

Литі композиційні матеріали триботехнічного призначення

А. С. Затуловський, доктор технічних наук

А. В. Косинська, кандидат технічних наук

В. О. Щерецький

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Наведено результати досліджень щодо розробки і вдосконалення технологій виробництва металоматричних композиційних матеріалів на основі алюмінієвих та мідних сплавів, ливарних процесів поєднання композиційних складових та дослідженню структури і властивостей литих композитів.

Науковий доробок в створенні нових функціональних і конструкційних металевих матеріалів, армованих високоміцними дисперсними наповнювачами, займає значне місце в роботах вітчизняних і закордонних дослідників [1, 2]. Проте зростання обсягів використання принципово нових трибоматеріалів, зокрема, металокомпозитів, неадекватне їх техніко-експлуатаційним можливостям. Протягом останніх років високозносоустійкі антифрикційні композиційні матеріали з мідними та алюмінієвими матрицями, макро- і мікронаповнювачами, розроблені у ФТІМС НАНУ, успішно замінюють традиційні матеріали в вузлах тертя багатьох механізмів.

Виливки системи „мідь-сталь” складаються з твердих високомодульних армуючих елементів (сталеві гранули), які об’єднані в композитний виріб литою пластичною матрицею (мідні сплави) і виробляються методами просочення. Ливарна форма (з графіту, сталі) з вільно засипаними сталевими гранулами та розташованою зверху шихтовою заготовкою з мідного сплаву розміщується в камері термічної печі нагрітої до температури просочування.

Консолідація композиційних складових та утворення міцного адгезійного зв’язку досягається відповідним температурно-часовим режимом процесу Утворення оптимальних структур відбувається в інтервалі температур 1225 – 1250 °С (для матриці з бронзи БрКЗМц1), при витримці 12 – 30 хв (рис. 1). Вивчення кінетики просочування методами математичного моделювання та натурного експерименту дозволило передбачати ймовірність утворення ливарних дефектів та запобігати їх виникненню.

Змочування металом армуючих елементів є важливим фактором одержання бездефектних композиційних виливків. Дослідження контактної взаємодії високотемпературних розплавів мідних та алюмінієвих сплавів і твердих підкладок здійснювали на установці, розробленій в ФТІМС НАН України, методом лежачої краплі. Встановлено, що адгезійна активність міді і мідних сплавів на підкладках із залізвуглецевих сплавів зростає з

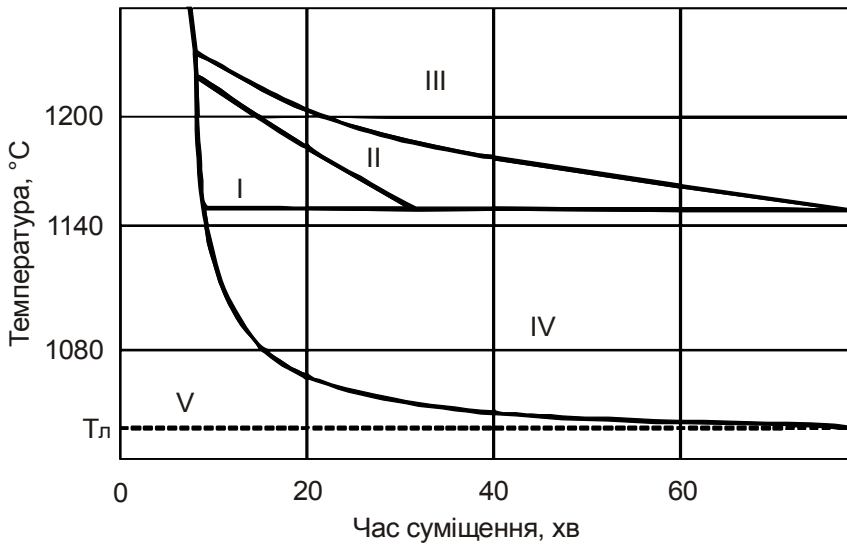


Рис. 1. Діаграма утворення структурних зон ЛКМ. I – зона просочення і адгезійного з'єднання, II – зона утворення інтерметалідного прошарку, III – диспергування гранул, IV – зона недосконалого просочення, V – зона, де просочення не відбувається.

підвищенням температури. На базі цих досліджень створено технологічні рекомендації щодо температурних режимів консолідації міді та бронз: БрКЗМц1, БрО10Ф1, БрА9Ж4 з різними залізовуглецевими наповнювачами, що дало змогу передбачити мінімальну технологічну температуру твердо-рідиннофазного суміщення, яка забезпечує повне просочення і необхідний рівень властивостей матеріалу [3].

Литий композиційний матеріал (ЛКМ) – це макроретерогенний дискретно зміцнений композит в якому згідно правила Шарпі, в м'якій пластичній матриці (мідний сплав) рівномірно розподілено тверді дискретні елементи – сталеві гранули розміром 0,8 – 2,5 мм, в кількості 60 – 70 % (об. частка).

Визначення триботехнічних характеристик ЛКМ, армованих компонентами різного типу, показало, що домінуючим фактором впливу є рівень мікротвердості фаз практично для всіх макроретерогенних ЛКМ системи „мідь – сталь”, з підвищенням значення $K = \frac{H_{m, \text{арм.фазн}}}{H_{m, \text{матриці}}}$ до 3 спостерігається тенденція зменшення коефіцієнта тертя (f) та інтенсивності зношування (I) (рис. 2). М'які і менш міцні армуючі гранули швидко руйнуються на трибоконтакті, контртіло вступає в контакт із вторинними абразивними частками, тому зносостійкість матеріалу зменшується. В результаті комплексних триботехнічних випробувань в умовах сухого тертя-ковзання було показано переваги щодо ресурсу роботи та зносостійкості нових триботехнічних матеріалів порівняно з існуючими. Визначено режими надійної роботи розроблених ЛКМ „мідь-сталь” в екстремальних умовах сухого тертя: при навантаженнях тертя до 25 МПа; швидкостей тертя до 20 м/с; несучій здатності пари тертя 100 МПа·м/с; локальному нагріві зони тертя до 850 °С).

Виробництво матеріалів цієї групи було впроваджено на ряді підприємств: ВАТ „Іллічівський рудоремонтний завод” (м. Стаханов),

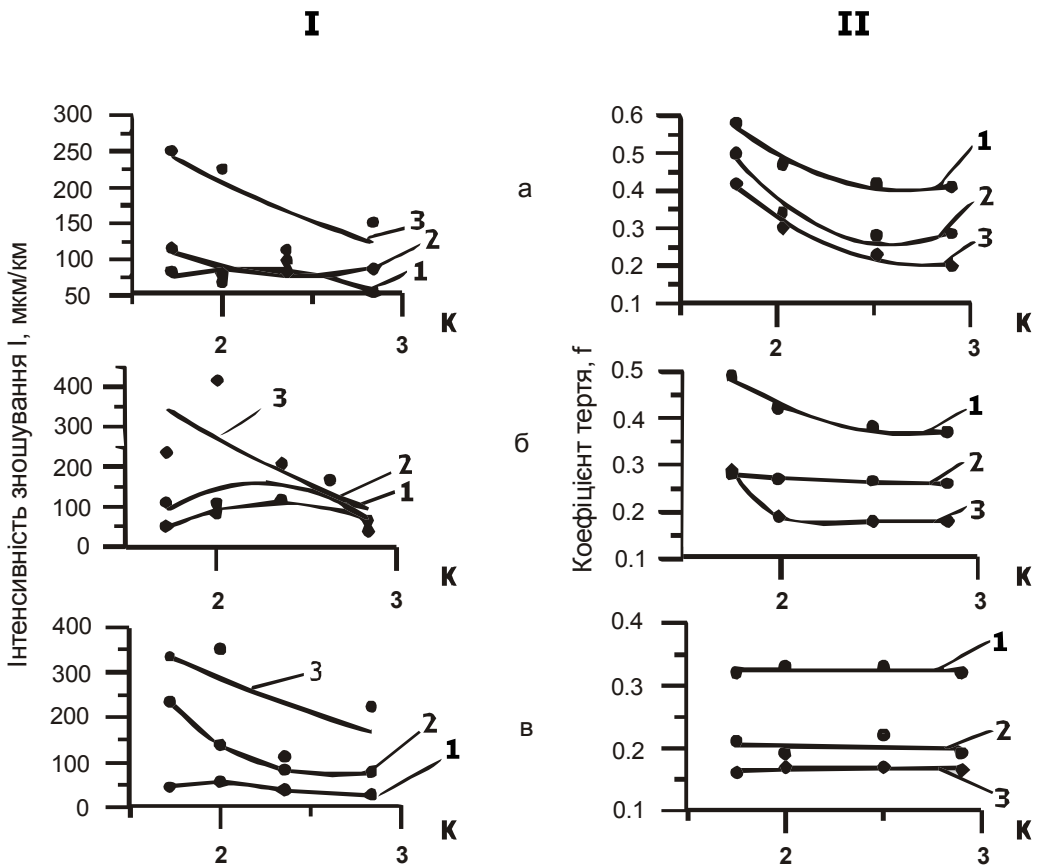


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування (I) та коефіцієнта тертя (II) від параметра мікротвердості K елементів ЛКМ при навантаженнях P : а – 5 кг, б – 10 кг, в – 15 кг і швидкостях ковзання: 1 – 5 м/с, 2 – 10 м/с, 3 – 15 м/с в умовах сухого тертя.

ТОВ „Бімет” (м. Алчевськ), RITM (В’єтнам). ЛКМ трибовироби з підвищеним ресурсом роботи пройшли дослідно-промислове випробування і впроваджені на ряді великих підприємств України, Росії, Молдови, В’єтнаму.

Іншим перспективним напрямом досліджень є вдосконалення алюмоматричних композиційних матеріалів, армованих дискретними компонентами (частинками, волокнами, плівками тощо [4]). Формування гетерогенної структури досягається введенням композиційної складової екзогенного або ендогенного типу. Ендогенна складова вводиться в металеву матрицю у складі лігатур або у вигляді хімічного реагенту безпосередньо в рідкий розплав. Для введення екзогенних композиційних зміцнювачів запропоновано два основних підходи: замішування під дією зовнішніх впливів на рідкий розплав та просочення (пряме або вакуум-компресійне) композиційної складової безпосередньо (якщо її діаметр більше 100 – 150 мкм) або в складі гранул. Замішування дискретної композиційної складової розмірами більше 100 мкм виконували за допомогою методів механічного і магнітно-динамічного замішування та відцентрового лиття.

Розроблено технологічні схеми та режими введення високомодульних дискретних частинок SiC та графіту в кількостях до 10 – 15 % при механічному замішуванні в розплав, що забезпечують одержання композиційних матеріалів на базі ливарних сплавів алюмінію з коефіцієнтом тертя, характерним антифрикційним сплавам та підвищеною зносостійкістю [5].

Також створено технологію, що поєднує ливарні і порошкові методи консолідації алюмоматричних композиційних матеріалів рідинно-фазним просочуванням у ливарній формі, ущільненої порошковою сумішшю, яка містить дискретну композиційну складову [6]. Це дозволило одержувати композити з вмістом до 70 % об. наповнювача фракцією 100 – 400 мкм, а також до 5 – 3 % (по масі) ультрадисперсних та нанорозмірних компонентів. Нова технологія нівелює негативний вплив дискретних частинок на механічні властивості матриці за рахунок їх подрібнення до розміру менше 1 мкм. Армування компонентами різних фракцій наповнювача підвищує робочі навантаження тертя в парі зі сталлю до 2,4 МПа та зносостійкість, що забезпечує інтенсивність зносу на рівні з БрАЖ9-4 [7].

Використовуючи ультрадисперсні і нанорозмірні компоненти можливо зміцнити матрицю композиційного матеріалу або за допомогою нанорозмірних фуллеренових структур вуглецю знизити коефіцієнт тертя. Внесення нанооб'єктів до складу металевої матриці виконується в складі гетерогенної системи (макророзмірний носій – нанорозмірна частинка), що дозволяє часткового засвоїти унікальні властивості нанорозмірних елементів для підвищення експлуатаційних характеристик композиційних матеріалів [8]. Наночастинки перехідних металів та високотемпературних сполук (оксидів та карбідів молібдену, титану, вольфраму, цирконію) фіксують на поверхні порошоків алюмінієвих сплавів (А7, АК7, АД31). Нанесення ультрадисперсних порошоків проводили безпосередньо в процесі їх одержання з емульсій в ультразвуковому полі. Підготовлені таким чином матеріали вводили в розплав матричних сплавів при температурах до 750 °С. Попереднє брикетування гранул (діаметр 10 мм, зусилля пресування 25 т) підвищує кількість засвоєння розплавом зміцнюючих фаз приблизно втричі порівняно з безпосереднім введенням гранул в розплав. Ефективним і водночас економним способом формування композиційної структури є кероване створення ендегенних інтерметалідних сполук в матриці алюмінієвого сплаву лігатурним методом. При цьому в якості лігатури використовували відходи механічної обробки бронзового литва [9]. Такі економно армовані матеріали на основі ливарних сплавів АК12 та АК7 є альтернативою сплавам поршневої групи. Для формування дисперсних ендегенних композиційних фаз безпосередньо в розплаві застосували термохімічний синтез (ТХС), що ґрунтується на хімічних реакціях складних сольових систем з алюмінієм.

Формування стійкого зв'язку між складовими гетерогенного матеріалу при твердо-рідинному суміщенні є головною задачею технології одержання композиційного матеріалу. Необхідною умовою зчеплення шарів є зближення атомів поєднуваних металів на відстань дії міжатомних сил, що досягається при змочуванні рідким металом твердої основи. Дослідження міжфазної взаємодії в системах алюмінієвий розплав (АК12М2МгН) – мінерали (корунд,

Нові технологічні процеси і матеріали

базальт, фтор флогопіт, карбід кремнію, алюмосилікат, графіт, мідь, латунь ЛС59-1) проводили на автоматизованій установці обробки профілю краплі [10]. Результати визначення контактного кута змочування показали, що на високомодульних підкладки до температури 1000 °С змочуваність є низькою (таблиця). При температурах вище 1100 °С практично всі досліджені підкладки змочуються алюмінієвим розплавом (рис. 3), що свідчить про необхідність значного перегріву розплаву або застосування додаткових зусиль для консолідації композиційних складових. Тому ефективними ливарними технологіями отримання дискретно армованих композиційних матеріалів є саме методи примусової заливки (просочування, литво під тиском, відцентрове литво).

Робота адгезії і кути змочування досліджених підкладок з алюмінієвим сплавом

Матеріал підкладки	Температура дослідження, °С	Контактний кут змочування, градус	Робота адгезії, мДж/м ²
Al ₂ O ₃	1150	105	537
	1190	26	1358
Кам'яне литво	1050	138	194
Фторфлогопіт	1150	148	110
Карбід кремнію (α-SiC)	1100	145	139
	1050	78	876
Алюмосилікат	1150	111	465
Графіт (ЕГ)	1190	118	379
	1240	87	737
Мідь	850	125	341
	950	12	1553

Використання методу вакуум-компресійного просочення порошкової форми дозволило знизити технологічні температури поєднання складових алюмо-матричних композитів і одержувати бездефектні алюмо-матричні виливки із заданим розподілом дискретних частинок в металевій матриці. Виготовлений за такою технологією вкладиш підшипника ковзання (SA-12С) на основі сплаву АК12М2МгН з комплексною композиційною складовою (2,5 % SiC розміром 100 – 500 нм + 10 % SiC розміром 200 – 150 мкм + 0,5 % нанороз-мірних структур вуглецю (фуллеренів) успішно

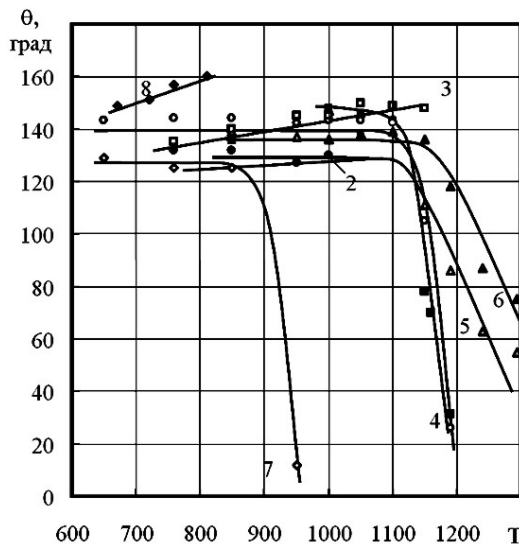


Рис. 3. Вплив температури на контактні кути змочування розплавом АЛ-25 різних матеріалів. 1 – корунд, 2 – кам'яне литво, 3 – фторфлогопіт, 4 – карбід кремнію, 5 – шмот, 6 – графіт, 7 – мідь, 8 – латунь ЛС 59-1.

пройшов дослідно-промислове випробування на карусельному верстаті КС-412 ПАТ «Київський ЕВРЗ».

За відносно короткий строк було досягнуто значних результатів в розробці методів виготовлення дискретноармованих композитів на базі сплавів міді і алюмінію та впровадженні розробок в виробництво вузлів механізмів. Це свідчить про значний потенціал матеріалів цього класу і необхідність, а головне, економічну доцільність продовження науково-технічних розробок в напрямку вдосконалення композиційних матеріалів та технологій їх виготовлення.

Література

1. Fridlyander J. N. Metal matrix composites. // Chapman & Hall, 1995. – 682 p.
2. Михаленков К. В., Могилатенко В.Г. Получение дисперстноупрочненных и композиционных материалов на основе алюминия. // Процессы литья. – 1996. – № 2. – С. 49 – 63.
3. Затуловський А.С., Верховлюк А.М. Контактні процеси в гетерофазній системі рідкий мідний сплав – тверді підложки з залізобуглецевих сплавів. // Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 3. – С. 11– 16.
4. Затуловський А.С., Косинская А.В., Шарай Е.В. Триботехнические характеристики и перспективы применения экономноармированных композитов на основе алюминиевых сплавов. // Материалы 22 ежегодной Международ. научно-практич. конф. «Композиционные материалы в промышленности». – Ялта: Укр. информационный центр «Наука. Техника. Технология», 2002. – С. 38 – 39.
5. Патент 36091 України. Спосіб одержання композиційних матеріалів з різним фракційним та хімічним складом компонентів наповнювача / Щерецький В. О., Затуловський С. С. // Опубл. 10.10.2008. – Бюл. № 19.
6. Патент 25997 України Антифрикційний композиційний матеріал для вузлів тертя-ковзання з ефектом самозмащування і низьким рівнем зношування / Щерецький В. О., Щерецький О. А., Раздобарін А. Г. // Опубл. 27.08.2007. – Бюл. № 13.
7. Щерецький В. О. Підвищення триботехнічних характеристик алюмоматричних композиційних матеріалів за рахунок комплексного армування. // Металознавство та обробка металів. – 2008. – № 3. – С. 66 – 70.
8. Щерецький В.А., Затуловський С.С. Триботехнические характеристики алюмоматричных композитов с гибридными наполнителями, включающими нанокремниевые структуры. // Литейн. пр-во. – 2008. – № 11. – С. 11 – 13.
9. Миронова Е.В., Затуловський А.С., Лакеев В.А. Литейные и триботехнические свойства антифрикционных алюминиевых ЛКМ IN-SITU. // Тезиси докладов Международ. научн.-практич. конференции «Перспективные технологии материалы и оборудование в литейной индустрии». – Киев, 2010. – С. 263 – 266.
10. Верховлюк А.М. Межфазное взаимодействие жаропрочного никелевого сплава с оксидами. // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2002. – № 35. – С. 80 – 82.

Одержано 16.07.12

А. С. Затуловский, А. В. Косинская, В. А. Щерецкий

Литые композиционные материалы триботехнического назначения

Резюме

Приведены результаты исследований в области разработки и усовершенствования технологий изготовления металоматричных композиционных материалов на основе алюминиевых и медных сплавов, процессы консолидации композиционных составляющих и изучения структуры и свойств литых композитов и технологий их получения.

A. S. Zatulovskyi, A. V. Kosinskaya, V. A. Shcheretskyi

Cast composite materials for tribotechnical applications

Summary

The article is dedicated to the development and improvement of manufacturing techniques of metal matrix composite materials based on aluminum and copper alloys. There have been studied consolidation phenomena of components of composites and structures and properties of the cast composites.

УДК 669.017.3:669.017.165:669.018.2

Пам'ять форми у природних композитах системи Zr – Ni – Co

Т. О. Косорукова

Г. С. Фірстов, кандидат фізико-математичних наук

В. Г. Іванченко, доктор технічних наук, професор

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

Інтерметалічні сполуки перерізу ZrNi – ZrCo діаграми стану системи Zr – Ni – Co зазнають мартенситного перетворення, яке супроводжується ефектом пам'яті форми з неповним відновлюванням форми. Мартенситне перетворення також має місце у одній із складових природних композитів, що утворюються в області ZrCo – Zr₂Co – Zr₂Ni – ZrNi. Показано суттєве покращання параметрів високотемпературної пам'яті форми у композитному матеріалі системи Zr – Ni – Co порівняно з інтерметалічними сполуками перерізу ZrNi – ZrCo.

В інтерметалічних сполуках системи Zr₅₀Co_{50-x}Ni_x (0 < x < 50), що зазнають мартенситного перетворення (МП), має місце ефект пам'яті форми (ЕПФ), причому ступінь відновлення форми не є 100 % [1]. Значною є пластична деформація при ЕПФ у високотемпературній області та при накопиченні