

**Костогрив С.Г.,
Шалапко Ю.І.,
Мисліборський В.В.**

Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна

В'ЯЗКИЙ ОПІР ДЕФОРМАЦІЇ ЗСУВУ У НОМІНАЛЬНО НЕРУХОМОМУ ФРИКЦІЙНОМУ КОНТАКТІ

Вступ

Аналіз осцилограм вільних коливань взаємного переміщення елементів номінально-нерухомого фрикційного контакту (ННФК) показує, що їх затухання відбувається за експоненціальним законом [1]. Це дає підставу стверджувати, що коли вільні коливання у ННФК відбуваються в межах пружної частини попереднього зміщення, то дисипацію їх енергії породжують сили в'язкого опору, що прямо пропорційні швидкості деформації зсуву

$$\tau_{\epsilon} = \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

де τ_{ϵ} – в'язка компонента напруження зсуву;

$\dot{\gamma}$ – швидкість деформації зсуву;

η – коефіцієнт в'язкості або в'язкість ННФК.

Принципове значення має визначення в'язкості ННФК, оскільки воно пов'язане з перспективою розвитку досліджень його механіки, в тому числі процесів повзучості, релаксації, демпфірування коливань у ННФК, тощо. Цьому передує вирішення деяких проміжних задач, що розглянуті нижче.

1. «Третє тіло» та особливості деформації зсуву контактних поверхонь

І.В. Крагельским показано [2], що фрикційний контакт пружних тіл, в тому числі і номінально нерухомий, утворює особливу зону, що прилягає з обох сторін до поверхні розподілу площин контакту, так зване «третє тіло», яке містить кілька шарів. Їх утворюють плівки змащувальної рідини, окислів, адсорбованої пари води та деградованого матеріалу елементів контакту. При цьому звертається увага на те, що «третє тіло» має менший опір зсуву, ніж матеріал основи. Схематична будова такого контакту твердих тіл за даними роботи [2] з нашими доповненнями показана на рис. 1.

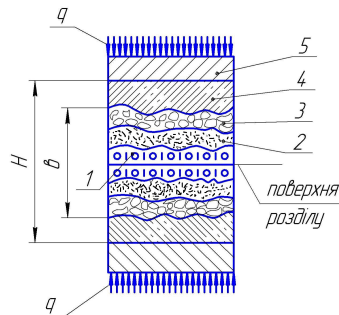


Рис. 1 – Схема будови «третього тіла» номінально нерухомого фрикційного контакту:

1 – молекули адсорбованих газів та водяної пари;

2 – оксиди; 3 – шар Бейблі;

4 – експлуатаційний шар контактної пари; 5 – основний матеріал

Ця схема, на відміну від тієї, що подана в роботі [2] на рис. 13 має ту особливість, що в ній до товщини «третього тіла» додана товщина твердого шару основи кожного елемента контакту, що деформується зсувом. Нижня границя цього шару в контактному елементі проходить по профілю мікронерівностей, а верхня границя є шаром, в якому деформація зсуву дорівнює нулю. Потрібно звернути увагу на те, що при тангенціальному реверсивному переміщенні елементів контакту з напрацюванням певної кількості циклів, «третє тіло» змінюється як по структурі, так і по товщині.

На початковій стадії фретингу, як показано в роботі В.В. Ковалевського [3], спостерігається ріст окисних плівок до $2 \cdot 10^4$ циклів реверсивних циклів мікропереміщень. Він має тенденцію до локального руйнування, причому відбувається контакт ювенільних поверхонь, що через підвищену адгезію призводить до зростання сили тертя. При цьому, якщо не враховувати товщину окисної плівки, то товщина «третього тіла» буде визначатись найменшою відстанню між паралельними площинами, що належать кожному із контактних елементів, в яких деформація зсуву дорівнює нулю. Розглянемо кілька

співвідношень для деформації зсуву у номінально нерухомому фрикційному контакті, що містить «третє тіло», з метою визначення товщини «третього тіла».

На рис. 2, а зображена схема деформації зсуву у ННФК, коли «третє тіло» піддається виключно пружним деформаціям, а фрикційне проковзування контактних поверхонь відсутнє. Це можливо, коли деформація зсуву відбувається в межах пружної частини попереднього зміщення.

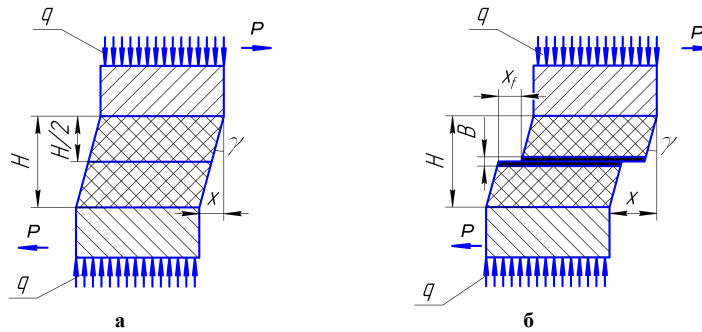


Рис. 2 – Схема деформування ННФК зсувом:

а – «третє тіло» піддається пружній деформації зсуву;

б – «третє тіло» піддається деформації зсуву з фрикційним проковзуванням елементів контакту

Якщо в «третьому тілі» відсутні шари 1, 2, 3 (рис. 1), що можливо, коли має місце ювенільний контакт поверхонь, то фрикційне зчеплення елементів контакту буде забезпечувати відсутність їх фрикційного проковзування, а зсув буде відбуватись у пружній області деформації. Тоді дві половини «третього тіла» можна розглядати, як єдине пружне тіло, що піддається деформації зсуву.

Напруження чистого зсуву [4] при дії на елементи контакту зсувної сили P , рис. 2, а:

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (2)$$

де G – модуль пружності другого роду матеріалу «третього тіла» (у випадку, що відповідає рис. 2, а, це буде матеріал елементів контакту);

γ – відносна деформація чистого зсуву, рис. 2, а.

Враховуючи, що кут γ малий і $\gamma = \text{tg} \gamma$, можна записати:

$$\gamma = \frac{x}{H}, \quad (3)$$

де x – взаємне дотичне переміщення (зсув елементів контакту);

H – товщина третього тіла.

З урахуванням співвідношення (2) переформуємо вираз (1):

$$\tau = G \frac{x}{H}. \quad (4)$$

З іншого боку тангенціальне напруження зсуву елементів контакту можна виразити через його тангенціальну жорсткість $C_{\tau_0} \left[\frac{H}{\text{MM}^2 \cdot \text{MKM}} \right]$.

$$\tau = C_{\tau_0} x. \quad (5)$$

Прирівнявши праві частини виразів (4) і (5) одержимо формулу для визначення товщини «третього тіла» у ННФК, що відповідає випадку його деформування, який ілюструє рис. 2, а.

$$H = \frac{G}{C_{\tau_0}}. \quad (6)$$

Розкриємо цей простий вираз дещо глибше. Для цього підставимо залежність початкової тангенціальної жорсткості ННФК від ряду факторів, яка отримана в роботі [5]. Після простих перетворень одержимо, що:

$$H = \frac{1,23ER_a}{q \left[5,25 - \ln \frac{2,22g}{Ey} \right]}, \quad (7)$$

де R_a – середнє арифметичне відхилення профілю контактних поверхонь;

E – модуль пружності матеріалу контактних пар;

q – номінальний тиск в контактї;

γ – градієнт шорсткості контактних поверхонь.

Таким чином товщина «третього тіла» прямо пропорційна модулю пружності, середньому арифметичному відхиленню профілю контактних поверхонь та обернено пропорційна номінальному тиску в контактї, що відображає рис. 3. Графіки на рис. 3 розраховані для градієнта шорсткості контактних поверхонь $\gamma = 3,5 \cdot 10^{-1} 3,5 \cdot 10^{-2}$. Параметри R_a та q надзвичайно виразно впливають на товщину «третього тіла» і є такими, що вплив на їх числові значення дозволить змінювати цю товщину.

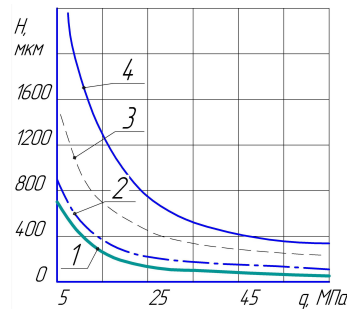


Рис. 3 – Залежність товщини «третього тіла» ННФК від номінального тиску:
1 – $R_a = 0,25$ мкм; 2 – 0,32; 3 – 0,63; 4 – 1,25

Рис. 2, б відповідає випадку, коли контакт виявляє пружнопластичні властивості, тобто коли разом із пружними деформаціями зсуву чає місце часткове фрикційне ковзання по номінальній площині контакту. Потрібно зауважити, що схема зсуву «третього тіла», що зображена на рис. 2, б, враховує наявність в цьому порівняно значного по товщині прошарку продуктів зношування. Як показано в роботі [3], по мірі збільшення їх кількості вони піддаються циклічному переформуванню та інтенсивно окислюються, а збільшення вологи в контактї призводить до зросту вторинних окисних плівок, що завершується до $2 \cdot 10^5$ циклів навантаження. В зоні контакту формується шар товщиною $||| = 10 \div 20$ мкм, який має мілкодисперсну рихлу структуру, а деформація зсуву елементів контакту відбувається із фрикційним ковзанням по цьому шару. Матеріал основи при цьому буде стягуватись в дотичному напрямку завдяки наявності фрикційного зчеплення в зоні контакту, а дотичне взаємне переміщення елементів контакту при цьому містить пружну або деформативну складову x_{np} та фрикційну складову x_f , тобто $x = x_{np} + x_f$. З урахуванням цього та співвідношень по схемі зсуву елементів контакту, що зображена на рис. 2.б, можна встановити з певним припущенням, що товщина «третього тіла» у пружнопластичному контактї виражається співвідношенням:

$$H = \frac{G}{C_{\tau_0}} + \delta, \quad (8)$$

де δ – товщина мілкодисперсного рихлого шару продуктів зношування в контактї, яку можна встановити експериментально.

Цей шар яскраво проглядається на знімку мікро шліфа контакту (рис. 4), в якому елементи виготовлені із сталі У8. Цей знімок запозичений з роботи [6].

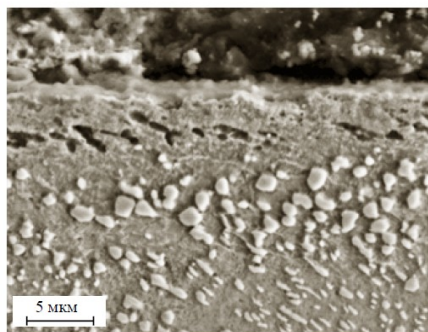


Рис. 4 – До ілюстрації структури «третього тіла» [5]

Таким чином, різниця в товщині «третього тіла» для пружно-пластичного і пружного контактів вимірюється товщиною проміжного мілкодисперсного рихлого шару в контактї, що містить продукти

фретинг-зношування, в тому числі розшарований і розрихлений метал основи та мілкодисперсні частинки зруйнованих окисних плівок.

2. В'язкий опір деформації зсуву в номінально нерухомому фрикційному контакті

«Третє тіло», утворене фрикційним контактом подібно твердому тілу має не тільки пружні, пластичні, але і в'язкі властивості. Утворене ним середовище, як і метал, чи інший конструктивний матеріал, здатний чинити в'язкий опір зсуву.

В'язке середовище чинить опір прямо пропорційний швидкості відносної деформації зсуву

$$\tau_{\epsilon} = \eta \dot{\gamma}, \quad (9)$$

де τ_{ϵ} – в'язка компонента напруження зсуву;

$\dot{\gamma} = d\gamma / dt$ – швидкість відносної деформації зсуву, c^{-1} ;

η – коефіцієнт в'язкості середовища, $H \cdot c \cdot M^{-2}$.

Коефіцієнт в'язкості твердих тіл перебуває в межах $\eta : [10^7 \cdot 10^{18}] H \cdot c \cdot M^{-2}$ $H \cdot c \cdot M^{-2}$, зокрема, коефіцієнт в'язкості цементного каменя за даними М. Рейнера [7] $\eta : 0,6 \cdot 10^{17} H \cdot c \cdot M^{-2} H \cdot c \cdot M^{-2}$.

Розглянемо, яким чином можна визначити коефіцієнт в'язкого опору середовища, яким є «третє тіло», утворене номінально нерухомим фрикційним контактом. Для цього виразимо швидкість відносної деформації зсуву в контакті $\dot{\gamma}$ через швидкість взаємного переміщення елементів контакту \dot{x} та її відносну величину $\dot{\epsilon}$, враховуючи що $\epsilon = x / \Delta_{np}$, де Δ_{np} – пружна частина повного попереднього зміщення [1]:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{x}{H} \right) = \frac{\dot{x}}{H} = \frac{\Delta_{np}}{H} \dot{\epsilon} = \frac{qf}{HC_{\tau_0}} \dot{\epsilon}, \quad (10)$$

де f – статичний коефіцієнт тертя в контакті.

Відповідно до співвідношень (9) та (10) дотичне напруження в'язкого опору в контакті можна виразити таким чином, що:

$$\tau_{\epsilon} = \eta \frac{qt}{H \cdot C_{\tau_0}} \dot{\epsilon}. \quad (11)$$

Введемо далі позначення

$$k = \eta \frac{qf}{H \cdot C_{\tau_0}} \left[\frac{H \cdot C}{M^2} \right]. \quad (12)$$

Назвемо k зведеним коефіцієнтом в'язкого опору у номінально нерухомому фрикційному контакті. У зв'язку з таким позначенням дотичне напруження в'язкого опору в контакті при зсуві його елементів набуває виразу:

$$\tau_{\epsilon} = k \cdot \dot{\epsilon}. \quad (13)$$

В'язкий опір у номінально нерухомому фрикційному контакті основи залежності (13) можна моделювати реологічним елементом Ньютона (рис. 5) [7].

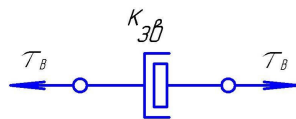


Рис. 5 – Моделювання в'язкого опору у ННФК реологічним елементом Ньютона

Підставимо у формулу (12) вираз (6) для товщини «третього тіла», тоді формула для визначення зведеного коефіцієнта в'язкого опору у ННФК прийме вигляд:

$$k = \frac{qf}{G} \eta. \quad (14)$$

Цю формулу потрібно використовувати, коли відбувається пружне контактування без фрикційного проковзування, рис. 2.а. У випадку пружнопластичного контактування, коли разом із пружними деформаціями має місце фрикційне проковзування, що відповідає схемі взаємодії елементів

контакту, зображений на рис 2.б, у формулу (12) підставляють співвідношення (8), щоб отримати вираз для зведеного коефіцієнта в'язкого опору в контакті. В результаті для цих умов контактування:

$$k = \frac{qf \cdot \eta}{G + C_{\tau_0} \epsilon} \quad (15)$$

3. Методика визначення коефіцієнта в'язкості за осцилограмою вільних коливань у ННФК

Нехай ННФК утворює коливальну систему з однією ступінню вільності. Динамічна модель цієї системи в структурному плані складається з маси та реологічних елементів Гука і Ньютона, що з'єднанні паралельно, рис. 6, а.

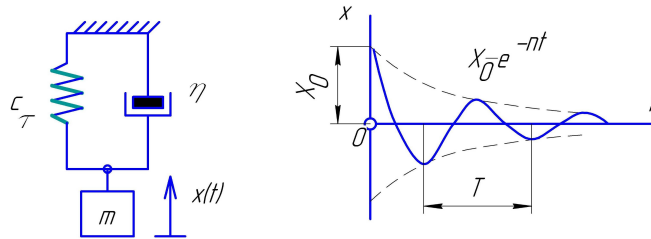


Рис. 6 – До визначення коефіцієнта в'язкості ННФК методом вільних затухаючих коливань:
а – реологічна модель для розрахунку вільних коливань у ННФК;
б – осцилограма вільних затухаючих коливань у ННФК.

Один із елементів ННФК вважаємо закріпленим, а до другого під'єднана маса m . Узагальненою координатою є взаємне переміщення x елементів контакту при зсуві. Якщо віднести діючі сили в цій системі до одиниці площі контакту A , то для такої моделі диференціальне рівняння вільних коливань матиме вигляд

$$\frac{m}{A} \ddot{x} + \eta \cdot \dot{x} + C_{\tau_0} Ax = 0. \quad (16)$$

Виражаючи деформацію зсуву γ через x та враховуючи, що квадрат власної частини коливань $\Omega_{\tau}^2 = C_{\tau_0} \frac{A}{m}$, перепишемо рівняння (16) у вигляді:

$$\ddot{x} + \frac{A \cdot \eta}{m \cdot H} \dot{x} + \Omega_{\tau}^2 x = 0. \quad (17)$$

Прийmemo позначення

$$n = \frac{A \cdot \eta}{2m \cdot H}, \quad (18)$$

та зведемо рівняння (17) до стандартного вигляду

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \Omega_{\tau}^2 x = 0. \quad (19)$$

В цьому рівнянні n є коефіцієнт затухання, що характеризує і визначає темп зменшення амплітуди вільних коливань, рис. 6, б.

Саме цей коефіцієнт залежить від в'язкості при заданих A , m , H . Відомо [8], що коефіцієнт затухання зв'язаний із декрементом коливань простою залежністю

$$\delta = n \cdot T, \quad (20)$$

де δ – логарифмічний декремент коливань,

$$\delta = \ln \frac{X_i}{X_{i+1}}, \quad (21)$$

X_i – i -та амплітуда вільних коливань;

X_{i+1} – сусідня амплітуда вільних коливань, взята від i -тої через один період.

Період вільних коливань визначають за формулою (7):

$$T = \frac{2\pi}{\Omega_{\tau} \sqrt{1 - \frac{n^2}{\Omega_{\tau}^2}}} \quad (22)$$

Зважаючи на те, що $n^2 \ll \Omega_{\tau}^2$, допускаємо спрощення формули (22). В наслідок цього далі будемо вважати, що $T \approx 2\pi/\Omega_{\tau}$. Підставимо у співвідношення (21) вирази для n і T , враховуючи, що $\Omega_{\tau}^2 = C_{\tau_0} A/m$. Піднесемо до квадрату ліву і праву частину одержаного для δ виразу, проведемо спрощення і з цього виразу отримаємо формулу для визначення коефіцієнта в'язкості номінально нерухомого фрикційного контакту

$$\eta = \frac{G\delta}{\pi \Omega_{\tau}} \quad (23)$$

Таким чином для визначення коефіцієнта в'язкості ННФК з використанням осцилограм вільних коливань потрібно по ній визначити два параметри δ і Ω_{τ} при відомому модулі зсуву матеріалів контактних пар G .

4. Висновки

- «третє тіло» є область в ННФК, що поширюється від поверхні контакту в глибину контактних елементів, яка чинить пружний та в'язкий опір зсуву і містить продукти фретинг-зношування і обмежена в кожному елементі контакту найближчим до контактної поверхні шаром, в якому деформація зсуву дорівнює нулю;

- у випадку пружної контактної взаємодії при зсуві двох поверхонь, товщина «третього тіла» залежить тільки від модуля зсуву та тангенціальної жорсткості контакту, а при пружно-пластичному зсуві вона містить також прошарок, що складається з продуктів фретинг - зношування;

- товщина «третього тіла» змінюється із зростанням кількості циклів реверсивного тангенціального навантаження відповідно до того, як змінюється тангенціальна жорсткість контакту та накопичуються у між контактному просторі продукти фретинг - зношування;

- зведений коефіцієнт в'язкого опору у ННФК зростає із збільшенням номінальної сили тертя в контакт і зменшується із збільшенням модуля зсуву матеріалів контактних поверхонь та із зростанням товщини прошарку у між контактному просторі, що містить продукти фретинг - зношування;

- на основі виміряних з осцилограми вільних затухаючих коливань в контакт, власної частоти коливань та декремента коливань, запропонований метод визначення коефіцієнта в'язкості ННФК.

Література

1. Костогряз С.Г. Механіка вібраційного тертя у номінально нерухомому фрикційному контакті: Автореферат, дис. Д-ра технічних наук: 05.02.04. – Хмельницький, 1995. – 39 с.
2. Крагельский Н.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. – М.: «Машиностроение», 1977. – 201 с.
3. Ковалевский В.В., Костогряз С.Г. Технологические методы управления фреттинг-процессами. – К.: Общество Знание Украинской ССР, 1989. – 20 с.
4. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во: Высшая школа, 1969.– 130 с.
5. Тангенційна жорсткість та пластичність номінально нерухомого фрикційного контакту/ С.Г.Костогряз, О.В.Романішина, В.В.Мисліборський // Проблеми трибології. – 2001. – № 1. – С. 130-133.
6. Буров С. В. Влияние предварительного импульсного пластического деформирования индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, на структуру и изнашивание эвтектоидной стали // Известия Челябинского научного центра. – Вып. 4 (42). – 2008. – С. 15-20.
7. Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
8. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: «Машиностроение», 1985. – 350 с.

Надійшла 15.11.2010