

**Костогриз С.Г.,
Шалапко Ю.І.,
Слащук В.О.,
Слащук О.О.**

Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна
E-mail: slaschuk.o@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ НОМІНАЛЬНО НЕРУХОМОГО ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ ПРИ ВІБРОНАВАНТАЖЕННІ

УДК 621.2.082.18

Методом контактено-наведених згасаючих автоколивань виміряна динамічна в'язкість номінально нерухомого фрикційного контакту, що знаходиться в умовах вібраційного навантаження. Встановлено, що значення динамічної в'язкості для контакту сталевих деталей на дев'ять порядків величини перевищує в'язкість заліза та сталей у розплавах, однак є значно нижчим за відомі значення твердого заліза при нормальних умовах.

Ключові слова: динамічна в'язкість, контакт, коливання, вібрація.

Вступ

Встановлення реальної величини динамічної в'язкості номінально нерухомих фрикційних контактах необхідно для адекватного моделювання контактної динаміки у зовнішньому вібраційному полі, а також забезпечення стійкості та надійності номінально нерухомих фрикційних з'єднань в умовах вібрації [1 - 4]. Між тим, значення динамічної в'язкості, наприклад, сталевих контактних шарів практично відсутні – на відміну від ударної в'язкості сталей та динамічної в'язкості розплавів. Остання для промислових марок сталей становить вельми малу величину $\approx 4,5 - 6,0$ мПа·с (при температурах розплаву 1480-1650 °С) [5]. В той же час, даними довідникового видання [5], в'язкість твердого заліза при нормальних умовах оцінюється величиною $\sim 10^{10}$ Па·с, тобто на тринадцять порядків більшою. Такий широкий діапазон зміни динамічної в'язкості конденсованого середовища, як відомо [1], обумовлений її експоненційними залежностями від температури та тиску – однак, прямо протилежного характеру: експоненційне падіння з температурою може компенсуватись експоненційним зростанням з тиском. Оскільки в умовах динамічної контактної взаємодії значних змін зазнають як температура на плямах фактичного контакту, так і фактичний тиск, то в'язкість граничного шару тут може бути надійно встановлена лише експериментально. В даній роботі з цією метою використаний динамічний метод аналізу згасаючих контактних коливань, розглянутий раніше в роботі [5].

Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є визначення реальної величини динамічної в'язкості номінально нерухомих фрикційних контактах сталевих конструкцій.

Однією з важливих задач трибології металевих конструкцій являється моделювання контактної взаємодії номінально нерухомих фрикційних контактів в умовах вібраційного навантаження.

Виклад матеріалів досліджень

Дослідження проводились на стенді для випробувань матеріалів в умовах динамічного контактного навантаження. Установка дає можливість дослідити матеріали та покриття на довговічність і зносостійкість номінально-нерухомих з'єднань з малою амплітудою відносних переміщень за схемою: кулька-площина, площина-площина та профільних з'єднань. Технічні характеристики стенда наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічна характеристика для дослідження трибологічних властивостей матеріалів та покриттів в умовах малоамплітудного фретингу

Нормальне навантаження, P	0 ... 100 Н
Амплітуда коливань, A	5 ... 100 μm
Частота коливань, ν	100 Гц
Габарити	0,6 × 1,1 × 0,7 м
Маса	200 кг

Дослідний стенд (рис. 1) працює наступним чином. Зразок 1 жорстко закріплюється в тримачі 2. Тримач 2 являється конструктивним елементом каретки 3, що рухається по направляючих 4. Зворотно-поступальний рух забезпечує електромагніт 5, що прикріплений до направляючих 4, та система пружин 6. Направляючі 4 закріплюються на пластинах 7, які прикручені до втулки 8. Для фіксації вала 10 застосовано чотири радіально-упорні підшипники 9, розміщені всередині втулки 8. Така конструкція забезпечує підйом та опускання рухомого елемента конструкції, а підшипники даного типу обрані для сприйняття як поперечного, так і осьового навантаження. Вал 10 закріплюється на стояках 11, що в свою чергу кріпляться до станини 12. Нормальне навантаження забезпечує вантаж 13, прикріплений до направляючих 4, який розміщений безпосередньо над зоною контакту. Контр-тіло 14 розміщується на тензобалці 15, що закріплена на окремій станині 16. З метою мінімізації впливу коливань установки на результати вимірювань механічна система розташована на масивній основі вагою 200 кг [3].

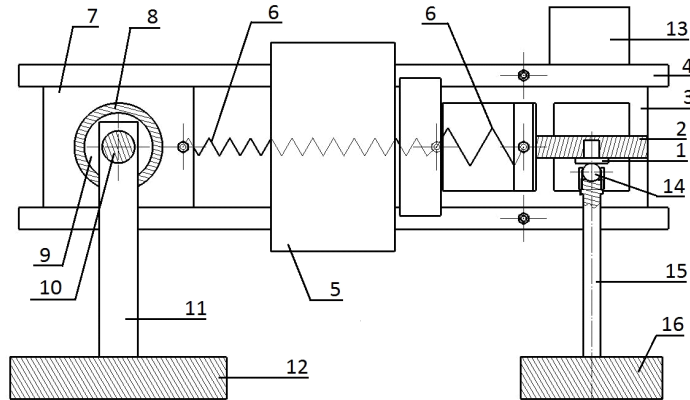


Рис. 1 – Схема дослідного стенду

Електромагніт змінного струму виконано з урахуванням максимального тягового зусилля 10 кг, що забезпечує необхідний діапазон зусиль, які прикладаються до досліджуваного контакту. Амплітуда переміщень зразка відносно контр-тіла регулюється в межах від 5 до 100 μm .

Навантаження на пару тіло-контр-зразок подається наступним чином: тангенційне знакозмінне навантаження забезпечується приводом електромагніту, а нормальне зусилля – за допомогою важільного механізму, що утворюється приводом контр-тіла та опорою конструкції. Нормальне навантаження на досліджуваний фрикційний контакт може змінюватись в межах від 0 до 100 Н. Для уникнення резонансних явищ в обладнанні передбачено систему плавного пуску генератора механічних коливань. Тангенційне навантаження визначається потужністю струму, підведеного до електромеханічної системи і складає 0 ... 200 Вт.

Дослідження проводилось за схемою площина-кулька, рис. 2.

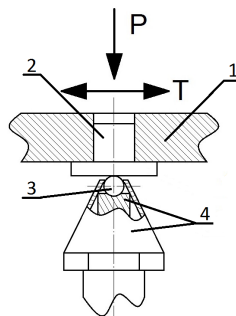
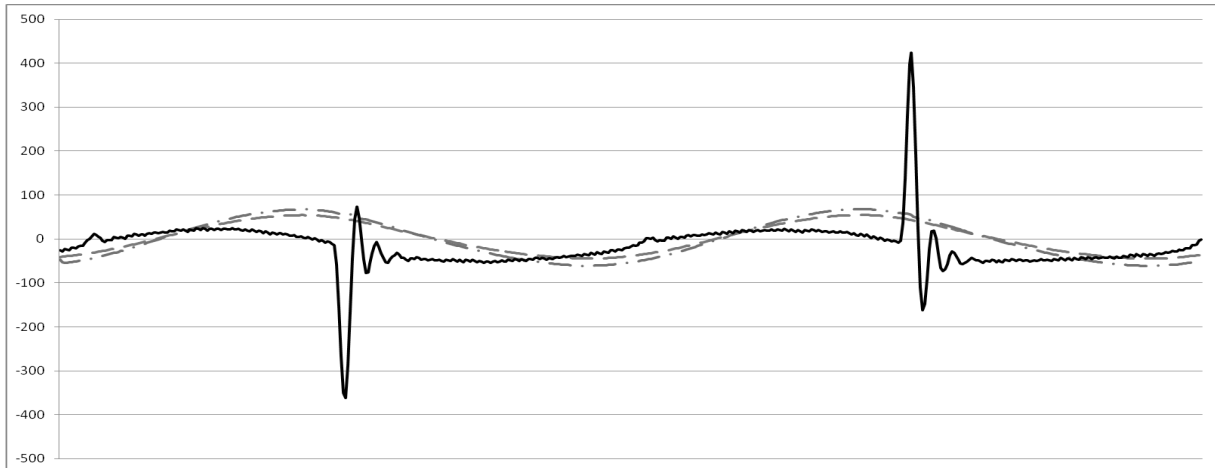


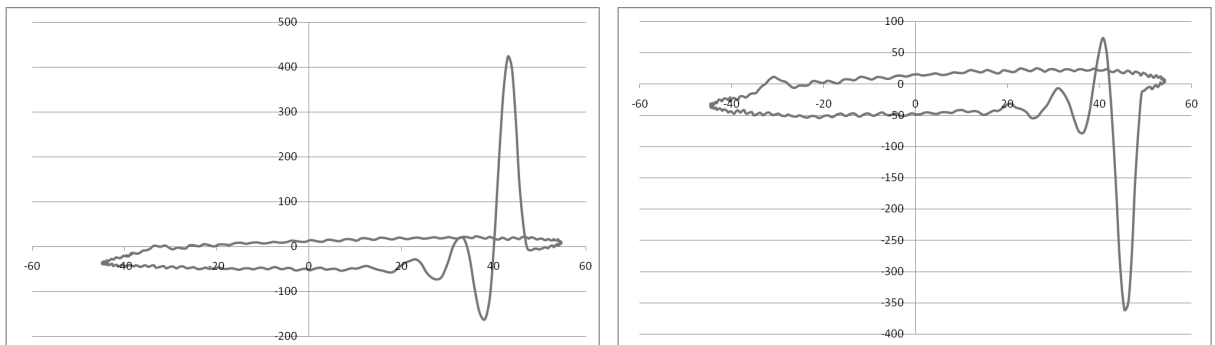
Рис. 2 – Контактна схема:
1 – зразкотримач;
2 – зразок;
3 – контр-тіло(кулька);
4 – система фіксації контр - зразка;
P – сила притиснення;
T – тангенціальне зусилля

На рис. 3 показані часові залежності зміщень двох контр-зразків та тангенційного контактного зусилля при вібронавантаженні дослідного фрикційного контакту.



**Рис. 3 – Осцилограми одержаних результатів:
пунктирний графік з точкою – переміщення зразка;
пунктирний графік – переміщення контр - зразка;
суцільний графік – контактне зусилля**

Додатково на рисунку 4 наведені відповідні петлі гістерезису в координатах: зміщення верхнього контр - зразка – тангенційне зусилля.



**Рис. 4 – Петлі гістерезису в урдинатах:
переміщення верхнього контрзразка – тангенціального зусилля**

Звертає на себе увагу "аномально" велика початкова амплітуда автоколивань, яка в декілька раз перевищує контактне зусилля в крайніх точках петлі гістерезису. Причина цього криється в самому механізмі виникнення автоколивань, який має суттєво неврівноважений характер порушення цілісності контакту при його розвантаженні. Тут значна частина запасеної енергії пружної деформації трансформується в одну з вищих мод коливань тензодатричної балки, що є основою кріплення нижчого контр-зразка. Амплітуда зміщень балки в цій моді, очевидно, припадає на середню її частину, де розміщені тензодатчики контактного зусилля. Оскільки ці датчики попередньо прокалібровані по першій згинній моді коливань балки, амплітуда яких максимальна на кінці балки (а не посередині), то прийнятий в момент контактного зриву сигнал з тензодатчиком є «аномальним» для згаданої калібровки. Величина динамічної в'язкості контакту визначається тут не по абсолютній, а по відносній величині сигналу, відтак, останнє не впливає на результати вимірювань. Тим не менш, вони отримані в межах певного спрощення реальної ситуації, а саме за умови, що загальна жорсткість послідовного з'єднання копії тіл та опорної балки близька в момент зриву до контактної жорсткості. В такому випадку можна використати розрахункову формулу, отриману квазістатичним методом в роботі [4]:

$$\eta = \frac{G \cdot \delta}{\pi \cdot \omega} \quad (1)$$

Тут η , G – динамічна в'язкість та модуль зсуву граничного контактного шару, δ , ω – відповідно логарифмічний декремент та циклічна частота згасаючих коливань.

Як показує аналіз графічних даних (рис. 3, 4), логарифмічний декремент в даному випадку не є постійною величиною і зменшується від значення $\delta \approx 2$ на початку коливань, до величини $\delta \approx 1$ в кінці коливань процесу. Це свідчить про в'язко-пластичний характер контакту, за якого на початковому етапі максимальних деформацій розсіяння енергії найбільше. В подальшому контакт дещо «вигладжується» і деформаційні втрати спадають. Щодо самої в'язкості, то вона при цьому, очевидно, зменшується – як за рахунок падіння тиску, так і за рахунок підвищення температури в процесі контактного проковзування. Величина в'язкості, розрахована з (1) за умови $\delta = 1,5 \pm 0,5$ при $\sigma = 80$ ГПа [7], становить:

$$\eta = (3 \pm 1) \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}.$$

Висновки

За результатами вимірювань може бути зроблений висновок про те, що динамічна в'язкість граничного шару в умовах вібронавантаження номінально нерухомих фрикційних контактів сталевих деталей значно перевищує в'язкість розплавів заліза та сталей, однак є значно нижчою за відомі табличні значення динамічної в'язкості твердого заліза при нормальних умовах [6]. Отримане значення η на порядок перевищує в'язкість ультратонких граничних шарів рідкого змащення, отриману в роботах [8 - 9] для режимів граничного тертя.

Література

1. Справочник по триботехнике [Текст]: В 3-х томах /Под. ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 1989.
2. Костогриз С.Г. Механіка вібраційного тертя в номінально нерухомому фрикційному контакті [Текст]: дис. д.т.н. – Хмельницький. – 1995.
3. Патент України на корисну модель №94006: Установка для випробувань матеріалів в умовах динамічного контактного навантаження./ Курской В. С., Слащук В. О., Слащук О. О.; заяв. 05.05.2014, опуб. 27.10.2014, Бюл. №20.
4. Костогриз С.Г. В'язкий опір деформації зсуву у номінально нерухомому фрикційному контакті / С.Г. Костогриз, Ю.І. Шалапко, В.В. Мисліборський // Проблеми трибології. – 2011. – №1. – С. 58-63.
5. Украинская Ассоциация Сталеплавильщиков. Линейные свойства стали. Электронный ресурс [Режим доступа]: uas.su/2011/ksitok_razdel_22.php.
6. Справочник. Таблицы физических величин / Под ред. А.И. Кикоина. – М.:Энергоатомиздат. – 1976.
7. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука. – 1965. – С. 726-730.
8. Batista A.A. Bifurcations from Steady Sliding to Stick-Slip in Bounolary Lubrication [Text] / A. Batista, I. Carlson. Phys.Review E. v.57., №5, –1998. – 4986-4996 p.
9. Berman A.D. Origin and Characterization of Different Stick-Slip Friction Mechanisms [Text] / A. Berman, W. Ducker, I. Israelachvili. The ACS I. of Surfaces and Colloids (Langmuir). v.12., №19, – 1996, 4559-4563 p.

Поступила в редакцію 05.11.2015

Kostogryz S.G., Shalapko Y.I., Slashchuk V.O., Slashchuk O.O. Definitions dynamic viscosity of nominal fixed frictional contact at the vibration loading.

The exact definition of dynamic viscosity of nominal fixed frictional contact can be obtained only from laboratory studies.

Research conducted at the stand for testing materials under dynamic contact load. Installing enables to explore materials and coating for durability and wear resistance nominal-fixed contact with small amplitude relative movements of the scheme: ball-plane, the plane-plane and profile connections.

Were obtained the waveforms, what show loop of hysteresis: movement of the sample and tangential efforts.

Note the "abnormally" large initial amplitude of oscillation, which is several times higher than the contact forces in extreme points of the hysteresis loop. Much of the accumulated elastic strain energy is transformed into one of the higher modes of oscillation, which is the basis of the lower mounting counter-sample. The value of dynamic viscosity of contact is determined by the relative magnitude of the signal. It does not affect the outcome of the study.

It can be concluded, that dynamic viscosity of contact in terms of vibration load stationary frictional contact steel parts far exceeds the viscosity of melts iron and steel, but is significantly lower than the known tabulated values of dynamic viscosity solid iron under normal conditions. This value the viscosity of the order exceeds ultra-thin layer of liquid lubrication limit for modes of boundary friction.

Key words: dynamic viscosity, contact, vibration.

References

1. Spravochnyk po trybotekhnike. V 3-kh tomakh /Pod. red. M.Khebды, A.V.Chychynadze. M.:Mashynostroenyе. 1989.
2. Kostohryz S.H. Mekhanika vibratsiynoho tertya v nominal'no nerukhomomu fryktsiynomu kontakti. dys. d.t.n. Khmel'nyts'kyy. 1995.
3. Patent Ukrainy na korysnu model' #94006: Ustanovka dlya vyprobuvan' materialiv v umovakh dynamichnoho kontaktnoho navantazhennya. Kurskoy V. S., Slashchuk V. O., Slashchuk O. O.; zayav. 05.05.2014, opub. 27.10.2014, Byul. #20.
4. Kostohryz S.H., Shalapko Yu.I., Myslibors'kyy V.V. V'yazkyi opir deformatsiyi zsuvu u nominal'no nerukhomomu fryktsiynomu kontakti. Problemy trybolohiyi. 2011. №1. S. 58-63.
5. Ukraynskaya Assotsyatsyya Staleplavyl'shchykov. Lyneynyye svoystva staly. Elektronniy resurs [Rezhym dostupu]: uas.su/2011/ksitok razdel_22.php.
6. Spravochnyk. Tablytsy fizycheskykh velychyn. Pod red. A.Y.Kykoyna. M.:Energoatomizdat. 1976.
7. Belyaev N.M. Soprotivlenye materyalov .M.:Nauka.,1965. S. 726-730.
8. Bifurcations from Steady Sliding to Stick-Slip in Bounolary Lubrication. A. Batista, I. Carlson. Phys.Review E. v.57., №5,1998, 4986-4996 p.
9. Origin and Characterization of Different Stick-Slip Friction Mechanisms. A. Berman, W. Ducker, I. Israelachvili. The ACS I. of Surfaces and Colloids (Langmuir). v.12., №19, -1996, 4559-4563 p.