

УДК 621.002.3:621.89

Т.А. Роїк, В.В. Холякко, Ю.Ю. Віщюк

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З НІКЕЛЕВОЮ МАТРИЦЕЮ

Вступ

Зносостійкість будь-якого антифрикційного матеріалу залежить від великої кількості одночасно діючих факторів – як зовнішніх, зумовлених параметрами функціонування пари тертя, так і внутрішніх, пов'язаних з природою самого матеріалу. Залежно від умов тертя оптимальна структура і властивості антифрикційного матеріалу можуть бути різними. Так, в умовах тертя без змащування рідким мастилом при одночасній дії додаткових навантажуючих факторів (температури, тиску) стійкість проти зносу, зокрема абразивного, коли тверді частинки абразиву – піску, бруду тощо – можуть потрапити в зону тертя і виривати дрібні частинки антифрикційного матеріалу, буде визначатися комплексом фізико-механічних властивостей матеріалу, передусім його опором крихкому руйнуванню та твердістю [1, 2].

У важких умовах роботи антифрикційних матеріалів, особливо за наявності впливу високих (700–750°C) температур навколишнього середовища, коли жодне рідке мастило не є працездатним, надзвичайно важливо захистити поверхні тертя від посиленого зношування та зчеплення [1–5]. З цією метою, як відомо [6], застосовують антизадирні домішки, які додаються до складу композиційних матеріалів на етапі їх виготовлення та виконують роль твердого мастила.

Численність рекомендованих твердих мастил [6, 7] зумовлена різними умовами експлуатації антифрикційних матеріалів, які потребують пошуку найефективніших антифрикційних домішок саме для певних конкретних умов роботи. Також відомо [1–8], що для умов роботи антифрикційних матеріалів, які характеризуються високими температурами, підвищеними навантаженнями і невисокими швидкостями ковзання, найефективнішими антизадирними домішками є фториди лужноземельних металів, зокрема фторид кальцію (CaF_2).

Втім введення до складу композиційного матеріалу будь-якого твердого мастила, в тому числі

й CaF_2 , не є однозначною функцією збільшення зносостійкості антифрикційного матеріалу і захисту його від зчеплення. Ефективне виконання речовиною ролі твердого мастила, що здатне забезпечити тривалу і надійну роботу пари тертя, неможливе без встановлення оптимального кількісного вмісту твердозмащувальної домішки, причому не апіорі, а на основі глибоких структурних досліджень, із врахуванням взаємозв'язку зносостійкості антифрикційного матеріалу і його фізико-механічних властивостей.

Постановка задачі

Метою досліджень, результати яких наведено в статті, є встановлення на основі фрактографічного аналізу оптимального вмісту твердого мастила CaF_2 , здатного забезпечити високу зносостійкість залежно від фізико-механічних властивостей композиційних антифрикційних матеріалів з нікелевою матрицею.

Результати досліджень і їх аналіз

Об'єктами досліджень були антифрикційні композиційні матеріали з такими масовими складами, %:

склад 1: $72\text{Ni} + 12\text{Mo} + 12\text{W} + 4\text{CaF}_2$;

склад 2: $70\text{Ni} + 12\text{Mo} + 12\text{W} + 6\text{CaF}_2$;

склад 3: $63\text{Ni} + 13,5\text{Mo} + 13,5\text{W} + 10\text{CaF}_2$;

склад 4: $58\text{Ni} + 15\text{Mo} + 15\text{W} + 12\text{CaF}_2$;

склад 5: $55\text{Ni} + 15\text{Mo} + 15\text{W} + 15\text{CaF}_2$.

У процесі виконання експериментів було проведено фізико-механічні і триботехнічні випробування матеріалів, результати яких наведено в таблиці. Дослідження фізико-механічних характеристик здійснювались за стандартними методиками з визначенням твердості (НВ), межі міцності при згині ($\sigma_{\text{зг}}$) та ударної в'язкості (КС). Антифрикційні властивості матеріалів визначались на високотемпературній машині тертя ВМТ-1 на повітрі, при навантаженні на пару тертя 5 МПа, температурі 750°C, швидкості ковзання 1 м/с у парі з контртілом із жароміцної сталі ЭИ 961 (52–54 HRC).

Аналіз наведених у таблиці результатів показує, що матеріал складу 1 (з масовим вмістом CaF_2 4%) має максимальну ударну в'язкість у поєднанні із задовільним рівнем міцності і твердості. Однак його антифрикційні властивості, які характеризуються коефіцієнтом тертя та інтенсивністю зношування, досить низькі – мають дуже високі значення і не можуть задовольняти службові вимоги.

Таблиця. Фізико-механічні і триботехнічні властивості досліджених матеріалів

№ складу	Масовий склад матеріалів, %	$\sigma_{зг}$, МПа	Ударна в'язкість КС, Дж/м ²	Твердість НВ, МПа	Коефіцієнт тертя	Інтенсивність зношування, мкм/км
1	Ni + 12Mo + 12W + 4CaF ₂	615	985	1500	0,32	82
2	Ni + 12Mo + 12W + 6CaF ₂	620	970	1550	0,15	24
3	Ni + 13,5Mo + 13,5W + 10CaF ₂	670	960	1600	0,12	22
4	Ni + 15Mo + 15W + 12CaF ₂	700	920	1700	0,14	23
5	Ni + 15Mo + 15W + 15CaF ₂	650	770	1650	0,38	94

Візуальний огляд матеріалу складу 1 після триботехнічних випробувань показав, що утворена на робочих поверхнях плівка тертя дискретна, несучільна і має ділянки незахищеної ювенільної поверхні. Вочевидь, це пов'язано з недостатнім вмістом твердого мастила CaF₂ у складі матеріалу, яке не здатне надійно захистити поверхні пари тертя від зчеплення.

Матеріали складів 2–4 мають дещо нижчу пластичність у зв'язку з підвищеною кількістю непластичного CaF₂ (6–12%), але вищий рівень міцності і твердості порівняно з матеріалом складу 1. Це пов'язано насамперед із збільшеним вмістом в них зміцнюючих легуючих елементів Mo і W (масовий вміст кожного елемента 12–15%), що приводить, по-перше, до утворення в матеріалах (у процесі їх виготовлення) більшої кількості зміцнюючих фаз – інтерметалідів Ni₃Mo, Ni₃W, Ni₃(Mo, W), WNi₄ і, по-друге, до збільшення ступеня легованості γ – твердого розчину на основі нікелю, а значить, і до його подальшого зміцнення. До того ж, ця група матеріалів (склади 2–4) відрізняється і високим рівнем антифрикційних властивостей – низькими значеннями коефіцієнтів тертя та інтенсивності зношування. Крім того, на поверхнях тертя матеріалів і контртіла утворюється щільна розділювальна плівка, що запобігає зчепленню робочих поверхонь.

Подальше збільшення масових часток CaF₂ до 15% призвело до катастрофічного зношення матеріалу складу 5, що можна пояснити таким чином. При збільшенні кількості CaF₂ у матеріалі на основі нікелю, легованого молібденом і вольфрамом, на процес тертя почали одночасно впливати два чинники. Підвищення в матеріалі вмісту твердого мастила нібито мало сприяти полегшенню умов припрацьовування та зниженню сили тертя внаслідок утворення розділювальних антизадирних плівок, але при цьому вступає в дію другий чинник – міцність матеріалу, що впливає на зносостійкість матеріалу в цілому. Підвищення масових часток CaF₂ до 15% різко знижує ударну в'язкість матеріалу складу 5

через зменшення загальної площі металевого контакту в об'ємі матеріалу (завдяки непластичній і легкій речовині CaF₂; 15 масових часток відповідають 40 об'ємним часткам), тобто фактори конструкційної міцності стають вирішальними для оцінювання працездатності матеріалу за таких умов тертя.

Зазначені явища взаємозв'язку фізико-механічних і антифрикційних властивостей знайшли своє підтвердження при виконанні фрактографічного аналізу матеріалів. Особливості руйнування антифрикційних матеріалів на основі нікелю досліджувались з використанням зразків, зруйнованих при випробуваннях на ударну в'язкість. Всі досліджувані матеріали мали змішаний характер руйнування, куди входили ділянки в'язкого, міжзеренного руйнування та крихкого руйнування сколом, але в різному їх співвідношенні залежно від вмісту CaF₂ та кількості зміцнюючих інтерметалідних фаз. На рис. 1, 2 наведено деякі мікрофрактограми зразків з композиційних матеріалів на основі нікелю.

На рис. 1 зображено фрагменти зламів матеріалу із вмістом (Ni–Mo–W) + 10 CaF₂. Мікрорельєф зламу утворений за механізмом змішаного руйнування: в'язкого – зародженням ямок (фрактограма на рис. 1, а) та міжзеренного, що виражається в розщепленні зерен уздовж плоских границь (фрактограма на рис. 1, б).

Міжзеренне руйнування могло бути ініційоване частинками CaF₂, розташованими по границях зерен, та інтерметалідами, наявними у матеріалі і зосередженими в міжвузловинах зерен.

Розшифрування електроніграм, отриманих від приготованих із зламів зразків екстракційних реплік, підтвердило наявність на поверхні руйнування частинок інтерметалідів, які стали ініціаторами виникнення локальних осередків руйнування. Але ділянки міжзеренного руйнування не катастрофічні. На поверхні зерен спостерігаються борозенки від утомленості (рис. 1, б), наявність яких може свідчити про руйнування в умовах утомного навантаження (перевантаження),

коли рівень циклічних значень інтенсивності напружень наближається до критичного, що призводить до швидкого руйнування. Поєднання борозенок від утомленості і міжзеренного руйнування свідчить про тенденцію матеріалу до розвитку руйнування по границях зерен. Але оскільки в матеріалі є тверді частинки, то він виявляє одночасно і тенденцію до утворення мікропор в умовах перевантаження. Тому тут утворюються і ділянки ямкового в'язкого руйнування.

На ділянці ямкового руйнування (рис. 1, *a*) є вкраплення CaF_2 , а також мікропори, що обконтурені гребенями відриву з борозенками від утомленості. На фрактограмі рис. 1, *a* показано, що ямки пов'язані з квазісколом. Локальна фасетка квазісколу ініційована дрібними вкрапленнями CaF_2 . Борозенки від утомленості (див. рис. 1, *б*) утворилися на границях зерен, орієнтація яких сприяла циклічній пластичній релаксації.

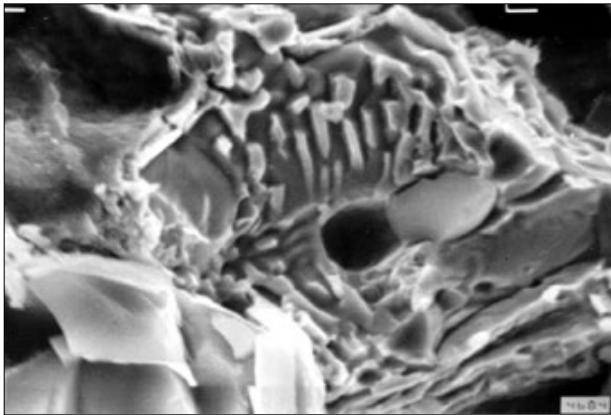
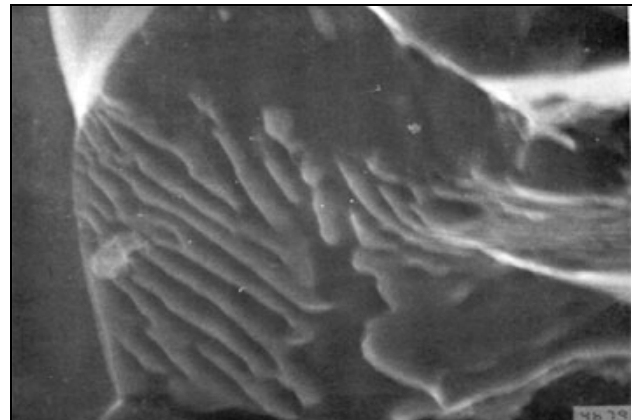
*a**б*

Рис. 1. Фрагменти поверхні руйнування композиційного матеріалу $(\text{Ni} + \text{Mo} + \text{W}) + 10\% \text{CaF}_2$; *a* – $\times 5000$; *б* – $\times 10000$

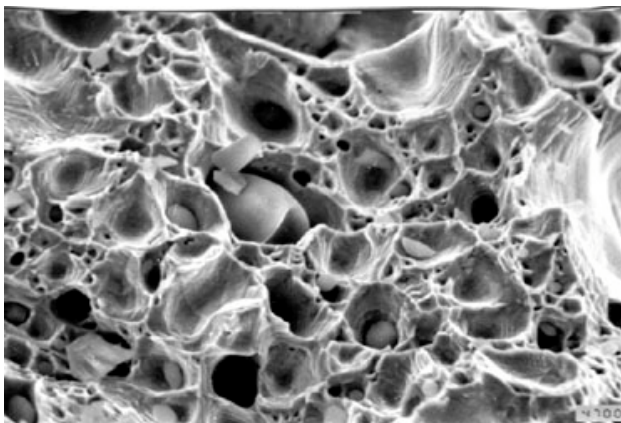
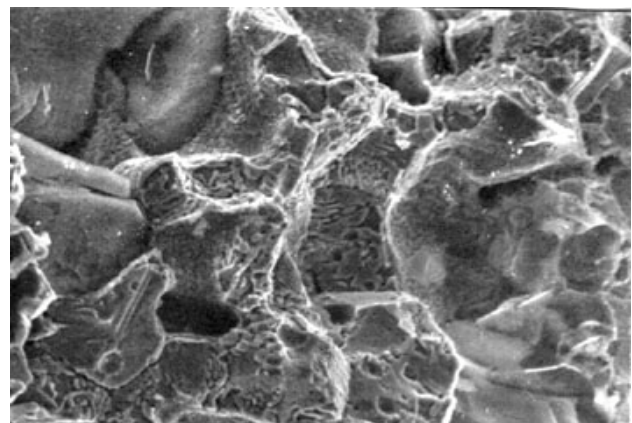
*a**б*

Рис. 2. Фрагменти поверхні руйнування композиційного матеріалу $(\text{Ni} + \text{Mo} + \text{W}) + 12\% \text{CaF}_2$, $\times 5000$: *a* – ямковий злам; *б* – фасетки сколу, облямовані гребенями відриву

Мікрорельєф зламу матеріалу складу $(\text{Ni}-\text{Mo}-\text{W}) + 12\% \text{CaF}_2$, зображений на рис. 2, поєднує ділянки дрібних ямок і міжзеренного руйнування (рис. 2, *a*), а також ділянки сколу (рис. 2, *б*).

На фрактограмі рис. 2, *a* подано мікрорельєф з утворенням ямок, на дні яких видно вкраплення CaF_2 різного розміру. На фрактограмі рис. 2, *б* зображено фасетки зерен, облямованих гребенями відриву.

Частка крихкого руйнування сколом ($\sim 20\%$) зростає із збільшенням кількості фториду кальцію в матеріалі на основі нікелю, що зумовлює зменшення значення ударної в'язкості матеріалу (див. таблицю). Появу ділянок сколу в зламі спричинено локалізацією фторидних частинок по границях зерен, які є осередками, що ініціюють руйнування сколом. На фасетках сколу помітні характерні для даного виду руйнування схо-

динки сколу, що утворюють струмковий візерунок, який спостерігається на зернах у місцях стику границь зерен.

Скол як вид руйнування – це розщеплення по певних кристалографічних площинах, що відбувається в металах, які виявляють слабку здатність до поперечного ковзання або зовсім її не мають. Тріщини сколу зароджуються в місцях з утрудненим кристалографічним ковзанням: на границях зерен, на перетині двійників і площин ковзання, на вкрапленнях і частинках другої фази. При цьому, якщо при ямковому характері руйнування спостерігається, як правило, кореляція між пластичними характеристиками і часткою в'язкого руйнування, то руйнування сколом може відбуватися в матеріалах із високими пластичними характеристиками [9].

Руйнування, що поєднує ямки і скол, є низько енергоємним і відбувається в тому разі, коли механізм руйнування змінюється від крихкого до в'язкого волокнистого.

Наявність борозенок від утомленості, ініційованих інтерметалідами, утвореними при спіканні, свідчить про відносно високу міцність матеріалу при відносно низькій пластичності (див. таблицю).

Зазначений змішаний механізм руйнування можна пояснити зниженою кристалографічною симетрією складових матеріалу (зерен). Якщо кристалографічні осі зерен зорієнтовані паралельно осі діючих напружень, то відбувається руйнування сколом, якщо ж зерна мають іншу орієнтацію, то вони зазнають менших нормальних напружень і руйнуються за в'язким механізмом з утворенням ямок.

Мікрорельєф зламу, утворений за механізмом змішаного руйнування сколом у поєднанні з відривом (див. рис. 2, б), може свідчити про високу міцність і помірну пластичність матеріалу, а також про наявність у структурі матеріалу фаз, які характеризуються різними механічними властивостями і різноманітною симетрією їх кристалічних ґраток.

З підвищенням масового вмісту CaF_2 до 15% частка ділянок крихкого сколу істотно збільшується (~40%), що призводить до зниження ударної в'язкості.

Утворення пор і фасеток сколу в процесі руйнування матеріалів на основі нікелю відбувається переважно на скупченнях частинок CaF_2 , тому встановивши масовий вміст CaF_2 , що конт-

ролює процес руйнування, до 6–12%, було піднято рівень ударної в'язкості (порівняно з матеріалом складу 5) з одночасним істотним збільшенням антифрикційних характеристик (матеріалів складів 2–4).

Висновки

Аналіз результатів комплексних досліджень, які поєднують фізико-механічні, триботехнічні і фрактографічні експерименти, дав можливість виявити закономірності зміни властивостей антифрикційних композиційних матеріалів з нікелевою матрицею, які зумовлені впливом вмісту антизадирної домішки CaF_2 та кількістю зміцнюючих легуючих елементів на інтегральні службові параметри матеріалів: із зростанням масового вмісту CaF_2 до 15% при одночасному збільшенні кількості зміцнюючих матрицю елементів Mo і W (до 15% кожного) спостерігається істотне зниження пластичності і, як наслідок, – втрата конструкційної міцності матеріалів, що супроводжується зростанням у них коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. Втім, встановивши масовий вміст CaF_2 , що контролює процес руйнування, до 6–12%, а масовий вміст Mo і W – у межах 12–15% (кожного елемента), було піднято рівень ударної в'язкості композитів з одночасним значним зростанням їх експлуатаційних (антифрикційних) характеристик.

Таким чином, проводячи всебічні дослідження зв'язку загальної конструкційної міцності матеріалів з їх антифрикційними характеристиками, можна здійснювати оптимізацію хімічного складу композитів цілеспрямованим введенням у вихідну шихту такого співвідношення легуючих елементів та антизадирних домішок, яке здатне забезпечити мінімум коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування матеріалів. Такий підхід відкриває широкі можливості керувати структурою і властивостями композиційних антифрикційних матеріалів на основі нікелю технологічними засобами.

Подальші дослідження із зазначеної проблематики будуть спрямовані на встановлення впливу хімічного складу та умов експлуатації на характер утворення плівок тертя композитів із нікелевою матрицею, їх морфології, внутрішньої будови, що відповідають за визначення рівня антифрикційності матеріалів.

Т.А. Роик, В.В. Холявко, Ю.Ю. Вицюк

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С НИКЕЛЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Выполнение комплекса всесторонних исследований физико-механических, триботехнических свойств, металлографического и фрактографического анализов композиционных антифрикционных материалов на основе никеля, легированных молибденом и вольфрамом и содержащих в своем составе твердое смазочное вещество – CaF_2 , позволяет выявить закономерности взаимосвязи конструкционной прочности композитов и их функциональных свойств в зависимости от содержания упрочняющих легирующих элементов и твердой смазки. Такой подход делает возможным осуществление оптимизации химического состава антифрикционных материалов с никелевой матрицей, благодаря чему решается научная задача прогнозирования и управления эксплуатационными свойствами композитов на основе никеля технологическими средствами. Это способствует обеспечению надежности и долговечности работы антифрикционного материала и узла трения в целом.

T.A. Roik, V.V. Kholiyavko, Yu.Yu. Vitsyuk

REGULARITIES OF PROPERTIES CHANGE AND OPTIMIZATION OF ANTI-FRICTION COMPOSITE MATERIALS WITH NICKEL MATRIX COMPOSITION

The present paper provides insights into the complex versatile research of the physical-mechanical, tribotechnical properties, metallographic and fractographic analysis of composite antifriction materials on the base of nickel, alloyed by molybdenum and tungsten with the solid lubricant CaF_2 . The results of the study reveal the regularities of the correlation between composite materials construction strength and their functional properties according to the content of hardening alloy elements and solid lubricant. We also point out that this approach enables the antifriction materials optimization with the nickel matrix chemical composition. It turns out that this approach solves a scientific problem of composite materials forecasting and control on the basis of nickel operational properties, using technological resources. The experimental evaluations demonstrate the promise of the proposed approach, which is very important for maintaining of operational reliability and durability of antifriction material in general and friction unit in particular.

1. *Роик Т.А.* Спечені композити для високих температур тертя // Вісник Житомир. інж.-технол. ін-ту. Технічні науки. – 2003. – № 1 (24). – С. 37–41.
2. *Шевчук Ю.Ф., Роик Т.А.* Порошковые антифрикционные материалы для работы при повышенных температурах // Порошковая металлургия. – 2001. – № 1-2. – С. 53–58.
3. *Роик Т.А.* Формирование антизадирных слоев в спеченных подшипниковых материалах со фторидом кальция // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Вып. 8. – С. 176–181.
4. *Гавриш А.П., Роик Т.А.* Влияние технологии получения на свойства порошковых подшипниковых материалов для тяжелых режимов трения // Вісник НТУУ “КПІ”. – 2002. – Вип. 43. – С. 67–71.
5. *Федорченко И.М., Пугина Л.И.* Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – К.: Наук. думка, 1980. – 404 с.
6. *Зозуля В.Д.* Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – К.: Наук. думка, 1989. – 288 с.
7. *Зозуля В.Д.* Смазки для спеченных самосмазывающихся подшипников. – К.: Наук. думка, 1976. – 192 с.
8. *Анциферов В.Н., Акименко Б.Н., Гревнов Л.М.* Порошковые легированные стали. – М.: Металлургия, 1991. – 318 с.
9. *Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С.* Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. – К.: ВПІ ВПК “Політехніка”, 2006. – 328 с.

Рекомендована Радою інженерно-фізичного факультету НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
25 грудня 2007 року