

УДК 622.245.002.4.

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЧАСТОТИ НАВАНТАЖЕННЯ НА КОНТАКТНУ ВТОМУ СТАЛЕЙ 20ХН3А і ШХ15 ЗА ДІЇ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ

Б. П. ЧАЙКОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, В. І. КИРИЛІВ<sup>2</sup>, В. Р. ДУТКА<sup>1</sup>, Б. Р. ЦІЖ<sup>1</sup>,  
О. В. МАКСИМІВ<sup>2</sup>, Б. М. МИКИЧАК<sup>1</sup>, П. Я. СИДОР<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій  
ім. С. З. Гжицького;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено вплив температури робочого середовища та частоти навантаження на контактну втому сталей 20ХН3А і ШХ15 в оливі та 3%-му водному розчині NaCl. Показано, що зі збільшенням частоти навантажень контактна втома сталей підвищується в 3%-му водному розчині NaCl і не змінюється в оливі, а зі зростанням температури – знижується в 3%-му водному розчині NaCl та майже не змінюється в оливі. Показано, що така поведінка досліджуваних сталей зумовлена дією компонентів робочих середовищ та їх концентрацією у поверхневих шарах під час випробувань.

**Ключові слова:** контактна втома, сталі 20ХН3А і ШХ15, температура, частота навантаження, робочі середовища.

**Вступ.** Важливою експлуатаційною характеристикою низки деталей машин і механізмів (підшипники кочення, бурові долота, валки прокатних станів, зубчасті передачі тощо) є опір контактній втомі. Для виготовлення цих деталей часто використовують сталь 20ХН3А після цементації, гартування і низького відпуску (деталі бурильних доліт) та сталь ШХ15 після гартування з низьким відпуском (кільця підшипників кочення). Їх експлуатують за різних частот навантаження, дії агресивних середовищ [1, 2] та підвищених температур. За таких умов та великих контактних навантажень можливе насичення поверхні складниками робочих середовищ, які розпадаються внаслідок термо- і механодеструкції, зокрема, воднем, киснем та вуглецем. Вони насичують поверхневий шар у результаті масоперенесення в умовах швидкісної пластичної деформації [3] і впливають на його опір контактній втомі. За таких умов ці елементи розміщуються в основному на межах зерен і по-різному впливають на опірність матеріалу робочим навантаженням.

Мета роботи – дослідити вплив температури та частоти навантаження на контактну втому сталей 20ХН3А і ШХ15 за дії робочих середовищ та після попереднього наводнювання.

**Методики досліджень.** Контактну втому сталей досліджували на модернізованій установці МКВ-К з регульованою частотою обертання зразка та робочого навантаження, а також за підвищених температур середовища. Дводискову схему навантаження установки показано на рис. 1а. Регульовані частота обертання зразка і робоче навантаження здійснюються від випробувального диска діаметром 150 мм. Диск запускають двигуном постійного струму, який через фрикційний контакт передає його зразку, одночасно збільшуючи частоту його обертання пропорційно до відношення їх діаметрів (150/10). Частоту обертання зразка змі-

нювали у діапазоні 10...250 Hz, а температуру поданої в зону контакту рідини – в межах 20...95°C. З появою пітинга в зоні контакту машина вимикається автоматично. Випробовували циліндричні зразки діаметром робочої частини 10 mm після цементації (20ХН3А) та гартування і відпуску при 150°C (ШХ15) з твердістю HRC 60...62 в обох випадках. Як робочі середовища використовували оливу “Індустріальну 50” та 3%-й водний розчин NaCl.

Попередньо зразки зі сталі 20ХН3А наводнювали катодною поляризацією впродовж 20 min у 10%-му розчині  $H_2SO_4$  за густини катодного струму  $i_c = 500 A/m^2$ . Після експериментів на контактну втому кількісно визначали вміст у поверхневому шарі водню, кисню та вуглецю, використовуючи локальний мас-спектральний аналіз [4], який дає можливість визначати їх концентрацію на ділянках поверхні металу площею 100...200  $\mu m^2$ . Окремо виділяли ділянки в центрі та на краю доріжки кочення.

**Результати експериментів та їх обговорення.** Під час випробувань сталі ШХ15 тріщина зароджується з поверхні на краю доріжки кочення (рис. 1b). Це зумовлено дією зовнішнього дотичного навантаження, яке становить 1/3 від нормального [5]. Ділянка максимальних дотичних напружень переміщується з глибини на поверхню і вперед на відстань  $0,3b$  від центру доріжки кочення (де  $b$  – ширина доріжки кочення). Крім цього, встановлено, що за коефіцієнта тертя  $f \geq 0,111$  абсолютний максимум напружень зрізу є на поверхні, а за  $f \leq 0,111$  максимум дотичних напружень – вглибині, під поверхнею контакту [5]. Підтверджено це дослідженнями та працею [6] під час випробувань на контактну втому сталі 12ХН3А з поверхневою наноструктурою, яка має понижений коефіцієнт тертя [7].

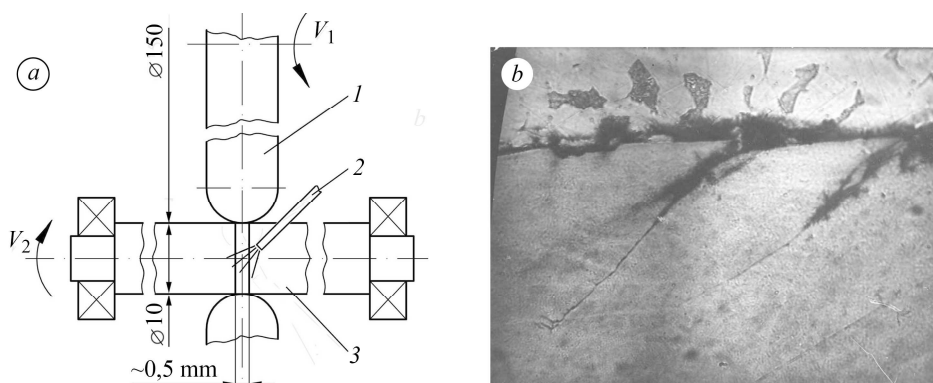


Рис. 1. Схема випробувань (а: 1 – навантажувальний диск; 2 – подача рідини; 3 – зразок;  $V_1$  та  $V_2$  – швидкість обертання диска та зразка, відповідно) та місце зародження тріщини (b) в сталі ШХ15 на краю доріжки кочення за випробувань у мінеральній оливі ( $\times 200$ ).

Fig. 1. Test scheme (a: 1 – loading disk; 2 – liquid supply; 3 – specimen;  $V_1$  and  $V_2$  – disk and specimen rotational speed; and the place of crack initiation (b) in the SHX15 steel on the roller race edge under testing in the mineral oil ( $\times 200$ ).

Загалом вплив робочого середовища залежить від особливостей перерозподілу водню, вуглецю і кисню у поверхневих шарах зразків та виду середовища, яке діє на локальні концентрації на доріжці кочення (рис. 2).

Концентрації водню в центрі доріжки кочення за випробувань у 3% водному розчині NaCl та оливі не відрізняються, хоча на краю доріжки різниця становить  $\sim 20\%$ . В оливі на краю доріжки кочення концентрація водню дещо вища порівняно з центром, що пояснюється напруженнями розтягу (рис. 2a). У 3%-му водному розчині NaCl водню на краю доріжки суттєво більше. Це пояснюють ви-

щою стабільністю оливи до термо- і механодеструкції. Майже аналогічна ситуація з вуглецем за випробувань у 3% NaCl (рис. 2b). Його концентрація на краю доріжки кочення вища, ніж у центрі, а у центрі нижча, ніж у вихідному матеріалі. Очевидно, зважаючи на склад середовища, тут відбувається перерозподіл вуглецю. У центрі доріжки кочення його кількість зменшується, а на краю збільшується. В оливі його кількість підвищується і в центрі, і на краю доріжки кочення, а різниця між ними мінімальна.

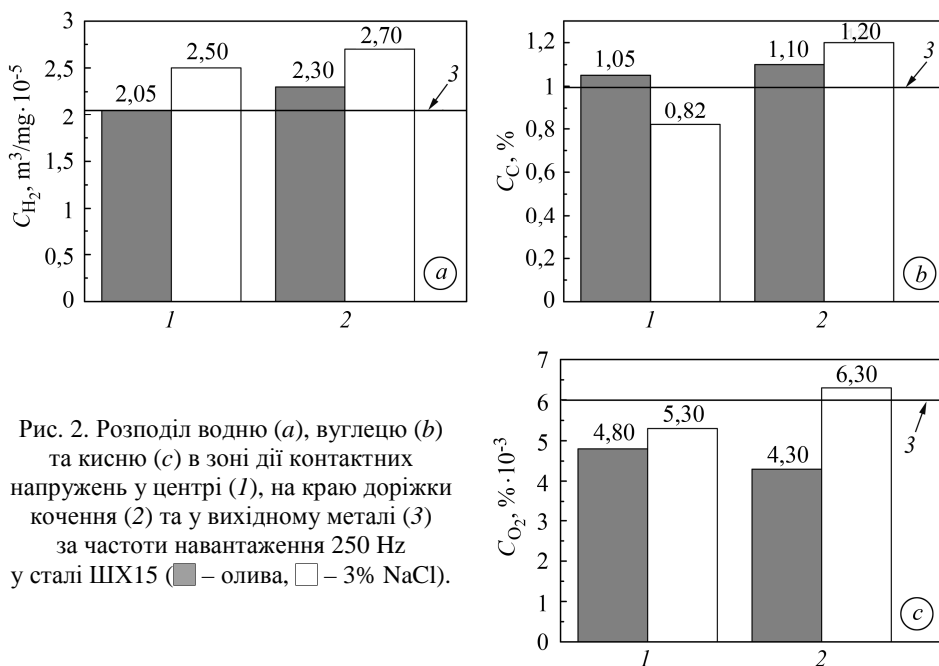


Рис. 2. Розподіл водню (a), вуглецю (b) та кисню (c) в зоні дії контактних напружень у центрі (1), на краю доріжки кочення (2) та у вихідному металі (3) за частоти навантаження 250 Hz у сталі ШХ15 (■ – олива, □ – 3% NaCl).

Fig. 2. Distribution of hydrogen (a), carbon (b) and oxygen (c) in the zone of contact loads action in the roller race center (1), on the roller race edge (2) and in the as-received metal (3) of SHX15 steel at the loading frequency of 250 Hz (■ – oil, □ – 3% NaCl).

Дещо інша ситуація з киснем (рис. 2c). На краю доріжки кочення різниця концентрацій для водного розчину досягає майже 50%, у центрі вона нижча, а на краю доріжки вища, ніж для вихідного стану. Для оливи в обох випадках концентрації є нижчі, ніж у вихідному матеріалі. Згідно з працею [8], кисень є “шкідливим” елементом. За умов високошвидкісного пластичного деформування він розміщується в основному на межах зерен і знаходиться в особливому стані взаємодії з металами без утворення оксидів [9]. Кисень впливає найсильніше і його концентрація зростає найбільше. Порівняно з вихідним станом концентрація елементів змінюється і кисень на краю доріжки кочення досягає найвищого значення. З підвищенням температури і зниженням частоти його концентрація зростатиме [3] і відповідно інтенсивніше впливатиме на контактну втому, знижуючи її.

З підвищенням температури контактна втома в 3%-му водному розчині NaCl знижується для обох сталей, причому інтенсивніше для сталі ШХ15 (табл. 1). Очевидно, це пов'язано з вищим контактним навантаженням під час випробувань, що відповідно інтенсифікуватиме термо- і механодеструкцію і підвищуватиме концентрацію як кисню, так і водню. За випробування в оливі опір контактній втомі майже не змінюється. Це пов'язано з вищою (порівняно з 3%-им NaCl) стабільністю оливи до термо- та механодеструкції.

**Таблиця 1. Вплив температури робочого середовища на контактну втому сталей 20ХН3А і ШХ15**

Середовище	Кількість циклів до появи пітинга, $\times 10^6$							
	ШХ15, $\sigma = 4000$ МПа				20ХН3А, $\sigma = 3500$ МПа			
	Температура робочого середовища, К							
	293	323	343	368	293	323	343	368
3%-ий розчин NaCl	0,36	0,25	0,23	0,13	0,55	0,47	0,35	0,26
Олива "Індустріальна 50"	7,5	9,1	6,5	8,2	55,2	50,8	51,2	54,3

З підвищенням температури кількість кисню в результаті термодеструкції зростатиме [3] інтенсивніше у воді, ніж в оливі, оскільки остання має вищу термічну стабільність.

Зі збільшенням частоти навантаження опір контактній втомі в оливі не змінюється, а в 3%-му розчині NaCl і для попередньо наводнених зразків вона зростає (табл. 2). Порівняння контактної втоми попередньо наводненої сталі 20ХН3А в мінеральній оливі та 3%-му водному розчині NaCl показують, що на неї впливає головно дифузійно-рухливий водень (рис. 2а). Зниження контактної втоми зі зменшенням частоти можна пояснити так: за низьких частот це пов'язано з гальмуванням проникнення в сталь водню внаслідок окиснення поверхні присутніми в середовищі домішками кисню, що запобігає адсорбції водню; за високих частот дифузія водню відстає від швидкості переміщення зони тривісних розтягувальних навантажень біля вершини тріщини і не забезпечується його постачання в ці зони в достатній кількості. За випробувань в 3%-му водному розчині NaCl зниження контактної втоми зі зменшенням частоти випробувань можна пояснити підвищенням концентрації водню та кисню шляхом їх масоперенесення з робочого середовища. Наводнені зразки випробувані в оливі поведуться подібно до випробувань у 3%-му водному розчині NaCl. Однак інактивне середовище забезпечує вищу контактну втому.

**Таблиця 2. Вплив частоти навантаження на контактну втому сталі 20ХН3А ( $\sigma = 4000$  МПа)**

Частота навантаження, Hz	Кількість циклів до появи пітинга, $\times 10^6$		
	Олива "Індустріальна 50"		3%-ий розчин NaCl
	Вихідні зразки	Наводнені зразки	
10	15,1	7,5	0,05
30	15,4	9,8	0,06
50	15,2	12,2	0,08
100	14,8	15,2	0,09
250	15,2	15,6	0,1

Таким чином, шкідливими елементами середовища є водень і кисень. Причому, як показано раніше [10], у водному середовищі концентрації цих елементів вищі, ніж в оливі, що пришвидшує руйнування зміцненого поверхневого шару. Це підтверджено і в працях [9, 11], де виявлено, що під час тертя у воді деформація поверхневих шарів металу супроводжується насиченням прилеглих областей структурних фрагментів не тільки атомами вуглецю, але і атомами кисню, які

проникають в метал з робочого середовища через термомеханічну деструкцію молекул води у точках контакту мікронерівностей. Це призводить до виникнення у приміжових областях структурних фрагментів метастабільних атомних кластерів Fe–O–C, що є октапорою ОЦК-заліза, у центрі якої знаходиться атом кисню, а два атоми заліза на вершинах заміщені атомами вуглецю. Ці кластери та атоми заліза кристалічної ґратки розділяють області з пониженою електронною густиною, які виникають у результаті зниження електронної густини s- і p-електронів та збільшення просторової локалізації валентних d-електронів на атомах заліза, які оточують атоми кисню і вуглецю. Це призводить до обмеженої участі валентних електронів у формуванні зв'язків між атомами заліза кристалічної ґратки та атомами кластерів і, як наслідок, відносно легкого їх руйнування під час зміщення структурних елементів уздовж утворених кластерами меж [9, 11].

Отже, під час роботи деталей в оливі температура і частота навантаження не впливають на контактну втому сталей. За використання водного агресивного середовища з підвищенням температури і зменшенням частоти опір контактній втомі знижується. Це необхідно враховувати для бурових доліт, які працюють у водних середовищах за різних частот в умовах роторного чи турбінного буріння.

### ВИСНОВКИ

Дослідження показали, що контактна втома сталей 20ХН3А і ШХ15 в оливі зі зміною температури і частоти навантаження майже не змінюється. Водночас у 3%-му водному розчині NaCl з підвищенням температури та зменшенням частоти навантаження контактна втома знижується через поліпшення умов для проникнення елементів розкладу середовища у поверхневі шари металу.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано влияние температуры и частоты нагружения на контактную усталость сталей 20ХН3А и ШХ15 в масле и 3%-ом водном растворе NaCl. Показано, что с увеличением частоты нагружения контактная усталость сталей повышается в 3%-ом водном растворе NaCl и не изменяется в масле, а с ростом температуры – снижается в 3%-ом водном растворе NaCl и почти не изменяется в масле. Показано, что на эти зависимости влияют элементы рабочих сред и их концентрация в поверхностных слоях во время испытаний.

**Ключевые слова:** *контактная усталость, стали 20ХН3А и ШХ15, температура, частота нагружения, рабочие среды.*

*SUMMARY.* The influence of temperature of the working medium and the loading frequency on contact fatigue of 20ХН3А and ШХ15 steels in oil and 3% NaCl water solution is studied. It is shown that with increase of the frequency the contact fatigue of steels increases in 3% NaCl water solution and does not change in oil while with temperature increase – decreases in 3% NaCl water solution and almost does not change in oil. It is also shown that such behavior of studied steels is due to action of the components of the working media and their concentration in the near-surface layers in testing.

**Keywords:** *contact fatigue, 20ХН3А steel, ШХ15 steel, temperature, cycling load, working media.*

### *Роботу частково виконано за підтримки проекту 0119U002280 МОН України.*

1. *Контактна втома сталей 20ХН3А та 55СМФА з поверхневим наноструктурним шаром у корозивно-абразивних середовищах / В. І. Кирилів, Б. П. Чайковський, О. В. Максимів, А. В. Шалько // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 4. – С. 78–83.*

*(Contact fatigue of 20KhN3A and 55SMFA steels with surface nanostructured layers in corrosive-abrasive media / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikovs'kyi, O. V. Maksymiv, A. V. Shal'ko // Materials Science. – 2018. – 53, № 4. – P. 508–513.)*

2. *Fatigue and corrosion fatigue of the roll steels with surface nanostructure / V. Kyryliv, B. Chaikovs'kyi, O. Maksymiv, B. Mykychak // J. of Nano Research. – 2018. – 51. – P. 92–97.*
3. *Герцрикен Д. С., Мазанко В. Ф., Фальченко В. М. Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах. – К.: Наук. думка, 1991. – 208 с.*

4. *Введение в физику поверхности* / К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин, А. В. Зотов, М. Катаяма. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
5. *Пинегин С. В.* Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 244 с.
6. *Контактна втома сталі 20ХН3А з поверхневою наноструктурою* / В. І. Кирилів, Б. П. Чайковський, О. В. Максимів, А. В. Шалько // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 6. – С. 75–79.  
(*Contact fatigue of 20KH3A steel with surface nanostructure* / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikovs'kyi, O. V. Maksymiv, A. V. Shal'ko // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 6. – P. 833–838.)
7. *Wear resistance of the surface nanocrystalline structure under an action of diethylene glycol medium* / Н. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Dovhnyuk // *Applied Nanoscience*. – 2019. – **9**, № 5. – P. 1085–1090.
8. *Гликман К. Э., Брувер Р. Э.* Равновесная сегрегация на границах зерен и интеркристаллитная хладноломкость твердых растворов // *Металлофизика*. – 1972. – **43**, вып. 42. – С. 42–63.
9. *Горский В. В.* Физическая природа и свойства легированных кислородом сплавов Ме–Ме'–О в зоне контакта металлов при трении: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Киев, 1989. – 41 с.
10. *Influence of Hydrogen on the Mechanical Properties of Steels with the Surface Nanostructure* / Н. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. Kyryliv, O. Maksymiv // *Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies. Springer Proceedings in Physics*. – 2015. – **167**. – P. 457–465.
11. *Тихонович В. В.* Роль активных элементов рабочей среды в формировании наноструктурных износостойких поверхностных слоев трения стали // Тезисы IV Междун. науч. конф. “Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии” НАНСИС-2013 (19–22 ноября 2013, Киев). – С. 575.

*Одержано 12.04.2019*