

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТІВ ЗНОШУВАННЯ АУСТЕНІТНИХ МАРГАНЦЕВИХ ЧАВУНІВ

Залізовуглецеві сплави, високолеговані марганцем, можна застосовувати як триботехнічні матеріали [1–3]. Тому однією з актуальних задач є з'ясувати механізм їх руйнування в умовах тертя [4–9]. Значну увагу приділяють продуктам зношування, оскільки їх параметри несуть інформацію про природу й інтенсивність процесу.

Матеріали та методика експерименту. Досліджували продукти зношування аустенітних марганцевих чавунів [10]. Зносотривкість визначали на машині тертя СМЦ–2 за схемою ролик–колодка в умовах граничного і сухого тертя. Як контртіло застосовували ролик із загартованої сталі 45Г2 твердістю 55 НРС. Швидкість ковзання 0,628 м/с. В умовах граничного тертя використовували оливу Індустріальну И–20А, питома навантаження 2,5 і 5,0 МПа, а в умовах сухого тертя 1,0; 2,0; 3,5; 5,0 і 6,0 МПа.

Розміри продуктів зношування під час сухого тертя виявились достатніми, щоб їх тестувати на приладі ПМТ–3 за збільшення $\times 485$. У мікроструктурі сплавів зафіксовано аустенітну металеву матрицю (мікротвердістю $H_{\mu} = 2,2...5,0$ ГПа) з графітними пластинчастими включеннями, у тому числі у вигляді евтектичних колоній. Рентгеноструктурним аналізом встановлено складнолеговані карбіди $(Cr, Fe)_7C_3$ і $(Cr, Fe, V)_{23}C_6$. Мікротвердість карбідної фази – у межах 7,0...17,0 ГПа. Умови експерименту для всіх видів чавунів були аналогічними (сухе тертя, швидкість ковзання 0,628 м/с, питома навантаження 2,0 МПа).

Результати та їх обговорення. Зовнішній вигляд продуктів зношування істотно відрізняється, що свідчить про різний характер руйнування матеріалів, а відповідно, і інтенсивність зношування. Питома зношування аустенітного марганцевого чавуну становить $0,8$ г/см² на 1000 м шляху, а для сірого – $86,5$ г/см² на 1000 м шляху. Інтенсивність зношування визначається в першу чергу структурно-фазовим складом. У сірому чавуні переважає феритна матриця ($H_{\mu} = 1,8...2,2$ ГПа), в якій більше ніж 12% (за площею) графітних включень. У марганцевому чавуні графітної фази від 2 до 10%. За станом частинок можна судити про стадію зношування. Форма самих продуктів зношування відповідає механізмам, що реалізуються під час тертя [4]. За нормального зношування частинки мають пластинчасту форму; за абразивного – форму мікростружки; втомним механізмам руйнування відповідають заокруглені або навіть сферичні частинки [3]. Проте така класифікація для гетерогенних сплавів вельми умовна, оскільки через складну будову і безліч чинників, що впливають на руйнування в цих умовах, частинки зношування можуть бути різноманітніші. Встановлено [5], що в інтервалі температур 373...873 К за швидкості ковзання 2,5 м/с зношування протікає унаслідок пелюстково-пошарового розділення основи металу межами графітних включень чавуну СЧ18 з пластинчастою формою графіту. Як відзначає І. В. Крагельський [6], слід обережно трактувати висновки про механізм руйнування на основі аналізу частинок зношування, оскільки те, що руйнується і те, що стало частинкою зношування, не одне і те саме.

Експериментально встановлено, що фрагмент, який відділився від поверхні, не перетворюється миттєво на частинку зношування, а залишає зону тертя лише

після того, як прилипне до поверхні контртіла. Керрідж і Ланкастер [6], використовуючи радіоактивний індентор, що ковзає по кільцю з інструментальної сталі, показали, що стадії утворення частинок зношування передують стадія їх акумуляції на контртілі в результаті адгезивного перенесення. Кількість перенесених частинок поступово зростає, поки не досягається рівноважний стан, тобто граничний ступінь акумуляції. Вони виявили, що в середньому кожна частинка зношування складається з 50 перенесених фрагментів.

Актуальним є вивчення особливостей руху частинок між контактуючими поверхнями після їх відділення від поверхні [3]. Речовина, яка утворюється з частинок зношування і їх уламків, суттєво впливає на сумарне зношування [5]. Тому необхідно вивчати кількісні закономірності цього шару, оцінювати час утримання частинок у контакті і текучість шару в умовах динамічної рівноваги.

За результатами електронно-мікроскопічних досліджень вдалося виділити такі типи основних частинок зношування [8]. Перший – частинки у вигляді мініатюрних спіралей, петель і гнutoго дроту, що аналогічні до дрібних стружок під час різання. Він характерний для мікрорізання або абразивного зношування. Підвищення концентрації таких частинок у мастильній пробі – сигнал незабарного пошкодження машини. Другий – пластинчасті частинки різної товщини, і характерні нормальним умовам роботи. Їх утворення за теорією зношування пояснюють відшаровуванням [9].

Продукти зношування аустенітного чавуну (що утворилися при $V = 0,628$ м/с і $P = 1,0$ МПа) мають плоску форму і (за сталого режиму сухого тертя) постійний розмір (найдрібніші 3...10 μm , середні 20...30 μm , крупні понад 65 μm). Зі збільшенням питомого навантаження руйнування інтенсифікується і збільшуються розміри продуктів зношування. Продукти зношування сірого чавуну (при збільшенні $\times 100$) нагадують конгломерати, що є одним цілим об'єктом (довжиною від 100 до кількох 1000 μm). Ці об'єкти мають великий розкид по висоті (до 5000 μm) порівняно з продуктами зношування марганцевого аустеніту. Під індентором конгломерат руйнується на дрібні частинки, що мають довжину від 0,1 до 10 μm . Таким чином, вже після руйнування чавуну під час тертя частинки зношування між тілом і контртілом продовжують подрібнюватись (про що повідомляли Керрідж і Ланкастер [6]). Завдяки здатності графіту до абсорбції вологи за кімнатних температур та інтеркалюванню продукти зношування, що відділилися, змінюються та з'являються "конгломерати". Серед продуктів зношування і аустенітного, і сірого чавуну зустрічаються включення чорного кольору. Це – графіт, що викришився під час тертя (розміром від 0,1 до 10 μm), а також крупніші окисдовані частинки, що утворилися при високих температурах в умовах сухого тертя.

Таким чином, крім металевої матриці, на руйнування істотно впливає графітна фаза, оскільки серед продуктів зношування зафіксовано значну кількість графіту. За таких навантажувально-швидкісних параметрів сірий чавун руйнується в патологічних умовах: умови тертя і запас міцності сплаву не збігаються, що інтенсифікує руйнування. Відзначимо, що "фарбування" графітом (разом з продуктами зношування в умовах сухого тертя) паперу є також прямим доказом домінуючого впливу графітної фази на руйнування. Ця тенденція характерна для сірого чавуну. Для аустенітного така закономірність спостерігається не завжди, а залежить від кількості графітної фази в сплаві.

Вивчення морфології поверхні частинок зношування аустенітних чавунів показує, що після їх відділення спостерігається і пластичний характер руйнування, і крихкий (рис. 1).

Своєрідність марганцевого аустеніту [11] обумовлена впливом марганцю на зв'язок d -електронів атомів заліза, що змінює (підвищує "ковалентність" зв'язку) характер їх просторового розподілу (посилює "металевий" зв'язок). Відомо,

що за крихкий характер руйнування відповідають ковалентні зв'язки. Якщо врахувати, що під час граничного і сухого тертя частинки зношування відділяються, у тому числі і від аустенітної металевої матриці, то додатковим легуванням можна впливати на інтенсивність ковалентних і металевих зв'язків у фазових складових сплаву, а отже, на характер відділення матеріалу під час тертя (крихкий, або в'язкий і пластичний).

В умовах окиснювального і граничного зношування середній розмір частинок зношування 0,1...3,0 μm . Знайдено також велику кількість частинок розміром до 1 μm . Товщину поверхневого шару 0,1...3,0 μm , що руйнується під час встановленого зношування, а також такі розміри часток зношування пов'язують з гранично можливою довжиною пробігу дислокації [12]. Для кожного виду сплавів ця границя буде різною, але на підставі висновку, зробленого у праці [12], можна припустити, що в граничних умовах тертя при навантаженні 2,5 МПа та швидкості 0,628 m/s у період встановленого зношування поряд з іншими механізмами протікає і дислокаційний механізм руйнування сплавів.

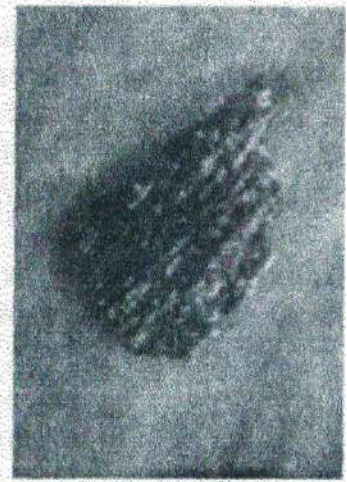


Рис. 1. Фрагмент продуктів зношування марганцевих чавунів, $\times 400$ ($P = 4,0 \text{ МПа}$, $V = 0,628 \text{ м/с}$).

Fig. 1. Fragment of wear products of manganese cast-iron, $\times 400$ ($P = 4.0 \text{ МПа}$, $V = 0.628 \text{ m/s}$).

Рис. 2. Частинки зношування аустенітного марганцевого чавуну, що викришилися в умовах схоплювання ($\times 100$) (a), а також разом з неметалічними частинками (кулясте світле включення в центральній частині зліва; $\times 100$) (b).

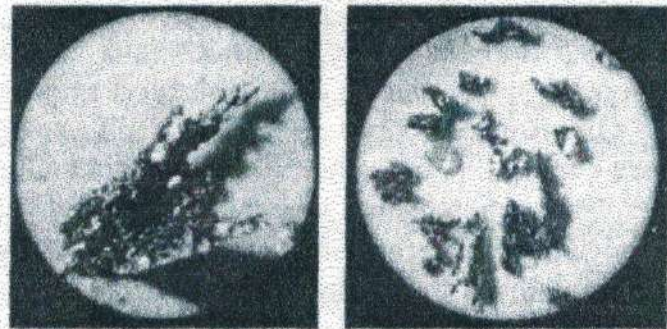


Fig. 2. Wear particles of austenitic manganese cast-iron, crumbled in setting ($\times 100$) (a) together with non-metal particles (round light inclusion in the central part of the picture on the left; $\times 100$) (b).

Зі збільшенням питомих навантажень від 1,0 до 6,0 МПа за постійної швидкості ковзання 0,628 m/s в умовах сухого тертя зростають розміри продуктів зношування. Під час виникнення схоплювання розміри окремих включень перевищують 100...1000 μm . Це свідчить про принципово інший характер руйнування матеріалу, ніж за умов нормального тертя. Частинки зношування мають довжину 1000...1500 μm (рис. 2). Це можуть бути і крупні дендрити, і частина аустеніту, що входить в крупну евтектичну колонію. В графітованих залізовуглецевих сплавах на характер, інтенсивність і механізм руйнування істотно впливає графітна фаза [13]. Мікроструктура сплавів свідчить, що серед продуктів зношування, що відділилися в умовах сухого тертя, значна кількість з розмірами, що знаходяться в межах відстаней, які відповідають відстані між графітними включеннями. Зауважимо, що матеріал тут руйнується і по границях графітних включень (магістральна тріщина розповсюджується по довжині графітного включення, а також між металевою матрицею та графітним включенням). За збільшення $\times 485$ разів на продуктах зношування спостерігається чорна графітна окантовка. Що більше графіту в сплаві, то інтенсивніше руйнування. У сплавах, що інтенсивно руйнуються, графіту 10...12% (за займаною площею), у найбільш зносостійких 2...6%. Таким чином, після розпушування металевої матриці з графітними включеннями руйнування інтенсифікується, а продукти зношування містять тріщини.

Магістральні тріщини можуть утворюватися в таких випадках: під час руху між тілом і контртілом; під час відділення матеріалу від сплаву; під час викришування графіту з графітної пори. За результатами рентгеноструктурного аналізу, серед продуктів зношування знайдено неметалічні включення (див. рис. 2b) – карбосульфід марганцю і титану (глобулярної форми) і нітриди титану (гострокутні або прямокутні включення жовтого та оранжевого кольору). У сплавах є кремній, який не тільки сприяє графітізації, а й розчиняється в твердому розчині та виділяється по границях дендритів аустеніту. Він утворює з марганцем легкоплавкі силікати [1] та зменшує розчинність титану в твердому розчині. Кремній (присутній у включеннях кулястої форми) супроводжується карбосульфідом титану. Вказані неметалічні включення істотно впливають на розповсюдження тріщини: біля таких зон вона поширюється швидше [1].

Рентгеноструктурними дослідженнями встановлено, що на поверхнях тертя і серед продуктів зношування є частинки, що містять γ -твердий розчин (аустеніт), карбіди і оксиди $(Cr, Fe)_2O_3$ і Fe_3O_4 , а також α -твердий розчин. Збільшення кількості оксидів у продуктах зношування спостерігається в умовах утворення вторинних структур і зниження інтенсивності зношування з підвищенням швидкості ковзання з 0,628 до 2,1 м/с і питомому тиску до 2,0 МПа. Максимуми на рентгенограмах, ідентифіковані як α -Fe і α -твердий розчин, можуть свідчити як про наявність фериту, так і нової структури, що утворилась в умовах тертя і може бути класифікована як "мартенсит деформації". Зі збільшенням його кількості зростає питомий тиск: найінтенсивніше він утворюється в діапазоні питомого тиску 3,5...6,0 МПа. Формування нових поверхонь розділу (в даному випадку на продуктах зношування) супроводжується значними витратами енергії [6].

Одними з найживаніших критеріїв для оцінки енергетичних витрат під час тертя є питомі роботи тертя і руйнування. Для даних сплавів виявлено таку закономірність: збільшення інтенсивності зношування супроводжується збільшенням питомої роботи тертя і зменшенням питомої роботи руйнування [14]. Враховуючи загальні закономірності руйнування сплавів (розміри продуктів зношування можна прийняти як середньостатистичні) та застосовуючи методи математичної статистики, можна встановити загальні структурно-енергетичні критерії, що відображають взаємозв'язок між інтенсивністю руйнування та параметрами структурно-фазового складу, розмірами продуктів зношування з урахуванням зовнішніх параметрів тертя (швидкості ковзання і навантаження).

ВИСНОВКИ

Зі збільшенням питомого навантаження (1,0...6,0 МПа) за постійної швидкості ковзання 0,628 м/с під час сухого і граничного тертя зростає інтенсивність зношування аустенітних марганцевих чавунів (та збільшується кількість продуктів зношування зі значними розмірами). В умовах сухого тертя руйнування протікає границями графітних включень. Найінтенсивніший цей процес за умов схоплювання матеріалу при навантаженнях понад 5,0 МПа і швидкості ковзання 0,628 м/с. На продуктах зношування утворюються два види тріщин: ті, що зародились безпосередньо після механічної взаємодії поверхонь, що труться, та ті, що виникли на пустотах, з яких викришився графіт. Серед продуктів зношування є оксиди $(Cr, Fe)_2O_3$ і Fe_3O_4 . Зі збільшенням швидкості ковзання з 0,628 до 2,1 м/с і питомого тиску до 2,0 МПа зростає кількість продуктів зношування, що містять оксиди. За умов граничного тертя ($P = 2,5$ МПа, $V = 0,628$ м/с) продукти зношування мають розміри 0,1...3,0 μm .

РЕЗЮМЕ. Исследованы продукты износа аустенитных марганцевых чугунов. Показано, что механизм разрушения сплавов (а соответственно образование продуктов износа) зависит как от структурно-фазового состава сплавов, так и от нагрузочно-скоростных характеристик

внешнего трения. Установлено, что в условиях граничного трения средний размер частичек износа от 0,1 до 3,0 мкм. В условиях окислительного износа среди продуктов износа обнаружены окислы $(Cr, Fe)_2O_3$ и Fe_3O_4 , которые являются составной частью вторичных структур, имеющих оксидную природу происхождения. Установлено, что разрушение сплавов происходит и по границам границам графитных включений, особенно интенсивное в условиях возникновения схватывания при удельной нагрузках, превышающих 5,0 МПа, и скорости скольжения 0,628 м/с.

SUMMARY. The wear products of austenitic manganese cast-irons are investigated. It is shown, that the mechanism of alloys fracture (and accordingly the formation of wear products) depends both on a structural-phase composition of the alloys as well as on loading-speed characteristics of external friction. It is established, that under the boundary friction the average size of wear particles is from 0.1 to 3.0 μm. In the conditions of oxidizing wear the oxides $(Cr, Fe)_2O_3$ and Fe_3O_4 , which are components of the secondary structures of oxide origin are found among the wear products. It is established, that alloys fracture takes place along the boundaries of graphite inclusions. The most intensive fracture was observed in the conditions of setting at specific load exceeding 5.0 MPa and sliding speed of 0.628 m/s.

1. *Вальнова Т. Ф.* Высокомарганцевые стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1988. – 343 с.
2. *Кузьменко А. Е., Платонов Е. А., Федоров Г. Е.* Новый безникелевый чугун для изготовления деталей систем гидрозолаудаления тепловых электростанций // Литейное производство. – 2001. – № 4. – С. 9–10.
3. *Кузьменко А. Г., Сытник С. В.* Методы испытаний на износ // Пробл. трибології. – 1999. – № 2. – С. 38–109.
4. *Власов В. М.* Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
5. *Бобро Ю. Г., Александров Б. И., Иванов В. Т.* Исследование износостойкости чугунов при повышенных температурах и давлениях // Повышение износостойкости литых материалов. – К.: ИПЛ АН УССР, 1983. – С. 20–22.
6. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
7. *Чихос Х.* Поход к системному анализу трибологических повреждений // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 122–129.
8. *Марченко Е. А.* О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 118 с.
9. *Suh N. P.* The delamination theory of wear // Wear. – 1973. – 25, № 1. – P.43–51.
10. *Колесников В. А.* Особенности изнашивания графитизированных марганцевых чугунов в условиях сухого трения // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2002. – № 7. – С. 232–239.
11. *Филлипов 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.
12. *Громановский Д. Г.* Разрушение поверхности при трении и разработка кинетической модели изнашивания // Вестник машиностроения. – 2000. – № 1. – С. 3–9.
13. *Структура та опір руйнуванню залізвуглецевих сплавів / О. П. Остап, І. П. Волчок, О. Б. Колотілкін та ін.* – Львів: Фіз.-мех. ін-т НАН України, 2001. – 272 с.
14. *Балицкий А. И., Колесников В. А., Кубицки Е.* Роль легирования хромом, ванадием и титаном в повышении триботехнических свойств железомарганцевых сплавов // Пробл. трибології. – 2003. – № 1. – С. 94–100.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТІВ ЗНОШУВАННЯ АУСТЕНІТНИХ
МАРГАНЦЕВИХ ЧАВУНІВ**

Залізовуглецеві сплави, високолеговані марганцем, можна застосовувати як триботехнічні матеріали [1–3]. Тому однією з актуальних задач є з'ясувати механізм їх руйнування в умовах тертя [4–9]. Значну увагу приділяють продуктам зношування, оскільки їх параметри несуть інформацію про природу й інтенсивність процесу.

Матеріали та методика експерименту. Досліджували продукти зношування аустенітних марганцевих чавунів [10]. Зносотривкість визначали на машині тертя СМЦ–2 за схемою ролик–колодка в умовах граничного і сухого тертя. Як контртіло застосовували ролик із загартованої сталі 45Г2 твердістю 55 HRC. Швидкість ковзання 0,628 м/с. В умовах граничного тертя використовували оливу Індустріальну І–20А, питома навантаження 2,5 і 5,0 МПа, а в умовах сухого тертя 1,0; 2,0; 3,5; 5,0 і 6,0 МПа.

Розміри продуктів зношування під час сухого тертя виявились достатніми, щоб їх тестувати на приладі ПМТ–3 за збільшення $\times 485$. У мікроструктурі сплавів зафіксовано аустенітну металеву матрицю (мікротвердістю $H_{\mu} = 2,2...5,0$ GPa) з графітними пластинчастими включеннями, у тому числі у вигляді евтектичних колоній. Рентгеноструктурним аналізом встановлено складнолеговані карбіди $(Cr, Fe)_7C_3$ і $(Cr, Fe, V)_{23}C_6$. Мікротвердість карбідної фази – у межах 7,0...17,0 GPa. Умови експерименту для всіх видів чавунів були аналогічними (сухе тертя, швидкість ковзання 0,628 м/с, питома навантаження 2,0 МПа).

Результати та їх обговорення. Зовнішній вигляд продуктів зношування істотно відрізняється, що свідчить про різний характер руйнування матеріалів, а відповідно, і інтенсивність зношування. Питома зношування аустенітного марганцевого чавуну становить $0,8$ г/см² на 1000 м шляху, а для сірого – $86,5$ г/см² на 1000 м шляху. Інтенсивність зношування визначається в першу чергу структурно-фазовим складом. У сірому чавуні переважає феритна матриця ($H_{\mu} = 1,8...2,2$ GPa), в якій більше ніж 12% (за площею) графітних включень. У марганцевому чавуні графітної фази від 2 до 10%. За станом частинок можна судити про стадію зношування. Форма самих продуктів зношування відповідає механізмам, що реалізуються під час тертя [4]. За нормального зношування частинки мають пластинчасту форму; за абразивного – форму мікростружки; втомним механізмам руйнування відповідають заокруглені або навіть сферичні частинки [3]. Проте така класифікація для гетерогенних сплавів вельми умовна, оскільки через складну будову і безліч чинників, що впливають на руйнування в цих умовах, частинки зношування можуть бути різноманітніші. Встановлено [5], що в інтервалі температур 373...873 К за швидкості ковзання 2,5 м/с зношування протікає унаслідок пелюстково-пошарового розділення основи металу межами графітних включень чавуну СЧ18 з пластинчастою формою графіту. Як відзначає І. В. Крагельський [6], слід обережно трактувати висновки про механізм руйнування на основі аналізу частинок зношування, оскільки те, що руйнується і те, що стало частинкою зношування, не одне і те саме.

Експериментально встановлено, що фрагмент, який відділився від поверхні, не перетворюється миттєво на частинку зношування, а залишає зону тертя лише

після того, як прилипне до поверхні контртіла. Керрідж і Ланкастер [6], використовуючи радіоактивний індентор, що ковзає по кільцю з інструментальної сталі, показали, що стадії утворення частинок зношування передують стадія їх акумуляції на контртілі в результаті адгезивного перенесення. Кількість перенесених частинок поступово зростає, поки не досягається рівноважний стан, тобто граничний ступінь акумуляції. Вони виявили, що в середньому кожна частинка зношування складається з 50 перенесених фрагментів.

Актуальним є вивчення особливостей руху частинок між контактуючими поверхнями після їх відділення від поверхні [3]. Речовина, яка утворюється з частинок зношування і їх уламків, суттєво впливає на сумарне зношування [5]. Тому необхідно вивчати кількісні закономірності цього шару, оцінювати час утримання частинок у контакт і текучість шару в умовах динамічної рівноваги.

За результатами електронно-мікроскопічних досліджень вдалося виділити такі типи основних частинок зношування [8]. Перший – частинки у вигляді мініатюрних спіралей, петель і гнутого дроту, що аналогічні до дрібних стружок під час різання. Він характерний для мікрорізання або абразивного зношування. Підвищення концентрації таких частинок у мастильній пробі – сигнал незабарного пошкодження машини. Другий – пластинчасті частинки різної товщини, і характерні нормальним умовам роботи. Їх утворення за теорією зношування пояснюють відшаровуванням [9].

Продукти зношування аустенітного чавуну (що утворилися при $V = 0,628$ м/с і $P = 1,0$ МПа) мають плоску форму і (за сталого режиму сухого тертя) постійний розмір (найдрібніші 3...10 μm , середні 20...30 μm , крупні понад 65 μm). Зі збільшенням питомого навантаження руйнування інтенсифікується і збільшуються розміри продуктів зношування. Продукти зношування сірого чавуну (при збільшенні $\times 100$) нагадують конгломерати, що є одним цілим об'єктом (довжиною від 100 до кількох 1000 μm). Ці об'єкти мають великий розкид по висоті (до 5000 μm) порівняно з продуктами зношування марганцевого аустеніту. Під індентором конгломерат руйнується на дрібні частинки, що мають довжину від 0,1 до 10 μm . Таким чином, вже після руйнування чавуну під час тертя частинки зношування між тілом і контртілом продовжують подрібнюватись (про що повідомляли Керрідж і Ланкастер [6]). Завдяки здатності графіту до абсорбції вологи за кімнатних температур та інтеркалюванню продукти зношування, що відділилися, змінюються та з'являються "конгломерати". Серед продуктів зношування і аустенітного, і сірого чавуну зустрічаються включення чорного кольору. Це – графіт, що викришився під час тертя (розміром від 0,1 до 10 μm), а також крупніші оксидовані частинки, що утворилися при високих температурах в умовах сухого тертя.

Таким чином, крім металевої матриці, на руйнування істотно впливає графітна фаза, оскільки серед продуктів зношування зафіксовано значну кількість графіту. За таких навантажувально-швидкісних параметрів сірий чавун руйнується в патологічних умовах: умови тертя і запас міцності сплаву не збігаються, що інтенсифікує руйнування. Відзначимо, що "фарбування" графітом (разом з продуктами зношування в умовах сухого тертя) паперу є також прямим доказом домінуючого впливу графітної фази на руйнування. Ця тенденція характерна для сірого чавуну. Для аустенітного така закономірність спостерігається не завжди, а залежить від кількості графітної фази в сплаві.

Вивчення морфології поверхні частинок зношування аустенітних чавунів показує, що після їх відділення спостерігається і пластичний характер руйнування, і крихкий (рис. 1).

Своєрідність марганцевого аустеніту [11] обумовлена впливом марганцю на зв'язок d -електронів атомів заліза, що змінює (підвищує "ковалентність" зв'язку) характер їх просторового розподілу (посилує "металевий" зв'язок). Відомо,

що за крихкий характер руйнування відповідають ковалентні зв'язки. Якщо врахувати, що під час граничного і сухого тертя частинки зношування відділяються, у тому числі і від аустенітної металевої матриці, то додатковим легуванням можна впливати на інтенсивність ковалентних і металевих зв'язків у фазових складових сплаву, а отже, на характер відділення матеріалу під час тертя (крихкий, або в'язкий і пластичний).

В умовах окиснювального і граничного зношування середній розмір частинок зношування 0,1...3,0 μm . Знайдено також велику кількість частинок розміром до 1 μm . Товщину поверхневого шару 0,1...3,0 μm , що руйнується під час встановленого зношування, а також такі розміри часток зношування пов'язують з гранично можливою довжиною пробігу дислокації [12]. Для кожного виду сплавів ця границя буде різною, але на підставі висновку, зробленого у праці [12], можна припустити, що в граничних умовах тертя при навантаженні 2,5 МПа та швидкості 0,628 m/s у період встановленого зношування поряд з іншими механізмами протікає і дислокаційний механізм руйнування сплавів.

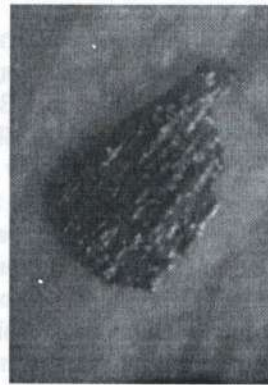


Рис. 1. Фрагмент продуктів зношування марганцевих чавунів, $\times 400$ ($P = 4,0$ МПа, $V = 0,628$ m/s).

Fig. 1. Fragment of wear products of manganese cast-iron, $\times 400$ ($P = 4.0$ МПа, $V = 0.628$ m/s).

Рис. 2. Частинки зношування аустенітного марганцевого чавуну, що викришилися в умовах схоплювання ($\times 100$) (а), а також разом з неметалічними частинками (кулясте світле включення в центральній частині зліва; $\times 100$) (б).

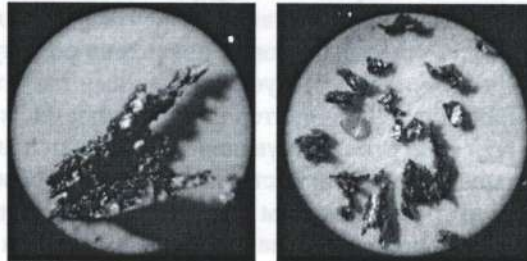


Fig. 2. Wear particles of austenitic manganese cast-iron, crumbled in setting ($\times 100$) (a) together with non-metal particles (round light inclusion in the central part of the picture on the left; $\times 100$) (b).

Зі збільшенням питомих навантажень від 1,0 до 6,0 МПа за постійної швидкості ковзання 0,628 m/s в умовах сухого тертя зростають розміри продуктів зношування. Під час виникнення схоплювання розміри окремих включень перевищують 100...1000 μm . Це свідчить про принципово інший характер руйнування матеріалу, ніж за умов нормального тертя. Частинки зношування мають довжину 1000...1500 μm (рис. 2). Це можуть бути і крупні дендрити, і частина аустеніту, що входить в крупну евтектичну колонію. В графітізованих залізвуглецевих сплавах на характер, інтенсивність і механізм руйнування істотно впливає графітна фаза [13]. Мікроструктура сплавів свідчить, що серед продуктів зношування, що відділилися в умовах сухого тертя, значна кількість з розмірами, що знаходяться в межах відстаней, які відповідають відстані між графітними включеннями. Зауважимо, що матеріал тут руйнується і по границях графітних включень (магістральна тріщина розповсюджується по довжині графітного включення, а також між металевою матрицею та графітним включенням). За збільшення $\times 485$ разів на продуктах зношування спостерігається чорна графітна окантовка. Що більше графіту в сплаві, то інтенсивніше руйнування. У сплавах, що інтенсивно руйнуються, графіту 10...12% (за займаною площею), у найбільш зносостійких 2...6%. Таким чином, після розпушування металевої матриці з графітними включеннями руйнування інтенсифікується, а продукти зношування містять тріщини.

Магістральні тріщини можуть утворюватися в таких випадках: під час руху між тілом і контртілом; під час відділення матеріалу від сплаву; під час викришування графіту з графітної пори. За результатами рентгеноструктурного аналізу, серед продуктів зношування знайдено неметалічні включення (див. рис. 2b) – карбосульфід марганцю і титану (глобулярної форми) і нітриди титану (гострокутні або прямокутні включення жовтого та оранжевого кольору). У сплавах є кремній, який не тільки сприяє графітизації, а й розчиняється в твердому розчині та виділяється по границях дендритів аустеніту. Він утворює з марганцем легкоплавкі силікати [1] та зменшує розчинність титану в твердому розчині. Кремній (присутній у включеннях кулястої форми) супроводжується карбосульфідом титану. Вказані неметалічні включення істотно впливають на розповсюдження тріщини: біля таких зон вона поширюється швидше [1].

Рентгеноструктурними дослідженнями встановлено, що на поверхнях тертя і серед продуктів зношування є частинки, що містять γ -твердий розчин (аустеніт), карбіди і оксиди (Cr, Fe) $_2$ O $_3$ і Fe $_3$ O $_4$, а також α -твердий розчин. Збільшення кількості оксидів у продуктах зношування спостерігається в умовах утворення вторинних структур і зниження інтенсивності зношування з підвищенням швидкості ковзання з 0,628 до 2,1 м/с і питомому тиску до 2,0 МПа. Максимуми на рентгенограмах, ідентифіковані як α -Fe і α -твердий розчин, можуть свідчити як про наявність фериту, так і нової структури, що утворилась в умовах тертя і може бути класифікована як “мартенсит деформації”. Зі збільшенням його кількості зростає питомий тиск: найінтенсивніше він утворюється в діапазоні питомого тиску 3,5...6,0 МПа. Формування нових поверхонь розділу (в даному випадку на продуктах зношування) супроводжується значними витратами енергії [6].

Одними з найживаніших критеріїв для оцінки енергетичних витрат під час тертя є питомі роботи тертя і руйнування. Для даних сплавів виявлено таку закономірність: збільшення інтенсивності зношування супроводжується збільшенням питомої роботи тертя і зменшенням питомої роботи руйнування [14]. Враховуючи загальні закономірності руйнування сплавів (розміри продуктів зношування можна прийняти як середньостатистичні) та застосовуючи методи математичної статистики, можна встановити загальні структурно-енергетичні критерії, що відображають взаємозв'язок між інтенсивністю руйнування та параметрами структурно-фазового складу, розмірами продуктів зношування з урахуванням зовнішніх параметрів тертя (швидкості ковзання і навантаження).

ВИСНОВКИ

Зі збільшенням питомого навантаження (1,0...6,0 МПа) за постійної швидкості ковзання 0,628 м/с під час сухого і граничного тертя зростає інтенсивність зношування аустенітних марганцевих чавунів (та збільшується кількість продуктів зношування зі значними розмірами). В умовах сухого тертя руйнування протікає границями графітних включень. Найінтенсивніший цей процес за умов схоплювання матеріалу при навантаженнях понад 5,0 МПа і швидкості ковзання 0,628 м/с. На продуктах зношування утворюються два види тріщин: ті, що зародились безпосередньо після механічної взаємодії поверхонь, що труться, та ті, що виникли на пустотах, з яких викришився графіт. Серед продуктів зношування є оксиди (Cr, Fe) $_2$ O $_3$ і Fe $_3$ O $_4$. Зі збільшенням швидкості ковзання з 0,628 до 2,1 м/с і питомого тиску до 2,0 МПа зростає кількість продуктів зношування, що містять оксиди. За умов граничного тертя ($P = 2,5$ МПа, $V = 0,628$ м/с) продукти зношування мають розміри 0,1...3,0 μ m.

РЕЗЮМЕ. Исследованы продукты износа аустенитных марганцевых чугунов. Показано, что механизм разрушения сплавов (а соответственно образование продуктов износа) зависит как от структурно-фазового состава сплавов, так и от нагрузочно-скоростных характеристик

ISSN 0430-6252

ФІЗИКО-
ХІМІЧНА
МЕХАНІКА
МАТЕРІАЛІВ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ
PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

1-2004

ISSN 0430-6252

ФІЗИКО-
ХІМІЧНА
МЕХАНІКА
МАТЕРІАЛІВ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ
PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

1-2004

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

**ФІЗИКО-ХІМІЧНА
МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ
МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICOCHEMICAL
MECHANICS OF MATERIALS**

Міжнародний науково-технічний журнал
Заснований у січні 1965 року
Виходить 6 разів у рік
том 40, № 1, 2004
січень-лютий
ЛЬВІВ

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В. В. ПАНАСЮК (головний редактор), *С. Я. ЯРЕМА* (заст. головного редактора), *В. М. ФЕДІРКО* (заст. головного редактора), *Р. Р. КОКОТ* (відповідальний секретар), *О. С. АНДРЕЙКІВ*, *І. М. ДМИТРАХ*, *Г. С. КИТ*, *Р. М. КУШНІР*, *А. О. ЛЕБЕДЄВ*, *Л. М. ЛОБАНОВ*, *З. Т. НАЗАРЧУК*, *Г. М. НИКИФОРЧИН*, *В. А. ОСАДЧУК*, *О. П. ОСТАШ*, *В. С. ПАВЛИНА*, *В. І. ПОХМУРСЬКИЙ*, *І. К. ПОХОДНЯ*, *О. М. РОМАНІВ*, *М. П. САВРУК*, *Г. Т. СУЛИМ*, *В. І. ТКАЧОВ*, *В. В. ФЕДОРОВ*, *С. О. ФІРСТОВ*

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), *А. БАККЕР* (Нідерланди), *В. ДІЦЕЛЬ* (Німеччина), *І.-Р. ГАРРІС* (Великобританія), *О. М. ЛОКОЩЕНКО* (Росія), *Е. ЛУНАРСЬКА* (Польща), *М. А. МАХУТОВ* (Росія), *І. МІЛЬН* (Великобританія), *М. Ф. МОРОЗОВ* (Росія), *О. НАКОНЕЧНИЙ* (Польща), *А. НЕЙМІЦ* (Польща), *Дж.-Ф. НОТТ* (Великобританія), *І. ПЛЮВІНАЖ* (Франція), *Р.-О. РІЧІ* (США), *С. СЕДМАК* (Югославія), *Й.-Л. СПОРМАКЕР* (Нідерланди), *Д.-М.-Р. ТЕПЛІН* (Великобританія), *Л. ТОТ* (Угорщина), *Д. ФРАНСУА* (Франція), *М. ШАПЕР* (Німеччина), *М.-О. ШПАЙДЕЛЬ* (Швейцарія), *Є. Д. ЦУКІН* (Росія)

EDITORIAL BOARD

V. V. PANASYUK (Editor-in-Chief), *S. Ya. YAREMA* (Associate Editor), *V. M. FEDIRKO* (Associate Editor), *R. R. KOKOT* (Secretary), *O. Ye. ANDREIKIV*, *I. M. DMYTRAKH*, *V. V. FEDOROV*, *S. O. FIRSTOV*, *H. S. KIT*, *R. M. KUSHNIR*, *A. O. LEBEDIEV*, *L. M. LOBANOV*, *Z. T. NAZARCHUK*, *H. M. NYKYFORCHYN*, *V. A. OSADCHUK*, *O. P. OSTASH*, *V. S. PAVLYNA*, *V. I. POKHMURSKYI*, *I. K. POKHODNIA*, *O. M. ROMANIV*, *M. P. SAVRUK*, *H. T. SULYM*, *V. I. TKACHOV*

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

R. AKID (Great Britain), *A. BAKKER* (The Netherlands), *W. DITZEL* (Germany), *F. P. FORD* (USA), *D. FRANÇOIS* (France), *I. R. HARRIS* (Great Britain), *J. F. KNOTT* (Great Britain), *A. M. LOKOSHCHENKO* (Russia), *E. LUNARSKA* (Poland), *N. A. MAKHUTOV* (Russia), *I. MILNE* (Great Britain), *N. F. MOROZOV* (Russia), *A. NAKONECHNY* (Poland), *A. NEIMITZ* (Poland), *G. PLUVINAGE* (France), *R. O. RITCHIE* (USA), *M. SCHAPER* (Germany), *Ye. D. SHCHUKIN* (Russia), *S. SEDMAK* (Yugoslavia), *M. O. SPEIDEL* (Switzerland), *J. L. SPOORMAKER* (The Netherlands), *D. M. R. TAPLIN* (Great Britain), *L. TOTH* (Hungary).

Науковий редактор *С. Я. ЯРЕМА*
Scientific Editor *S. Ya. YAREMA*

Адреса редакції: 79601, Львів МСП, Наукова, 5. Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України.
Тел.: 8 (0322) 63-73-74, 8 (0322) 65-42-30.
Факс: 8 (0322) 64-94-27.
E-mail: pcmm@ah.ipm.lviv.ua

Наша WWW-адреса: <http://www.ipm.lviv.ua/journal/Journal.htm>

Editorial office address: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 5, Naukova St., Lviv 79601, Ukraine.
Tel.: (380) 322 63 73 74, (380) 322 65 42 30.
Fax: (380) 322 64 94 27.
E-mail: pcmm@ipm.lviv.ua

Our WWW-address: <http://www.ipm.lviv.ua/journal/Journal.htm>

Відповідальний секретар редакції *Р. Р. Кокот*
Редактори *Д. С. Бриняк*, *Л. Є. Єлейко*
Технічний редактор *О. Й. Пінак*
Зав. групою комп'ютерної підготовки видання *І. В. Калинюк*
Комп'ютерний набір *Г. М. Кулик*, *Л. Г. Копчак*

Підписано до друку 27.02.2004 Формат 70x108/16 Папір друк. №1. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 12. Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 300 прим. Замовлення 14-02/04. Ціна договірна.

Реєстраційне свідоцтво серія КВ №203 від 10.11.93

Друкарня ТзОВ «Видавництво МС», 79066, Львів, вул. Драгана, 14/10

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Чекурин В. Ф., Процюк Б. В.</i> К идентификации параметров многослойных покрытий по термоупругим перемещениям поверхности нагрева	7
<i>Прокопович И. Б.</i> Математическое описание возмущения напряженно-деформированного состояния	16
<i>Острык В. И., Улитко А. Ф.</i> Осесимметричная контактная задача для межфазной трещины	21
<i>Пырьев Ю. А.</i> Термоупругий контакт вращающегося инерционного цилиндра с облойкой в условиях фрикционных автоколебаний	27
<i>Фильштинский Л. А., Ябеда, Аладин</i> Оптимальное управление волновыми движениями пьезокерамического стержня	33
<i>Тимофеев Б. Т., Федорова В. А., Бучатский А. А.</i> Межкристаллитное коррозионное растрескивание энергетического оборудования из аустенитных сталей (Обзор)	40
<i>Прытула А. О., Погрелюк И. Н., Яськив О. И.</i> Исследование поверхностных слоев титана после термодиффузионного насыщения в борсодержащей среде	51
<i>Витвицкий В. И.</i> Малоцикловая долговечность сталей в водороде высокого давления	55
<i>Похмурская Г. В.</i> Разрушение лазерно закаленных цилиндрических стержней вследствие закручивания и растяжения	60
<i>Балицкий А. И., Колесников В. О.</i> Исследование продуктов износа аустенитных марганцевых чугунов	65
<i>Писаренко В. А., Кузнецова Т. Л., Самелюк А. В.</i> Структура и механические свойства интерметаллида $ZrCr_2$ в интервале температур 20...1300°C	70
<i>Маруха М. В., Гнып И. П.</i> Противокоррозионные температуростойкие кремнийорганические покрытия с уплотненными минеральными наполнителями	75
<i>Дурагина З. А., Мудрый С. И., Луцышин Т. И.</i> Связь между структурными параметрами расплава $Li_{17}Pb_{83}$ и его взаимодействием с нержавеющей сталью	79
<i>Туммер К. П., Пандя М. П., Джани К. Г., Моды К. Б., Джоши Г. Г.</i> Микро- и макроскопические магнитные свойства шпинельных ферритных систем $MgAl_xCr_xFe_{2-2x}O_4$	86
<i>Беднарская Л. М., Герцык О. М., Данылюк О. Б., Езерская О. А., Носенко В. К.</i> Электрохимическое исследование термодинамики структурирования аморфных металлических сплавов Fe-Si-B	95
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ	
<i>Малежик М. П.</i> Оптически чувствительные материалы для моделирования волновых полей напряжений в анизотропных телах	99
<i>Бачова В., Драгановска Д.</i> Анализ качества поверхности, обдутой струей частиц	104
НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ	
<i>Косаревич Р. Я., Студент А. З., Оныщак Я. Д., Марков А. Д., Рипей И. В., Русын Б. П., Никифорчин Г. Н.</i> Оценка повреждений коллектора водяного экономайзера трещинами термической усталости	109
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
<i>Даляк Т. М.</i> Изгиб пластины с периодической системой параллельных взаимосмещенных трещин, берега которых контактируют	115
<i>Бялик О. М., Доний А. Н., Кулинич А. А., Рябинина О. О., Котляр С. М.</i> Влияние параметров кристаллизации на структуру и механические свойства литых сплавов системы Al-Mg-Zn	118
<i>Соловей О. И., Врублевская Т. Я.</i> Комплексообразование Ir (IV) и Pt (IV) с ксиленолом оранжевым	120
<i>Кунтый О. И., Минакова Р. В., Козак С. И., Срибный В. М., Бабутина Т. Е.</i> Морфология электрохимически никелированного вольфрамового порошка из некондиционной проволоки	123
В НАУЧНЫХ КРУГАХ	
<i>Хома М.</i> Форум коррозионистов	126
<i>Правила для авторов</i>	128

Балицький О.І., Колесніков В.О. Дослідження продуктів зношування аустенітних марганцевих чавунів // Фізико–хімічна механіка матеріалів. – 2004. – № 1 – С. 65–69.

Перевидано з перекладом.

Balytskyi O.I., Kolesnikov V.O. Investigation of wear products of austenitic manganese cast-iron // Materials Science.– vol.40.-№ 1.-2004. – p. 78 – 82. DOI: 10.1007/s11003-019-00238-7.

<http://www.springerlink.com/content/n4113817xq331771/fulltext.pdf/>

https://kidkrasnodon.at.ua/load/doslidzhennja_produktyv_znoshuvannja_austenitnykh_margancevikh_chavuniv/1-1-0-60

https://kolesnikov.ucoz.com/load/doslidzhennja_produktyv_znoshuvannja_austenitnykh_margancevikh_chavuniv/1-1-0-251

https://researchworker.ucoz.ru/load/publikacii/doslidzhennja_produktyv_znoshuvannja_austenitnykh_margancevikh_chavuniv/3-1-0-368

https://www.researchgate.net/publication/344900103_Doslidzenna_produktyv_znosuvanna_austenitnykh_margancevikh_chavuniv