

УДК 620.178.112:339.788

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОТРИВКОСТІ ВИСОКОАЗОТНИХ СТАЛЕЙ ЗА УМОВ СУХОГО ТЕРТЯ КОВЗАННЯ

О. І. БАЛИЦЬКИЙ¹, В. О. КОЛЕСНИКОВ², Я. ЕЛІАШ³

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, Луганськ;

³ Західнопоморський технологічний університет, Щецін, Польща

Встановлено інтенсивність руйнування високоазотних марганцевих сталей під час сухого тертя кочення з проковзуванням за навантажень від 40 до 60 kg. Під час тертя спостерігали зменшення інтенсивності зношування зі збільшенням навантаження, що пов'язано з припрацюванням матеріалів. Важливим чинником, що запобігає інтенсивному зношуванню сплавів, є пасивувальна плівка, яка відновлюється під час тертя за присутності кисню. Під час схоплювання розміри продуктів зношування за навантаження 50 kg становлять 30...50 μm . На поверхні тертя в зонах виривів спостерігають підвищений вміст карбідоутворювальних елементів, що свідчить про інтенсивне руйнування матеріалу біля цих елементів.

Ключові слова: водень, тертя, зношування, окрихчення, мікротвердість, коефіцієнт тертя, метали.

Нові можливості використання високоазотних марганцевих сталей як триботехнічних матеріалів відкриваються завдяки підвищеним фізико-механічним властивостям ($\sigma_B = 1000 \dots 1300 \text{ MPa}$, $\sigma_T = 400 \dots 1000 \text{ MPa}$, $K_{IC} = 400 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$) [1–4]. Дослідження за умов сухого тертя мають прикладне значення: їх результати можна порівнювати з інтенсивністю зношування інших сплавів в аналогічних умовах (за сухого тертя інтенсивність зношування вища, ніж за граничного); інтенсивність руйнування вивчають, порівнюючи морфологію продуктів зношування (за цих умов на руйнування сплавів не впливають змашувально-охолоджувальні речовини); сухе тертя можна розглядати як граничний випадок тертя в умовах змашування, коли зникає змашувальний матеріал з поверхонь трибоз'єднання і пара тертя тривало працює в таких умовах.

Матеріали та методика експерименту. Досліджували триботехнічні властивості високоазотних сталей за сухого тертя (ролик по ролику). Зносотривкість вивчали на машині тертя СМТ-1 (2070). Швидкість ковзання нижнього ролика 1480 RPM, а верхнього – 1240 RPM (проковзування 15%). Нижній ролик ($\varnothing 42 \text{ mm}$) виготовлений зі сталі 1.0503 (сплав № 3) з твердістю 55 HRC (позначення згідно з DIN), яка є аналогом сталі 45, а верхній ролик – з високоазотних сталей з твердістю 45...50 HRC (сплав № 1 типу DDT 68) та з твердістю 52...60 HRC (сплав № 2 типу Р 900). Хімічний їх склад наведено в таблиці.

Досліджувані сталі припрацьовувались за поступового збільшення навантаження до стабілізації моменту тертя. Лінійна швидкість верхнього ролика 2,27 m/s, а нижнього 3,08 m/s. Під час сухого тертя навантаження становило 40, 50, 60 kg.

У мікроструктурі сплавів № 1, 2 зафіксовано аустенітну металеву матрицю мікротвердістю 4,2...5,0 GPa.

Високоазотні сталі виготовляють з електродів, виплавлених у дуговій печі, які для поліпшення чистоти переплавляють на установках електрошлакового пе-

Контактна особа: О. І. БАЛИЦЬКИЙ, e-mail: balitski@ipm.lviv.ua

Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка (згідно з DIN)	Вміст елементів, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N
Сплав № 1 (DDT 68)	0,06	0,52	19,4	17,5	0,13	2,08	0,14	0,97
Сплав № 2 (P 900)	0,08	0,38	19,0	17,8	1,18	0,13	0,12	0,58
Сплав № 3 (1.0503)*	0,42...0,5	0,17...0,37	–	0,25	0,25	–	–	–

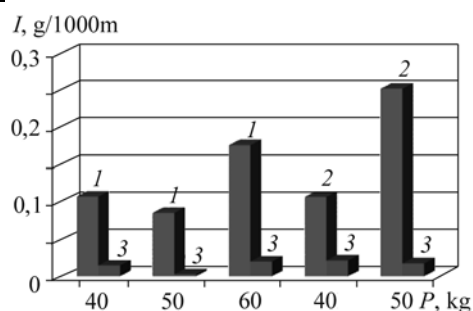
* S до 0,04%; P до 0,035; C до 0,5; Cu до 0,25; As до 0,08.

реплаву за підвищеного тиску. Обточивши заготовки, зразки піддають дифузійному відпалу, а далі – холодному зміцненню. Потім відпалюють для зняття напружень та обробляють. Холодна пластична деформація зразків може сягати до 60%. Металографічні дослідження (в т. ч. продуктів зношування) та вимірювання мікротвердості поверхневого шару проводили на мікроскопі Neophot 2, використовуючи комп'ютер та цифровий фотоапарат Canon EOS 30D. Поверхні тертя обстежували на електронному мікроскопі EVO-40XVP зі системою мікроаналізу INCA Energy 350. Рентгеноструктурний аналіз проводили на установці ДРОН-2.

Результати досліджень та їх обговорення. Перед вивченням сплави припрацьовували, навантаження при цьому змінювали від меншого до більшого. Подальше припрацювання сплаву № 1 сприяло зменшенню інтенсивності його зношування навіть за збільшення навантаження від 40 до 50 kg (рис. 1). За навантаження 40 kg схоплювання сплавів не спостерігали, їх тертя відбувалось у стабільному режимі без значних коливань коефіцієнта тертя. Зі збільшенням навантаження до 50 kg для сплаву № 2 спостерігали інтенсивне теплове схоплювання та зростання інтенсивності зношування (рис. 1).

Рис. 1. Результати досліджень інтенсивності зношування під час сухого тертя за різних навантажень: 1 – сплав № 1 (сталь типу DDT 68); 2 – сплав № 2 (сталь типу P 900); 3 – сплав № 3 (сталь 1.0503).

Fig. 1. Investigation results of the wear intensity under dry friction for different loading: 1 – alloy № 1 (DDT 68 steel); 2 – alloy № 2 (R 900 steel); 3 – alloy № 3 (1.0503 steel).



Якщо порівняти хімічний склад сплавів № 1 та № 2, то сплав № 1 містить більшу кількість Мо та меншу кількість Ні (див. таблицю). Як відомо, Мо зміцнює твердий розчин (металеву матрицю) та входить до складу карбідів, а Ні сприяє підвищенню в'язкості руйнування та пластичності сплавів [5, 6], що може істотно впливати на триботехнічні властивості. За умов тертя суттєвий вплив мають процеси, що відбуваються в приповерхневих шарах сплавів, зокрема, здатність сплавів зміцнюватись (і, відповідно, збільшувати твердість приповерхневих шарів) за навантаження та чинити опір зношуванню [7].

Зміна властивостей аустеніту за легування добре узгоджується з відомими теоретичними підходами до зміцнення твердих розчинів. Для елементів втілення (C, N) та заміщення (Mn, V, Co, Mo, W, Al, Cr, Ni, Si) ефективність зміцнення за однакових значень Δa різна (Δa – параметр ґратки). Найбільше зміцнюють аустеніт елементи втілення, особливо азот. На відміну від α -заліза розчинність азоту в легованому аустеніті значно вища і може перевищувати 1% за кімнатної температури [8]. Сплав № 1 містить азоту найбільше. Хромомарганцевий аустеніт армують карбіди та нітриди. В сплаві № 1 виявили нітриди хрому, які розташовані

переважно на межах зерен. Як відомо, нітриди хрому (існують дві нітридні фази – Cr_2N (гексагональна структура) і CrN (B1–NaCl структура [9])) мають високу твердість (до 25 GPa), яка значно перевищує твердість металевої матриці. А відтак, реалізується схема Шарпі, коли в металевій матриці розташовані тверді вclusions, що сприяє підвищеній зносотривкості. Нітриди хрому армують металеву аустенітну матрицю, що сприяє поліпшенню міцнісних характеристик. Але вони також знижують вміст хрому в твердому розчині, що, ймовірно, призведе до зменшення його в пасивувальній плівці на поверхні. Для нікелевого аустеніту за деформації $\epsilon = 50\%$ твердість підвищується у 1,5 рази, а для марганцевого – в 2,6 рази. Це обумовлено тим, що в марганцевому аустеніті енергія дефектів упаковки значно менша, ніж у нікелевому.

Рухливість дислокацій (їх здатність до поперечного ковзання) залежить від енергії дефекту упаковки (цей чинник відіграє у зміцненні сплавів суттєвішу роль, ніж взаємодія дислокацій з атомами втілення). Під впливом Mn відбувається перерозподіл зовнішніх електронів від атомів заліза до атомів марганцю, внаслідок чого d-електрони атомів заліза беруть більшу участь у зв'язках. Зміна характеру просторового розподілу електронів є основним чинником у формуванні властивостей залізомарганцевих сплавів [8–11].

Таким чином, змінюючи вміст легувальних елементів, можна значно впливати на характер руйнування цих сплавів під час тертя.

Досліджувані сплави є нержавними сталями, на поверхні яких знаходиться пасивувальна оксидна плівка товщиною 1...5 nm з підвищеним вмістом хрому. Вона суцільна та хімічно стабільна навіть тоді, коли поверхневі шари абсорбували значну кількість кисню. Крім того, якщо на поверхні кисню достатньо, то захисний оксидний шар може самовідновлюватись в результаті взаємодії атмосферного кисню та хрому [12].

Змашувальні матеріали значно зменшують зношування деталей найчастіше за малих деформацій, коли, згідно з ефектом Ребіндера, вони окислюють та пластифікують метал. При цьому окислювальні плівки захищають поверхню від схоплювання, особливо, коли їх твердість нижча від твердості основного металу і вони можуть деформуватись не руйнуючись [13].

За допомогою локального рентгеноспектрального аналізу встановили, що на поверхні тертя є кисень (рис. 2a, 3), який входить до складу пасивувальних плівок, що гальмують на початкових етапах інтенсивне зношування поверхневих шарів. Вміст кисню 10 mass.% та 26 at.%, хрому – 17,54 та 14,37%, відповідно. Пасивувальна плівка завтовшки 2...3 nm містить оксид хрому і її міцність зростає зі збільшенням вмісту хрому. Аналіз зроблено з поверхонь без значних пошкоджень, внаслідок чого маємо гладку поверхню (ділянка I, рис. 2a), та зі значним пошкодженням (ділянка II, рис. 2a) під час тертя. Таким чином, на поверхні ролика знаходиться плівка, що містить кисень та хром.

На поверхні, де є гладкий мікрорельєф (ділянка I, рис. 2a), міститься значна кількість азоту, який може бути як у твердому розчині, так і у складі нітридів. Проте поруч є зруйнована ділянка II, з якої відокремлювався матеріал під час схоплювання, і на ній азот не зафіксовано. Натомість, за результатами локального аналізу, там є велика концентрація молібдену та кисню (26 та 24 mass.%). Ймовірно, тут розташований карбід молібдену, а це може бути доказом того, що руйнування сплаву (вирив матеріалу) під час інтенсивного схоплювання відбувається в крихких карбідах. Підвищений вміст кисню можна пояснити створенням у місці вириву пасивувальної плівки.

На рис. 2b показано продукти зношування сплаву № 2, які утворились під час схоплювання за навантаження 50 kg. На поверхні частинок I, IV, V практично немає гладких ділянок і притаманний ступінчастий мікрорельєф, що вказує на

крихкий характер руйнування. Але поверхня частинки II гладка. Розміри усіх цих частинок 30...70 μm .

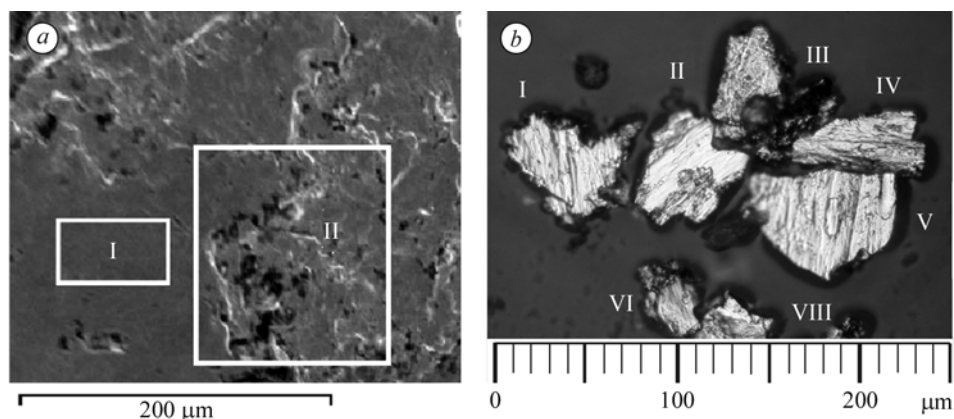
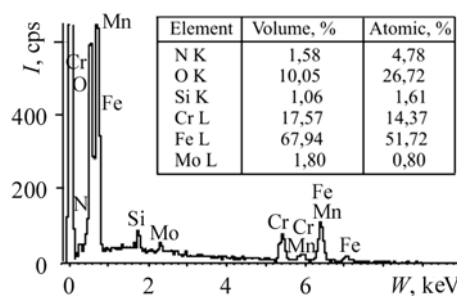


Рис. 2. Поверхня тертя сплаву № 1 після інтенсивного теплового схоплювання (а: I – без пошкодження; II – з пошкодженням) та продукти зношування сплаву № 2, викришені під час інтенсивного схоплювання ($P = 50 \text{ kg}$) (b: I–VII – номери частинок).

Fig. 2. Friction surface of alloy № 1 after intensive thermal setting (a: I – surface without damage; II – with damage) and wear products of alloy № 2, crumbled out during intensive setting ($P = 50 \text{ kg}$) (b: I–VII – particles numbers).

Рис. 3. Спектри (з дисперсією за енергією) характеристичного рентгенівського випромінювання (EDX) елементів, збудженого електронним зондом з поверхні тертя зразків сталі DDT 68 (сплав № 1).

Fig. 3. Spectra (with energy dispersion) of characteristic X-ray photography irradiation (EDX) of elements, excited by an electron probe from the friction surface of DDT 68 steel specimens (alloy № 1).



Серед надважливих властивостей пасивувальної плівки є відсутність фазових перетворень, які можуть бути причиною утворення мікротріщин, що руйнують захисну плівку [14]. Це дуже важливо для сплавів, які працюють в умовах тертя, оскільки змащувальні матеріали значно зменшують зношування деталей найчастіше за малих деформацій, коли, згідно з ефектом Ребіндера, вони окислюють та пластифікують метал, але на стадії припрацювання інколи сприяють розвитку мікротріщин [13].

Підвищену зносотривкість сплаву № 1 порівняно зі сплавом № 2 можна пояснити присутністю нітридів хрому. Сплави з нанокристалічним покритвом на основі хрому мають низький коефіцієнт тертя та менше зношування [15].

ВИСНОВКИ

Таким чином, зниження інтенсивності зношування зі зростанням навантаження обумовлене кількома чинниками, а саме: припрацьованістю досліджуваних сплавів, структурною адаптованістю; зміцненням поверхні тертя; виникненням нових кисневих плівок, які частково “заліковують” відкриті поверхні тертя (з яких відокремились частинки зношування) та мінімізують інтенсивність руйнування. На поверхні тертя в зонах виривів спостерігають підвищений вміст карбидоутворювальних елементів, що свідчить про інтенсивне руйнування матеріалу в зоні підвищеної концентрації цих елементів.

РЕЗЮМЕ. Определена интенсивность разрушения высокоазотных марганцевых сталей в условиях сухого трения качения с проскальзыванием при нагрузке от 40 до 60 kg. В условиях трения наблюдали уменьшение интенсивности изнашивания при увеличении нагрузки, что связано с прирабатываемостью сплавов. Важным фактором, сдерживающим сплавы от интенсивного изнашивания, является пассивирующая пленка, которая может возобновляться в условиях трения за счет присутствия кислорода. При схватывании размеры продуктов изнашивания при нагрузке 50 kg равны 30...50 μm . На поверхности трения в зонах вырывания наблюдают повышенное содержание карбидообразующих элементов, что свидетельствует об интенсивном разрушении материала возле этих элементов.

SUMMARY. The intensity of high-nitrogen Mn steels fracture under dry rolling friction with sliding for loads of 40 to 60 kg is established. During friction the decrease of wear intensity with the loading growth, related with material operation was observed. The important factor that prevents the intensive wear of alloys is the passivation film, that is reduced under friction in the oxygen presence. During setting the sizes of the wear products under loading of 50 kg are 30...50 μm . The higher content of carbide-forming elements is found on the friction surface in the torn out sites, thus proving the intensive fracture of the material in the region of carbide-forming elements.

1. *Балицький О. І., Колесніков В. О., Кав'як П.* Триботехнічні властивості аустенітних марганцевих сталей та чавунів в умовах тертя ковзання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 5. – С. 55–60.
(*Balytskyi O. I., Kolesnikov V. O., and Kaviak P.* Tribotechnical properties of austenitic manganese steels and cast-irons under sliding friction conditions // Materials Science. – 2005. – **41**, № 5. – P. 624–630.)
2. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій / О. І. Балицький, О. В. Махненко, О. О. Балицький та ін. – К.: ВД “Академперіодика”, 2005. – 544 с.*
3. *Wear resistance of high nitrogen austenitic stainless steels manufactured by molten and powder metallurgy routes / Jyrki Romu, Jyrki Tervo, Hannu Hänninen and Jari Liimatainen // High nitrogen steels HNS 93 // Proc. of the 3rd Int. Conf. – Ukraine: Kyiv, 1993. – P. 372–378.*
4. *Похмурський В. І., Василюк Х. Б.* Вплив водню на тертя і зношування металів (огляд) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 2. – С. 5–17.
5. *Odporność na zużycie ściernie i niszczenie wodorowe austenitycznych stopów Fe–Mn–Cr / A. Balitskii, J. Chmiel, P. Kawiak та in. // Problemy eksploatacji. – 2007. – 4 (67). – S. 7–16.*
6. *Balitskii A., Kolesnikov V., and Chmiel J.* The influence of microstructure and hydrogen – containing environments on the intensity of cast iron and steel damage by sliding friction. Part 1. Construction of a generalized model of surface layer friction of graphitized steel and cast-iron objects // Tam samo. – 2007. – 4 (67). – S. 17–29.
7. *Balitskii A., Kolesnikov V., and Kubicki J.* Ability to strengthening manganese doped iron- a reserve to increasing of exploitation stability of details for railway transport // Industrial and tourist transport. – 2004. – № 3. – P. 29–38.
8. *Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г.* Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
9. *Константы взаимодействия металлов с газами. Справ. изд. / Я. Д. Коган, Б. А. Колачев, Ю. В. Левинский и др. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.*
10. *Филлиппов М. А.* Метастабильный марганцевый аустенит как структурная основа сталей с высокой стойкостью в условиях динамического контактного нагружения // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1995. – № 10. – С. 12–15.
11. *Волынова Т. Ф.* Высокомарганцевые стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1988. – 344 с.
12. *Карлссон Л.* Нержавеющая сталь – прошлое, настоящее и будущее // Сварка (Suvirini-mas). – 2004. – № 1 (4). – С. 17–20.
13. *Гусякова Г. П., Корнев А. Б., Гусяков Д. С.* Коэффициенты трения и износостойчивость металлических материалов с различной способностью к деформационному упрочнению. – <http://nic-rt.ru/magazine1.html>
14. *Полоса из нержавеющей стали // Электронный ресурс. ООО Минералплиты. – <http://minvata.megasklad.ru/page1205835961>.*
15. *Development of chromium nitride coatings substituting titanium nitride / G. Berg, C. Friedrich, E. Broszeit, C. Berger // Surf. & Coat. Tech. – 1996. – 86–87. – P. 184–191.*

Одержано 13.07.2012