Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 20

УДК 621.923.04

ОСОБЛИВОСТІ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ДОВОДКИ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН

© А. П. Гавриш, д.т.н., професор, Т. А. Роїк, д.т.н., професор, О. О. Мельник, Ю. Ю. Віцюк, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

В данной статье рассмотрены разработанные технологические режимы магнитно-абразивного обрабатывания композиционных антифрикционных материалов на основе никелевого сплава ЕП975, а также выполнен комплексный Фурье-анализ периодичности структуры, что предоставил возможность подтвердить эффективность обработки.

In this article technological operations of magnetic-abrasive finishing to composition antifriction materials on the basis of nickel alloy ЕП975 have been presented. Also complex Fourier-analysis of structure frequency is realized, that gave possibility to confirm finishing efficiency.

Постановка проблеми

У загальній проблемі підвищення якості машин та устаткування поліграфічного призначення, ресурс роботи яких здебільшого визначається опором деталей машин різним видам контактної взаємодії, центральне місце займають питання використання матеріалів тертьових сполучень, насамперед, антифрикційних матеріалів. Це у повній мірі стосується підшипникових матеріалів, що працюють з мастилом у неважких умовах роботи (невисокі навантаження, швидкості ковзання, температури до 100 ˚С), а особливо це важливо для вузлів тертя, які призначені для екстремальних умов роботи — підвищені навантаження (3-8 МПа) та температури (250-800 ˚С), високі швидкості ковзання (20-100 м/с), оскільки 80 % відмов машин і механізмів у роботі відбувається через руйнування тертьових деталей.

Такі явища притаманні, насамперед, вузлам тертя високообертового поліграфічного обладнання, устаткування термічних цехів, транспортних засобів та установок нагрівання, переміщення виливків, апаратури та устаткування відцентрового обладнання, енергетичного устаткування.

Дія підвищених температур та питомих навантажень, високі швидкості ковзання, вплив окислювальної атмосфери — ось неповний перелік агресивних факторів, що спричинюють інтенсивне зношування вузлів тертя задіяного обладнання.

Для перелічених надважких умов роботи розроблено і традиційно використовується у теперішній час великий асорти-

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 21

мент литих антифрикційних матеріалів на основі чорних та кольорових сплавів.

Аналіз попередніх досліджень

Головне, що об'єднує ці матеріали — великий знос сполучених деталей, зростання коефіцієнтів тертя за таких умов. Крім цього, литі матеріали, що застосовуються у важких умовах роботи, а саме, литі нержавіючі сталі, нікелеві сплави, бронзи, бабіти, нездатні поєднувати у своєму складі відмінні за природою та цільовим додаванням домішки, що з одного боку утворювали б міцну матрицю, а з іншого — містили б антизадирні присадки. Вказані аргументи є причиною швидкого зносу литих матеріалів, виходу з ладу вузлів тертя, і агрегатів у цілому, що викликає потребу виготовлення у великих кількостях запасних частин, залучення до технологічного циклу додаткових потужностей, скорочення строків міжремонтних періодів тощо.

Мета роботи

Композиційні антифрикційні матеріали позбавлені цих недоліків і мають перед литими матеріалами багато переваг і широкий спектр можливостей, особливо за умови роботи у важких режимах, коли стає можливим поєднувати компоненти, що методами лиття не поєднуються.

Тому розробка ефективних композиційних підшипникових матеріалів для важких умов роботи, науково обґрунтованої технології виготовлення і фінішної обробки деталей з них є актуальною як з наукової, так і з практичної точок зору.

Основні властивості і вимоги до даних матеріалів такі: висока магнітна проникність μ; мала коерцитивна сила Нс; структурна чутливість; велика індукція насичення В.

Результати проведених досліджень

Найкращі показники роботи при високих температурах (500-700 ˚С) і підвищених навантаженнях показали матеріали на основі нікелю, оскільки залізо, мідь при таких високих температурах непрацездатні. Питання вартості відходить на другий план у порівнянні з можливістю забезпечення високих експлуатаційних характеристик.

За основу матеріалів цієї групи було обрано порошковий високолегований сплав на основі нікелю ЕП975 [1] виробництва УкрНДІспецсталь (м. Запоріжжя), хімічний склад якого наведено в табл. 1.

Для оброблення робочих поверхонь тертя високолеговано-

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву ЕП975

Елемент	C	W	Cr	Mo	Ti	Al	Nb	Co	Ni
Кількість, мас. %	0,038-0,076	8,65-9,31	7,6-9,5	2,28-3,04	1,71-2,09	4,75-5,13	1,71-2,59	9,5-11,4	решта

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 22

го сплаву на основі нікелю ЕП975 було застосовано магнітно-абразивний метод оброблення. Цей метод, на відміну від інших, видаляє дефектний шар, сформований на попередніх операціях шліфування і полірування, і формує приповерхневий шар, в якому практично відсутні дефекти структури [2].

Чистове оброблення деталей в магнітному полі феромагнітними абразивними порошками є одним з нових методів фінішної обробки, а саме магнітно-абразивне оброблення, що має на меті досягнення високої якості робочої поверхні матеріалу деталі для забезпечення надійності та довговічності її роботи.

Сутність метода оброблення полягає в тому, що оброблювана деталь розміщується в просторі між полюсами електромагніту. Зазор між деталлю та магнітом заповнюється абразивним порошком, що має магнітні властивості. Магнітне поле, яке утворене магнітами, притискає зерна до оброблюваної поверхні, щільністю яких можна варіювати в широких межах, змінюючи напруженість магнітного поля в зазорах, рис. 1. Рухаючи деталлю у відповідності до заданих законів руху (обертання разом з обернено-поступовим та осцилюючими рухами та ін.), досягають оброблення з високою точністю та шорсткістю.

На відміну від оброблення звичайним абразивом, коли різання здійснюють лише найбільш виступаючі зерна, в розглянутому випадку будь яке зерно здійснює різання при визначеній силі магнітного тяжіння. Це дозволяє інтенсифікувати процес оброблення, зводячи до мінімуму витрати часу.

При зношуванні зерна здійснюється його переорієнтація так, що найбільша вісь співпадає з напрямком магнітних силових ліній. Це сприяє підвищенню якості оброблення, так як в процесі приймають участь лише гострі зерна.

Магнітно-абразивний спосіб успішно застосовують для обробки різних за формою поверхонь: циліндричних зовнішніх і внутрішніх, плоских, тіл обер-

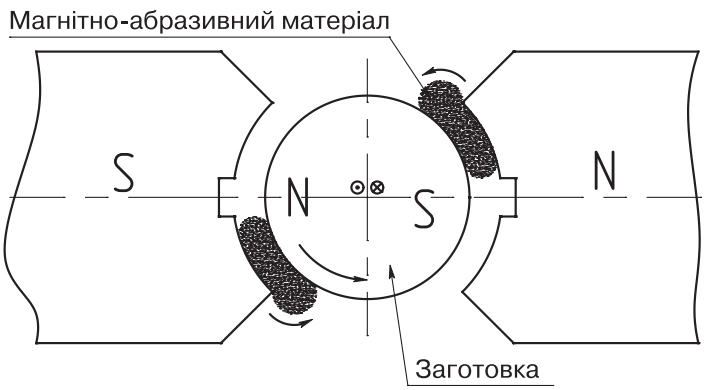


Рис. 1. Схема магнітно-абразивного оброблення

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 23

тання з криволінійною поверхнею, гвинтових та інших.

Перевагами магнітно-абразивної обробки деталей в магнітному полі є повна механізація шліфувально-полірувальних операцій складнопрофільних виробів типу тіл обертання, що дозволяє підвищити продуктивність праці в 3-5 разів у порівнянні з існуючими методами поштучної абразивної обробки; механізація фінішних операцій при обробці надтонких (товщина листа 0,05-0,5 мм) виробів магнітно-м'яких матеріалів; застосування порівняно дешевого магнітно-абразивного порошку, що знижує в 2-3 рази витрати на абразивний інструмент; відсутність необхідності періодичної перезаточки і фасонної правки абразивного інструменту; незалежність якості виробу від кваліфікації робочого, що дозволяє забезпечити значну економію засобів у споживача верстатів; відсутність жорсткого кріплення абразиву в зв'язці, що дозволяє механізувати фінішні операції при обробці магнітно-м'яких матеріалів [3].

Метою застосування магнітно-абразивної обробки є зниження шорсткості на оброблюваних поверхнях з одночасним підвищенням якісних характеристик поверхневого шару.

Дослідження цього питання виконується в рамках науково-дослідної роботи «Розробка технології отримання і обробка композиційних підшипникових матеріалів для важких умов експлуатації» (Державна науково-технічна програма МОН України № 2140-п).

Режими різання змінювалися у діапазоні: довжина зазору 1 мм, швидкість деталі 40-45 м/хв, магнітна індукція 0,5-2,5 Тл.

Температури у зоні оброблення досліджувались за допомогою термоактивних фарб, що під дією температур змінюють свій колір, наприклад, з зеленого (≈ 80 °С) на жовтий (≈ 100 °С) [3]. Були отримані такі дані, табл. 2-4.

Таблиця 2

Залежність мікротвердості оброблюваної поверхні від магнітної індукції

Індукція, Тл	Мікротвердість, Н/мм^2
0,5	1680
1	1750
1,5	1820
2,5	1900
Необроблений зразок	1650

Збільшення числа обертів оброблюваної деталі обумовлює деяке зменшення мікротвердості оброблюваної поверхні.

Таблиця 3

Залежність мікротвердості оброблюваної поверхні від числа обертів оброблюваної деталі

Швидкість деталі, м/хв	Мікротвердість, Н/мм^2
35	1780
90	1850
150	1950
Необроблений зразок	1650

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 24

Таблиця 4

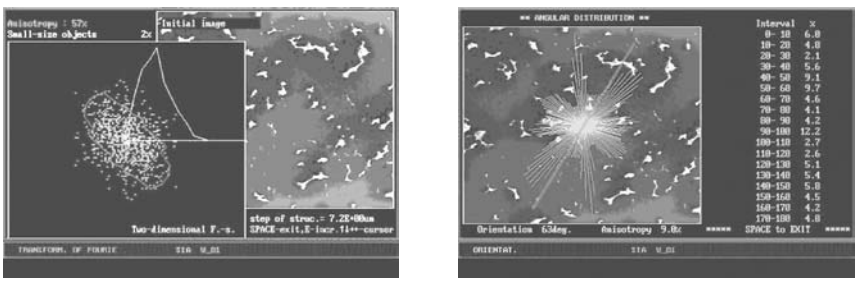
Вплив режимів різання магнітно-абразивної обробки на якість поверхневого шару деталі

Режими оброблення		Шорсткість ГОСТ — 2789-73, Ra, мкм	Мікротвердість, Н/мм^2
Число обертів магніту n, об./хв.	Індукція В, В/м^2		
300	1,6	0,32	1700
300	1,8	0,16	1780
380	1,6	0,08	1750
380	1,8	0,04	1800
Необроблений зразок			1650

Виявлена закономірність пояснюється тим, що зі збільшенням числа обертів деталі зменшується силова дія зерен на оброблювану деталь. Зменшення числа обертів деталі призводить до росту струму, деякому погіршенню «чистоти» обробки, тобто шорсткості.

Але виходячи із фізики та технології процесу магнітно-абразивного оброблення, ми бачимо, що постійно змінюється різальна кромка та одні зерна замінюються іншими. Крім того, зона оброблення постійно знаходиться під дією мастильно охолоджуючої рідини, що дозволяє активно зменшувати контактні температури та відводити елементи шару, який знімається, — стружку.

Аналіз процесу показує [4], що при обробленні має місце мікрорізання і пластична деформація поверхневого шару деталі, які супроводжуються виникненням залишкових напружень стиснення величиною 50-70 Н/мм^2 , що поширюється на



а б

Рис. 2. Фур'є-аналіз структури матеріалу на основі порошкового нікелевого сплаву ЕП975 з домішками CaF_2 (режим SE — у вторинних електронах): а — структурна (фізична) анізотропія (пряме сканування); б — орієнтація частинок сплаву (зворотне сканування)

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 25

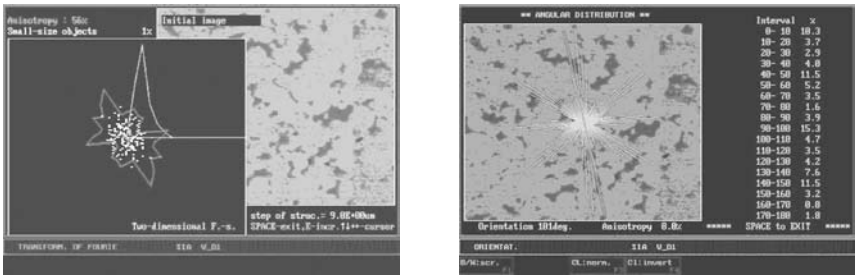
глибину 1,5-2 мкм. Це приблизно в 2-3 рази краще, ніж при абразивному шліфуванні чи доводці.

Для переконання, що при обробленні властивості матеріалу не змінилися, були зроблені дослідження розподілу структурних складових у матеріалі на основі порошкового нікелевого сплаву ЕП975 з домішками CaF_2.

Для підтвердження ефективності магнітно-абразивного оброблення композиційних матеріалів на основі порошкового нікелевого сплаву ЕП975 з домішками CaF_2 було виконано Фур'є-аналіз періодичності структури при скануванні вздовж поверхні досліджуваних зразків, оброблених за відпрацьованими режимами прецизійної механічної обробки, з використанням програмних пакетів аналізу зображень. Результати аналізу при прямому і зворотному скануванні представлені у вигляді одержаних фотозображень (рис. 2, 3).

Напруження впорядкованості структури, завжди можна охарактеризувати функціями зсуву, повороту і зрушення періодичності, тобто відповідно функціями f(x, y, z), f(α, β, γ) і p(x, y, z). Ці характеристики, які ілюструють ступінь організації структури матеріалу після виготовлення та наступної механічної магнітно-абразивної обробки, проявляються у відбитому від елементів структури спектрі (від окремих частинок композиційного матеріалу на основі сплаву ЕП975 з домішками CaF_2) і реєструються та якісно оцінюються при скануванні вузького електронного променя вздовж аналізованої поверхні зразка. Оскільки різні ділянки структури відрізняються за їх просторовою орієнтацією, вони по-різному відбивають скануючий промінь, а відтак це спричинює зміну відбитого сигналу.

При дослідженнях, виконаних за методикою Фур'є-аналізу періодичності структури, застосовувались два режими: 1 — у вторинних електронах, з рельєфу поверхні — режим SE (непружне розсіювання), 2 — у фа-



а б

Рис. 3. Фур'є-аналіз структури матеріалу на основі сплаву ЕП975 з домішками CaF_2 у фазовому контрасті (режим ВЕ — у відбитих електронах), глибина від поверхні 50 нм: а — структурна (фізична) анізотропія (пряме сканування); б — орієнтація частинок сплаву (зворотне сканування)

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 26

зовому контрасті — режим BE — у відбитих електронах (пружне розсіювання).

Кількісно було оцінено рівень структурної (або фізичної) анізотропії (рис. 2, а, 3, а) та орієнтацію елементів структури матеріалу (геометричної анізотропії) щодо головних діючих напружень шляхом аналізу фрактограм поверхні зразка (рис. 2, б, 3, б), тобто у відбитих електронах (з глибини ~ 50 нм) та у вторинних електронах — з рельєфу поверхні.

При дослідженні періодичності структури матеріалу (як у фазовому контрасті — BE, так і у вторинних електронах — SE) якісно по складності фрактограми оцінювали складність структурного стану (кількість коефіцієнтів у рівнянні Фур'є), ступінь анізотропії (структурної) головних діючих напружень, що є наслідком технології гарячого пресування матеріалу і його наступної механічної обробки, та одержували кількісну оцінку ступеня впорядкованості структури матеріалу. В зазначеному випадку застосовувався метод прямого сканування при обох режимах — SE та BE.

При прямому скануванні електронного променя вздовж поверхні зразка (режими SE та BE) визначався кут між віссю інерції і віссю абсцис кожного зі структурних елементів зображення, що показано на рис. 2, а, 3, а.

При зворотному скануванні (рис. 2, б, 3, б) для вказаних геометричних параметрів одержували розраховану гістограму набору довжин хорд структурних елементів зображення (частинок сплаву ЕП975 та частинок CaF_2) для кожного з виділених на зображенні кутових діапазонів (від 0 до 180° з інтервалом 10°).

Результати статистичного аналізу орієнтації елементів зображення, що одержані за допомогою розрахунку програмою SIA 1.00 двомірного Фур'є-спектру шляхом підрахунку числа потраплянь випадкової величини (довжин осей інерції елементів структури матеріалу) у задані кутові діапазони, узагальнювалися програмою одержанням головного вектору орієнтації структурних елементів щодо обраного напрямку сканування, сполученого з віссю абсцис.

В результаті аналізу структурного стану і реологічних особливостей шліфованої поверхні композиційного матеріалу на основі порошкового нікелевого сплаву ЕП975 з домішками CaF_2, що проводили за двомірним Фур'є-спектром, було визначено кількість (у %) найдрібніших елементів структури та кількість (у %) блоків структурних складових для кожного кутового діапазону (рис. 2, б, 3, б). Це дозволило оцінити анізотропію структури матеріалу у цілому.

Результати розподілу структурних елементів антифрикційного матеріалу на основі сплаву ЕП975 з домішками CaF_2 наведено у табл. 5.

Як показують результати досліджень, що зображені на рис. 2, 3 і табл. 5, технологія виготовлення та наступної прецизійної механічної обробки матеріалу на основі сплаву ЕП975 з домішками CaF_2 забезпечила

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 27

Таблиця 5

Розподіл структурних елементів в матеріалі на основі сплаву ЕП 975+ 6 % CaF_2

Режим аналізу	Фур'є-аналіз		Орієнтація	
	$A_{стр.}$, %	Дрібні об'єкти, %	Кут нахилу, град.	$A_{сер.}$, %
SE-рельєф поверхні (у вторинних електронах)	57	2	63	9,0
BE — у відбитих електронах-у фазовому контрасті (глибина 50 нм)	56	1	101	8,0

одержання щільного (пористість ≈ 0,1 %) деформованого матеріалу, про що свідчить структурна (реальна фізична анізотропія, $A_{стр.}$), що складає 57 та 56 % відповідно до місць аналізу — на поверхні та в об'ємі зразка (SE, BE).

Як видно, матеріал демонструє майже однаковий рівень фізичної анізотропії як на поверхні зразка після шліфування, так і в об'ємі, починаючи з глибини ~ 50 нм. Це свідчить про однорідність композиційного матеріалу у цілому.

Структурна анізотропія безпосередньо з поверхні зразка складає 57 %, що, вірогідно, пов'язано з її невеликим збільшенням при тонкому шліфуванні досліджуваного зразка. Про це також свідчить збільшення кута нахилу головного вектору орієнтації структурних елементів матеріалу з 63 до 101°.

При цьому незалежно від режиму аналізу (SE або BE) середня геометрична (орієнтаційна, Асер.) анізотропія виявилась досить низькою — 9,0 та 8,0 %. Це ілюструє рівномірне розташування частинок матеріалу у всьому його об'ємі, а відтак підтверджує високу об'ємну однорідність одержаної структури матеріалу, яка є наслідком технології гарячого ізостатичного пресування (ГІП) і наступної тонкої механічної обробки.

Розподіл частинок твердого мастила CaF_2 (4-8 мас. %) у структурі металевої матриці матеріалу на основі нікелевого сплаву ЕП975 відрізняється рівномірністю (рис. 2, 3), що сприяє утворенню стабільної плівки вторинних структур на контактних поверхнях, здатної забезпечити високий рівень функціональних властивостей матеріалу. Це, у свою чергу, мінімізує знос і стабілізує роботу пари тертя.

Одночасно з аналізом анізотропії структури матеріалу в роботі проводився якісний аналіз її текстури за фоновими ознаками: яскравість, розмір складових, форма, просторова орієнтація.

Текстуру можна описати декількома ознаками: дрібнозерниста, грубозерниста, гладка, гранульована, безладна, лінійчаста тощо.

Текстура матеріалу системи порошковий сплав ЕП975-CaF_2

Tech_process_1(27)_10_3.qxd 07.06.2010 12:30 Page 28

сформувалась під впливом зовнішніх технологічних факторів — температурних і навантажуючих параметрів при виготовленні матеріалу (окрім ознак біографічного походження при металургійному переплаві сплаву ЕП975 і його розпиленні). Тобто після виготовлення композицій-ного матеріалу за розробленими технологічними режимами удержується дрібнозерниста структура, про що свідчать рис. 2, 3.

Висновок

Таким чином, виконаний комплексний Фур'є-аналіз періодичності структури надав можливість підтвердити ефективність розроблених технологічних режимів магнітно-абразивної обробки композиційних антифрикційних матеріалів на основі нікелевого сплаву ЕП975, які здатні забезпечити високий і стабільний рівень механічних і триботехнічних властивостей. Для досягнення мінімальних параметрів наклепу можуть бути рекомендовані такі режими оброблення: індукція В = 1,5 В/м^2, довжина робочого зазору 1-1,2 мм, зернистість феромагнітного абразивного порошку 60 мкм, швидкість деталі 45 м/хв, поздовжня швидкість деталі 0,3-0,5 м/хв.

1. Пат. 40139, Україна, МПК (2009), C22C9/02. Антифрикційний композиційний матеріал на основі нікелю / Роїк Т. А., Гавриш А. П. 2. Хомич Н. С. Технология обработки и модификации в магнитном поле поверхностей наноуровня деталей электроники и оптики / Н. С. Хомич, Ю. Г. Алексеев, В. С. Нисс // Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии. VI Международная конференция. — Кисловодск—Ставрополь : СевКавГТУ, 2006. — 510 с. 3. Гавриш А. П. Дослідження параметрів наклепу при магніто-абразивній обробці високолегованих нікелевих сплавів / А. П. Гавриш, О. А. Гавриш, О. О. Мельник // Прогресивні технології і системи машинобудування : Міжнародний зб. наукових праць. — Донецьк : ДонНТУ, 2008. — Вип. 36. — С. 46-52. 4. Гавриш А. П. Залежність якості поверхонь високотемпературних підшипників ковзання на основі нікелю від методів магнітно-абразивної обробки / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. О. Мельник, Ю. Ю. Віцюк //Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. — Харків : НТУ «ХПІ», 2008. — Вип. 2. — С. 123-135.

Рецензент — В. М. Кореньков,
к.т.н., доцент, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 10.12.09