К413,25
УДК 620.891
Износ абразивный, трение скольжения
разрушение усталостное металла

В.І. Дворук, канд. техн. наук, доц.

ОСОБЛИВОСТІ ВТОМЛЮВАЛЬНОГО РУЙНУВАННЯ ТРИБОСИСТЕМ КОВЗАННЯ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ

Показано, що втомлювальне руйнування металів при навантаженні тертям ковзання в присутності абразиву між тертьовими поверхнями має в'язкий характер.

Найбільш поширеним та інтенсивним видом пошкодження деталей механічних систем, функціональне призначення яких зумовлює їх взаємодію з абразивом, є абразивне зношування. Якщо в машинобудуванні для трибосистем із змазуванням знос складає $10^{-1} – 10^{-3}$ мм, то під дією абразиву він може досягати декількох сантиметрів. За даними роботи [1] від 50 до 80% зносу деталей різної техніки пояснюється абразивним зношуванням.

Відмінність типу абразиву і схем його силової взаємодії з робочою поверхнею зумовлює різновиди абразивного зношування, в тому числі зношування при терті частинками абразиву, що розташовані між поверхнями трибосистем ковзання.

Результати вивчення механізму взаємодії абразивних частинок з поверхнями трибосистем в таких умовах [2] свідчать про те, що у випадку сполучення поверхонь різної твердості абразивні частинки, як правило, шаржирують поверхню трибосистеми з меншою твердістю і ковзають по поверхні з більшою твердістю.

Процес зношування шаржируваної поверхні при цьому визначається втомлювальним руйнуванням при малоцикловому навантаженні [3; 4].

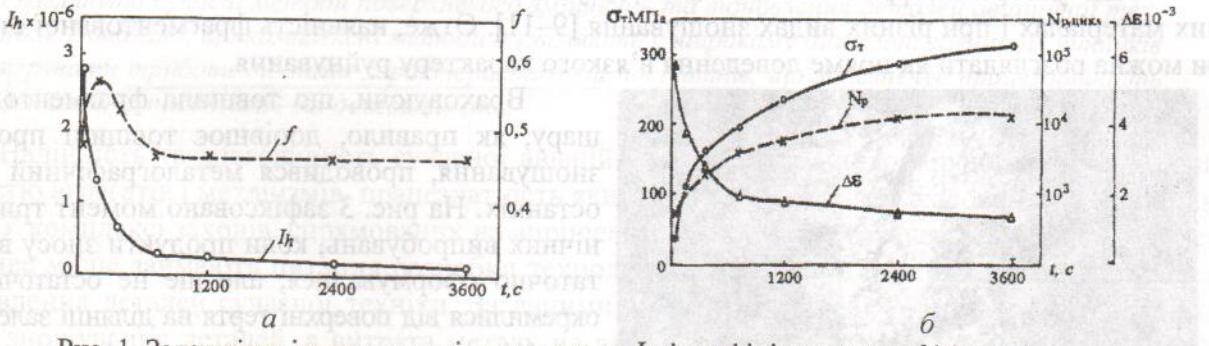
Фрикційна малоциклова втома виникає в місцях закріплення абразивних частинок на поверхні зношування, де під дією нормального навантаження, що стискає, і сили тертя відбувається циклічне пластичне деформування останньої. На зовнішнє навантаження накладається об'ємний напружений стан, близький до всебічного стиснення, який виникає у внутрішніх об'ємах поверхневого шару металу, що оточують закріплені частинки.

При всебічному стисненні деформування поверхневого шару полегшується настільки, що навіть у крихких матеріалах (камінь, бетон і т.д.) спостерігається значна пластична деформація зон контакту [5]. Отже, при абразивному зношуванні під дію малоциклового навантаження і всебічного стиснення в поверхневому шарі матеріалу формується в'язкий стан. Виходячи з цього, руйнування матеріалу повинно відбуватися за в'язким механізмом.

Експериментальні дослідження трибосистеми сталь 45 – сталь 40ХН виконувалися на модернізованій машині тертя СМЦ-2 за методикою [3]. Схема стирання диском лунки на плоскій поверхні зразку, що при цьому використовувалася, забезпечувала несталість площини поверхні тертя і внаслідок цього – несталість величини питомого навантаження під час іспитів із сталими зовнішніми навантаженнями.

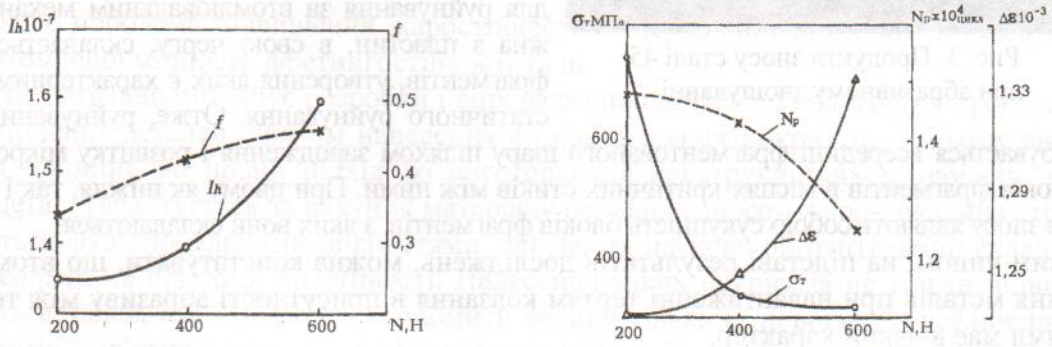
Зразок виготовлявся із нормалізованої сталі 45 (HRC_e=16,5), диск із сталі 40ХН, що термооброблена в режимі гартування – високий відпуск (HRC_e = 30). Зусилля притиснення N зразка до диску складало 200, 400, 600 Н, швидкість V відносного ковзання – 1,31 м/с, тривалість t досліду – 3600 с. Досліди проводилися у водному розчині бентонітової глини з додаванням (до 2,2–2,6 %) шламу гранітної породи зернистістю $(0,31–0,63)\cdot10^{-3}$ м. Умовна в'язкість ν робочого середовища дорівнювала 27 с. Робоче середовище прокочувалося крізь зону тертя. У процесі триботехнічних випробувань проводилося безперервне вимірювання і реєстрація лінійного зносу і моменту тертя трибосистеми. Результати трьох вимірювань піддавали статистичній обробці за методикою [6]. Для виявлення основних закономірностей руйнування поверхневого шару зразка використовувалися межа текучості $\sigma_т$ і поточне значення непружної деформації $\Delta\varepsilon$, що визначалися за методикою [2], а також кількість циклів до руйнування $N_р$, яка розраховувалася за рекомендаціями [5].

Отримані результати (рис. 1, 2) свідчать про те, що збільшення питомого навантаження призводить до зростання ступеня пластифікації поверхневого шару зразка і зниження його довговічності. Така закономірність спостерігалася як при іспитах зі сталим зовнішнім навантаженням (рис. 1), так і при збільшенні зовнішнього навантаження (рис. 2). Про наявність пластифікації свідчать, зокрема, зменшення межі текучості $\sigma_т$ і зростання поточної непружної деформації $\Delta\varepsilon$ у міру збільшення питомого навантаження.



а *б*

Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування I_h і коефіцієнта тертя f (*а*) межі текучості σ_T, непружної деформації $\Delta\varepsilon$ і кількості циклів до руйнування N_p (*б*) сталі 45 від часу тертя t при V=1,31 м/с, N = 600 Н



а *б*

Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування I_h і коефіцієнта тертя f (*а*) межі текучості σ_T, непружної деформації $\Delta\varepsilon$ і кількості циклів до руйнування N_p (*б*) сталі 45 від зусилля притиснення N при V=1,31 м/с, t = 3600 с

Порівняння інтенсивності зношування I_h з межею текучості $\sigma_т$ в обох видах випробувань показує, що вони знаходяться в зворотному зв'язку, тоді як з непружною деформацією $\Delta\varepsilon$ – у прямому кореляційному зв'язку.

Залежності $I_h = f(t)$, $\sigma_т = f(t)$ і $\Delta\varepsilon = f(t)$ складаються з двох ділянок: першої (в інтервалі часу $\Delta t_1 = 0 - 720$ с), де швидкість зміни вказаних характеристик дуже висока, і другої (в інтервалі часу $\Delta t_2 \approx 720 - 3600$ с), де швидкість зміни характеристик суттєво знижується. На першій ділянці довговічність поверхневого шару знаходиться в діапазоні $\Delta N_{p1} \approx 0{,}5 - 6 \cdot 10^3$ цикл., а на другій – $\Delta N_{p2} \approx 6 \cdot 10^3 - 1{,}25 \cdot 10^4$ цикл.

Відомо, що область малоциклової втоми за характером руйнування можна розглядати такою, що складається із зон квазістатичного і втомлювального руйнування [7]. За кількістю циклів до руйнування квазістатична зона передує втомлювальній і настає після вичерпання пластичності матеріалу в результаті його деформування.

Утомлювальне руйнування, що відбувається на фоні макропластичного деформування, пов'язане з утворенням і розвитком до критичного розміру втомлювальної тріщини. З урахуванням цього, а також кількісних значень довговічності поверхневого шару зразка на першій і другій ділянках залежностей $I_h = f(t)$, $\sigma_т = f(t)$ і $\Delta\varepsilon = f(t)$ можна припустити, що наявність цих ді-

лянок пов'язана з переходом від квазістатичного руйнування до змішаного квазістатично-втомлювального руйнування, що мають в'язкий характер. Обом видам руйнування передують великі пластичні деформації, за яких в металах розвиваються своєрідні структурні стани. Найбільш стійкими серед них є фрагментовані структури (структури, що складаються із замкнених областей мезоскопічного розміру) металу, які розорієнтовані одна відносно іншої на кути, що досягають десятків градусів [8]. Такі структури являють собою реакцію металу на ротаційні моди пластичності.

Факт утворення фрагментації підтверджується багаточисельними дослідженнями на різних матеріалах і при різних видах зношування [9–11]. Отже, наявність фрагментованої структури можна розглядати як пряме доведення в'язкого характеру руйнування.

Рис. 3. Продукти зносу сталі 45 при абразивному зношуванні

Враховуючи, що товщина фрагментованого шару, як правило, дорівнює товщині продуктів зношування, проводився металографічний аналіз останніх. На рис. 3 зафіксовано момент триботехнічних випробувань, коли продукти зносу вже остаточно сформувалися, але ще не остаточно відокремилися від поверхні тертя на ділянці залежності $I_h = f(t)$, де припускається квазістатично-втомлювальне руйнування. Можна бачити, що продукти зносу являють собою пластини, які є характерними для руйнування за втомлювальним механізмом. Кожна з пластин, в свою чергу, складається з блоків фрагментів, утворення яких є характерним для квазістатичного руйнування. Отже, руйнування поверхні тертя відбувається всередині фрагментованого шару шляхом зародження і розвитку мікротріщин по межах блоків фрагментів в місцях критичних стиків між ними. При цьому як нижня, так і бічні грані продуктів зносу являють собою сукупність блоків фрагментів, з яких вони складаються.

Таким чином, на підставі результатів досліджень, можна констатувати, що втомлювальне руйнування металів при навантаженні тертям ковзання в присутності абразиву між тертьовими поверхнями має в'язкий характер.

Список літератури

1. *Голубец В.М., Пашечко М.И.* Износостойкие покрытия и эвтевтики на основе системы Fe–Mn–C–B. –К.: Наук. думка, 1989. – 160 с.

2. *Дворук В.И.* Научные основы повышения абразивной износостойкости деталей машин. – К.: КМУГА, 1997. – 101 с.

3. *Гюнтер Х., Бессер Д.* О влиянии частиц минерального происхождения на характер износа // Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. – М.: Наука, 1982. – С. 227–237.

4. *Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г.* Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

5. *Марченко Е.А.* О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 166 с.

6. *Степнов М.Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985. – 187 с.

7. *Стрижало В.А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – К.: Наук. думка, 1978. – 238 с.

8. *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

9. *Грабар И.И.* О структуре и строении поверхностных слоев сопряженных материалов трущихся пар//Трение и износ. – Минск: Наука і техніка, 1990. – Т 11, №4. – С. 581–593.

10. *Лоцко Д.В., Мильман Ю.В., Торчун Н.М.* Механизм абразивного износа и структура поверхности кристаллических материалов после абразивной обработки//Поверхность.– 1984. – №8. – С. 136–142.

11. *Дворук В.И., Шевеля И.В., Радченко А.В.* Новый материал для условий абразивного изнашивания// Вісн. КМУЦА. – 1999. – №1. – С. 56–61.

Стаття надійшла до редакції 17.06.02.