дислокацій і відстані між ними. Це призводить до неоднорідного розподілу прихованої енергії деформації в деформованому об'ємі. Якщо прихована енергія деформації в локальному об'ємі досягне граничної для даного металу величини, то саме в цих обсягах виникне тріщина.

Енергія дислокацій. Величина енергії, що витрачається на збільшення щільності дислокацій в даному об'ємі, може бути визначена по різниці щільності дислокацій до і після тертя:

$$E_{\rho} = \Delta\rho E'_{\rho} V_{\rho}, \quad (9)$$

де $\Delta\rho$ - приріст щільності дислокацій в робочому об'ємі металу після тертя;

$$\Delta\rho = \int_0^{l_{\Delta\rho}} f(l_{\rho}) dl_{\rho} \quad (10)$$

E'_{ρ} - енергія одиначної дислокації; V_{ρ} – об'єм поверхневого шару, в якому відбувається збільшення щільності дислокацій.

Наявність дислокацій в кристалі призводить до появи в ньому деформацій, напруг і, отже, до збільшення запасеної пружної енергії. Пружна енергія одиначної дислокації E на одиницю довжини визначається по співвідношенню [7-9]:

$$E'_{\rho} = \frac{\left(\ln\frac{r_1}{r_0} - l_{\text{я}}\right)Gb^2}{4\pi(1-\mu)} \quad (11)$$

де G - модуль зсуву; b - вектор Бюргерса; μ - коефіцієнт Пуассона; r_0, r_1 - зовнішній і внутрішній радіуси силового поля одиначної дислокації; r_1 може бути прийнятий від 50 нм до 2 мкм; радіус ядра дислокації r_0 може бути прийнятий від 8 нм до $b/3$; $l_{\text{я}}$ - енергія ядра дислокації приймається рівною 10% від E'_{ρ} ; $f(l_{\rho})$ – характер розподілу додаткової щільності дислокацій; l_{ρ} - глибина робочого шару.

З вищевказаного отримаємо:

$$E_{\rho} = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\mu)} \ln\left(\frac{r_1}{r_0} - l_{\text{я}}\right) V_{\rho} \int_0^{l_{\rho}} f(l_{\rho}) dl_{\rho} \quad (12)$$

Точний розрахунок енергії взаємодії дислокацій поки неможливий, так як її величина і знак залежать від важко визначаємих характеристик відстані між дислокаціями і наявності сегрегації на дислокаціях. Наближена оцінка енергії взаємодії дислокацій з різних літературними

даних дорівнює для металів приблизно від 1 до 5 еВ на одну міжатомну відстань. Внесок цього процесу в загальну енергоємність металів може досягати значних величин.

Енергія виділення нових фаз. При деформації поверхневих шарів металу з твердого розчину поверхневої зони відбувається виділення дисперсних фаз.

Знаючи загальну кількість карбідів, що виділяються в результаті деформації, можна оцінити витрати енергії на здійснення цього процесу при терті. Якщо V – об'єм металу, в якому відбувається виділення карбідів при терті; k - максимальна кількість карбідів, що виділилися на поверхні; $k = f(l)$ - характер розподілу карбідів, які виділилися по глибині шару l , то кількість енергії, що витрачається на виділення нових фаз, може бути визначено виразом:

$$E_k = E_k V f(l) dl, \quad (13),$$

де E - питома енергія виділення карбідів; $E \approx 4,2$ кДж / моль.

Енергія утворення мартенситу деформації. Під впливом індентора в процесі тертя в металі з вихідною аустенітною структурою може відбуватися утворення мартенситу деформації.

Для утворення кристалів мартенситу необхідні витрати енергії на пружну і пластичну деформації, утворення поверхні частинки і відрив решіток мартенситу і аустеніту. Джерело цієї роботи - різниця вільних енергій вихідної та кінцевої фаз. Кількість енергії, витраченої на мартенситні перетворення в процесі тертя, може бути визначене:

$$E = E V f(l) dl, \quad (14)$$

де E - енергія, необхідна на освіту 1 благаючи мартенситу, $E = 2,1$ кДж / моль; V - об'єм металу, в якому відбувається утворення мартенситу деформації при терті, визначається за експериментальними результатами рентгеноструктурного аналізу; $M = f(l)$, M - кількість мартенситу деформації на поверхні, зафіксоване рентгеноструктурним аналізом; M – розподіл мартенситу деформації по глибині l робочого шару, в якому рентгеноструктурним аналізом відзначаються мартенситні перетворення.

Енергія залишкових напружень, що виникають в поверхневих шарах сплавів при терті. У процесі тертя в робочому шарі сплавів під впливом шорсткостей відбуваються структурні перетворення, що супроводжуються об'ємними змінами, які викликають появу залишкових напружень. Крім того, в поверхневому шарі металу при його деформації створюються напруження за рахунок спотворень кристалічної решітки. Механічна енергія, яка накопичена в металі в процесі деформації, являє собою потенційну енергію зміщення атомів з їх рівноважного положення в кристалічній решітці. Сили, прагнуть повернути зміщені атоми в їх початкове положення, по суті є напруженнями.

Для подолання напружень стиску в поверхневій зоні необхідні певні витрати енергії. Кількісна оцінка впливу залишкових напружень в

поверхневому шарі на зносостійкість сплавів може бути виконана за величиною цієї роботи, яка визначається зі співвідношення:

$$A = (1 - 2\mu) (3\Delta\sigma)^2 / 6E \quad (15)$$

Якщо відомий приріст величини залишкових напружень на поверхні деталі,:

$$\Delta\sigma = \int_0^{l_\sigma} f(l_\sigma) dl_\sigma, \quad (16)$$

то об'єм металу V_σ , в якому утворюються залишкові напруження при терті і характер їх розподілу по глибині робочого шару, то енергія, зосереджена в цих напруженнях, може бути визначена за формулою:

$$E_{вн} = \frac{1-2\mu}{6E} (3\Delta\sigma)^2 V_\sigma \int_0^{l_\sigma} f(l_\sigma) dl_\sigma \quad (17)$$

Характер розподілу мартенситу, карбїду і напружень в матеріалі можна визначати, використовуючи програми для ЕОМ, складеної на основі експериментальних даних.

Енергетичний метод дослідження дозволяє встановити розміри витрат енергії на здійснення явищ, що відбуваються в металах при їх взаємодії і таким чином оцінити питомий внесок кожного з них в опірність сплаву впливу контртіла при терті [10].

Енергоємність металу визначається сумарною величиною енергії, яка поглинається при взаємодії з нерівностями контртіла в процесі тертя:

$$E_M = 2\pi\Delta h^2 Hr \left[\frac{n^2 b^2 E}{4\pi(1-\mu)\ln\left(\frac{4R}{l}\right)} \right] + 33E_0 - \frac{\pi(1-\mu)l^2\sigma^2}{8E - \sigma nbl} + \\ + (l_{пл} - \int_{T_u}^{T_{пл}} \Delta C_p dT - \int_0^{T_u} \Delta C_p dT) V_\rho + \\ E'_\rho V_\rho \int_0^{l_\rho} f(l_\rho) dl_\rho + E'_k V_k \int_0^{l_k} f(l_k) dl_k + E'_m V_m \int_0^{l_m} f(l_m) dl_m + \\ + \frac{(1-2\mu)(3\Delta\sigma)^2 V_\sigma \int_0^{l_\sigma} f(l_\sigma) dl_\sigma}{6E} \quad (18)$$

Енергоємність поверхневого шару має складну залежність (рис. 1) від величини сили деформації [11].

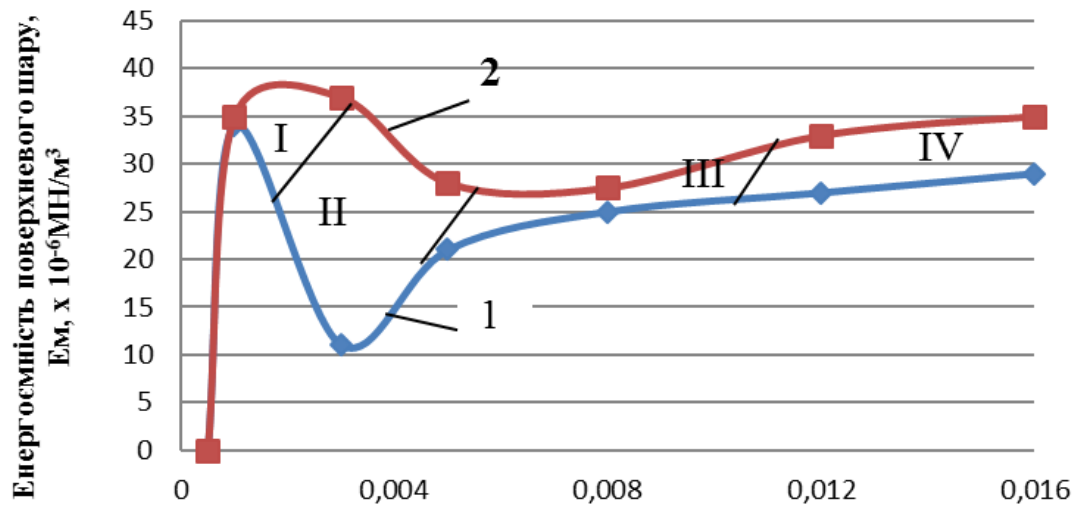
Весь графік залежності енергоємності поверхневого шару від сили деформації можна розбити на чотири зони:

I - зона пружної деформації зміцненого шару, отриманого шліфуванням зразків;

II - зона пластичної деформації зміцненого шару (наклепаного) шліфуванням зразків;

III - зона пружної деформації основного металу, початком цієї зони є розпушений шар металу, отриманий в результаті переміщення вакансій основного металу під дією зміцнення поверхневого шару шліфуванням:

IV - зона пластичної деформації основного металу.



Навантаження на абразивне зерно, Р, Н

1 – біологічна ріпакова олива; 2 – мінеральна олива М-10В₂

Рис.1. Залежність енергоємності поверхневого шару перлітної основи чавунів Ем від сили навантаження на абразивне зерно

Стрибок графіка між першою і другою зонами характеризує глибину наклепаного шару. Цей графік відображає і напруженість поверхневого шару перлітної основи чавунів від сил деформації – сил зовнішньої дії. Руйнування поверхневих шарів стане можливо після такої кількості робочих циклів зношування, яке необхідно для накопичення енергії, яка дорівнює граничній її величині, здатній акумулюватися в сплаві даного складу і структури. Кількість робочих циклів, після скоєння яких відбувається руйнування, і визначає рівень зносостійкості матеріалу.

Таким чином, енергоємність поверхневих шарів металу є характеристикою, яка дозволяє оцінювати поверхневі шари по здатності накопичення деформації при дії абразивного зерна, а також оцінює їх здатність протистояти зношуванню в процесі абразивного зносу в різних середовищах ПММ. Енергоємність поверхневих шарів металу, будучи функцією сил деформації, дозволяє встановлювати межі силових характеристик вузлів тертя при абразивному зношуванні.

Список використаних джерел

1. Махкамов К.Х. Расчет износостойкости машин. Учебное пособие. Ташкент: ТашГТУ, 2002. 144 с.

2. Журавель Д.П. Моделювання процесів зміни кількісних і якісних показників моторних масел при їх використанні. *Праці ТДАТА*. Вип.2, т.14. Мелітополь, 2000. С. 37-40.

3. Журавель Д.П. Моделирование триботехнических процессов в сопряжениях автотракторных двигателей. Отраслевое машиностроение. *Труды ТГАТА*. Вып. 1, т.6. Мелітополь, 1998. С. 38-43.

4. Журавель Д. П. Методологія підвищення надійності сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Тавр. держ. агротехнол. ун-т. Мелітополь, 2018. 44 с.

5. Журавель Д. П. Моделювання енергетичного балансу трибосистеми сільськогосподарської техніки в середовищі змащувальних матеріалів. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Вип. 1. Запоріжжя, 2013. С. 126-132.

6. Журавель Д. П., Юдовинський В.Б. Моделювання хімотологічних та триботехнічних процесів в спряженнях тертя. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь, 2007. Вип. 7, т. 3. С. 30-38.

7. Журавель Д. П. Прогнозирование ресурса плунжерных пар топливных насосов. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць / КНТУ. Кіровоград, 2012. Вип. 25, т. 1. С. 46-49.

8. Журавель Д. П., Юдовинський В.Б., Коломоєць В.А. Экспериментальное моделирование процесса работы плунжерных пар ДВС. Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві: зб. наук. праць / Ін-т механізації тваринництва УААН; Запоріжжя, 2012. Вип. 1(9). С. 195-199.

9. Журавель Д.П., Новік О.Ю., Бондар А.М., Петренко К.Г. Триботехніка. Курс лекцій з навчальної дисципліни для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 280 с.

10. Журавель Д. П. Вплив забрудненості абразивом біопаливо-мастильних матеріалів на енергоємність поверхневих шарів металів вузлів і агрегатів мобільної техніки. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Херсон, 2017. Вип. 5. С.56-65.

11. Журавель Д. П. Вплив забрудненості абразивом біопаливо-мастильних матеріалів на енергоємність поверхневих шарів металів вузлів і агрегатів мобільної техніки. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Вип. 5. Херсон, 2017. С.56-65.