

УДК 669.01:621.762:621.89:621.9.048

Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ЕФЕКТИВНІ КОМПОЗИЦІЙНІ АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ СТАЛІ ШХ15СГ ДЛЯ СЕРЕДНЬОВАЖКИХ УМОВ РОБОТИ**

У статті наведено результати досліджень впливу розробленої технології виготовлення на властивості нових антифрикційних композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів сталі ШХ15СГ з твердим мастилом CaF_2 для середньоважких умов роботи. Показано вплив структури на властивості досліджених матеріалів. Порівняльний аналіз показав переваги розробленого матеріалу на основі шліфувальних відходів порівняно з відомим порошковим матеріалом. Обґрунтовано ефективність розробленої технології одержання композиційних антифрикційних матеріалів з використанням утилізованих шліфувальних відходів.

Ключові слова: шліфувальні відходи, сталь ШХ15СГ, технологія виготовлення, антифрикційний композиційний матеріал, структура, властивості.

Т.А. Роик, Ю.Ю. Витюк**ЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ОТХОДОВ СТАЛИ ШХ15СГ ДЛЯ СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ**

В статье приведены результаты исследований влияния разработанной технологии изготовления на свойства новых антифрикционных композиционных материалов на основе шлифовальных отходов стали ШХ15СГ с твердой смазкой CaF_2 для среднетяжелых условий работы. Показано влияние структуры на свойства исследованных материалов. Сравнительный анализ показал преимущества разработанного материала на основе шлифовальных отходов по сравнению с известным порошковым материалом. Обоснована эффективность разработанной технологии получения композиционных антифрикционных материалов с использованием утилизированных шлифовальных отходов.

Ключевые слова: шлифовальные отходы, сталь ШХ15СГ, технология изготовления, антифрикционный композиционный материал, структура, свойства.

T.A. Roik, Yu.Yu. Vitsiuk**EFFECTIVE COMPOSITE ANTIFRICTION MATERIALS BASED ON STEEL ShKh15SG GRINDING WASTE FOR MEDIUM-HEAVY OPERATING CONDITIONS**

The article presents the research results of influence the developed manufacturing technology on the properties of new antifriction composite materials based on steel ShKh15SG grinding waste with solid lubricant CaF_2 for medium-heavy operating conditions. The technological modes for the recycled grinding waste have been developed. The operations of making composites included the preparation of charge, pressing and sintering. As a result of sintering, a heterogeneous material structure was formed. The composite's structure is a metal matrix with solid lubricant inclusions. Effect of the structure on the studied materials properties was shown. Comparative analysis showed the advantages of the developed material based on grinding waste compared with the known powder material. The efficiency of the developed technology was substantiated for obtaining composite antifriction materials using recycled grinding waste.

Keywords: grinding waste, ShKh15SG steel, manufacturing technology, antifriction composite material, structure, properties.

Постановка проблеми

Розвиток різних галузей машинобудування вимагає від дослідників, конструкторів, технологів при розробленні та впровадженні у виробництво об'єктів нової техніки твердо дотримуватись поєднання технологічних та технічних аспектів розробок з економічними.

Такий підхід у повному обсязі відноситься і до питань матеріалознавства в машинобудуванні, насамперед, до спечених матеріалів для вузлів тертя, насамперед, антифрикційного призначення.

Висока вартість сировини при створенні композиційних антифрикційних матеріалів, дороге обладнання для виготовлення вихідних порошків створюють складний бар'єр для широкого впровадження у виробництво порошкових матеріалів і деталей з них, навіть якщо нові розроблені матеріали мають високі фізичні та експлуатаційні властивості. Потрібен пошук дешевих, доступних, економічно вигідних видів сировини.

В останні роки дослідники [1–4] звернули увагу та поглибили дослідження у напрямку використання дешевої сировини для створення композиційних підшипникових матеріалів для різних умов роботи.

Такою дешевою, доступною та у необмежених кількостях сировиною є шліфувальні відходи кольорових та чорних металів і сплавів машинобудівного та приладобудівного виробництва. Ці відходи з'являються на операціях шліфування штампів, ріжучого інструменту, кулькопідшипників, поршнів двигунів тощо, які безповоротно вивозяться у відвали і не використовуються у подальшому циклі виробництва в наслідок їх забрудненості абразивною крихтою, компонентами змащувально-охолоджуючої рідини тощо. Масштаби таких шліфувальних відходів у рамках заводів України важко піддаються оцінці.

Шліфувальні відходи чорних металів, зокрема, сталей містять в собі цілий ряд цінних легуючих елементів, таких як Cr, Ni, Si, Co, Mo, W, Ti та ін., що робить їх перспективною вихідною сировиною як основи для подальшого виготовлення якісних високолегованих композиційних антифрикційних деталей.

Окрім цього, за умови утилізації цінної сировини у великих кількостях та застосування її у повторному циклі виробництва, одночасно частково вирішуються завдання захисту довкілля від забруднень.

На жаль, слід зазначити, що в даний час відсутні відомості про широкі дослідження щодо створення композиційних антифрикційних матеріалів на основі шліфувальних відходів сталей різних класів.

Ряд започаткованих досліджень, спрямованих на розробку технологічних підходів до використання шліфувальних відходів деяких марок сталей для отримання ефективних конструкційних деталей, показали позитивні результати [1–4]. Це надало змогу започаткувати розробку технологічних заходів з регенерації та подальшого використання окремих типів шламових металевих відходів для виготовлення нових типів підшипників підвищеної зносостійкості [3, 4].

Проте ще й досі відсутні обґрунтовані технологічні заходи, які спрямовані на використання широкої номенклатури шламових відходів легованих сталей для виготовлення нового класу антифрикційних деталей, що не дозволяє одержувати такі деталі зі стабільно високими експлуатаційними властивостями.

Тому розробка технологічних заходів одержання нових ефективних антифрикційних матеріалів на основі шліфувальних відходів легованих сталей, розширення номенклатури використання вторинної металевої сировини, зокрема, сталі ШХ15СГ для середньоважких умов роботи, є актуальною науково-практичною задачею, розв'язання якої дозволить не тільки одержувати нові деталі з якісно іншим, високим рівнем властивостей, але і стане підґрунтям для реалізації нових ресурсо- та енергозберігаючих технологій та вирішення завдань пошуку дешевих видів сировини.

Аналіз попередніх досліджень

В останні роки науковцями було започатковано науково-практичні роботи зі створення композиційних антифрикційних матеріалів з порошків вторинної сировини, а саме, з регенованих шліфувальних відходів. Такою сировиною для виготовлення матеріалів стали порошки-відходи сталей ШХ15, Р6М5 і деяких інших. Матеріали на основі порошків-відходів цих сталей з домішками твердого мастила CaF_2 виявились здатними працювати при підвищених температурах, а також витримувати підвищені навантаження в окислювальному середовищі - повітрі [3, 4].

Іншими дослідниками було розроблено технології перероблення вторинної сировини, а саме, методів переплаву відходів деяких інструментальних сталей у вигляді стружки, для повторного виготовлення ріжучих інструментів і отримано позитивні результати [5]. Також напрацювання вчених [1, 2] за останні роки засвідчили доцільність використання шліфувальних відходів деяких марок сталей і сплавів для виготовлення з них якісних конструкційних деталей.

Втім досліджень із застосування шліфувальних відходів широкої номенклатури сталей і сплавів як основи композиційних антифрикційних матеріалів для різних умов експлуатації, було проведено у обмеженій кількості, про що свідчать лише окремі публікації з означеної проблематики [1–4, 6].

Використання промислових шліфувальних відходів для виготовлення конструкційних деталей різного призначення є привабливим з багатьох причин. По-перше, це найдешевша сировина; по-друге, сировина надзвичайно цінна з точки зору наявності легуючих елементів, що містяться у порошках-відходах, і, нарешті, по-третє, доступність сировини у великих кількостях.

З іншого боку велика різноманітність протирічних теорій у області тертя і зносу, відсутність кореляцій між тими чи іншими властивостями, фазовим складом, структурою, характером кристалічної ґратки тощо і триботехнічними властивостями матеріалів, обмеженість відомостей про фазову побудову та відсутність даних про кількісне співвідношення утворених складових у робочій плівці тертя [6], особливо у присутності антизадирних присадок, все це значно ускладнює питання створення антифрикційних матеріалів для різних режимів експлуатації і водночас робить напрямок досліджень затребуваним і актуальним.

Наведені аргументи стали підґрунтям для проведення комплексу досліджень, що спрямовані на створення нових антифрикційних матеріалів на основі шліфувальних відходів сталі ШХ15СГ для роботи в умовах самозмащення при середньоважких режимах експлуатації, а саме, при температурах до 250–350°C (або швидкостях обертання до 600 об./хв.) на повітрі при підвищених навантаженнях (5–8 МПа). Вирішення поставленої задачі відкриє шляхи розширення технологічних можливостей використання широкої гами вторинної сировини на основі науково-обґрунтованого матеріалознавчого підходу для одержання можливості прогнозування та керування службовими характеристиками нового класу матеріалів при одночасній реалізації завдань пошуку нових видів сировини, створення ресурсощадних технологій і проблеми захисту довкілля від забруднень.

Мета роботи. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу технологічних режимів синтезу на структуру і властивості антифрикційних композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів кулькопідшипникової сталі ШХ15СГ з додаванням твердого мастила CaF_2 для середньоважких режимів експлуатації.

Експериментальна частина з повним обґрунтуванням отриманих результатів

Більшість конструкційних та інструментальних сталей призначено для роботи в умовах тертя та зносу. Тому їх зносостійкі властивості є одним з важливих параметрів, що враховувались при виборі основи матеріалів для середньоважких умов роботи.

Сталь ШХ15СГ - спеціальна сталь, що призначена для роботи в умовах, потребуючих високу зносостійкість матеріалу, яка забезпечується, перш за все, присутністю наступних легуючих елементів, мас. %: С – 0,95-1,05; Мп – 0,9-1,2; Сr – 1,3-1,65; Si – 0,4-0,65; Ni - \leq 0,3.

Заевтектоїдна кількість вуглецю та хром забезпечують утворення значної кількості карбідів високої твердості та зносостійкості. Кремній також сприяє підвищенню зносостійкості сталі, а марганець, хоча і не впливає на зносостійкість у кількостях 1–2%, але разом з Si збільшує твердість та міцність фериту [7].

У умовах роботи пари тертя, коли між інших навантажуючих факторів присутній вплив підвищених температур і жодне рідке мастило стає непрацездатним, особливо важливо захистити поверхні тертя від посиленого зносу та схоплення. Для цього використовують речовини твердого мастила.

Досвід робіт і аналіз літературних джерел з даної проблематики [1, 6–8] впевнено показали перспективність використання у ролі твердого мастила для вказаних умов роботи, особливо для підвищених температур або швидкостей обертання, фториду кальцію (CaF_2), який було застосовано при проведенні експериментів.

Порошки-відходи конструкційної сталі ШХ15СГ утворюються на різних операціях обробки литих заготовок підшипників, шліфуванні сепараторів тощо. Ці відходи забруднені абразивною крихтою та компонентами змащувально-охолоджуючої рідини (ЗОР), що перешкоджає їх подальшому використанню і є причиною вивозу великої кількості потенціальної сировини у відвали.

Для очищення порошоків сталей від абразиву застосовували метод [1] магнітної сепарації з використанням магнітного сепаратора, що дозволяє здійснювати очищення відходів з продуктивністю 10 кг за годину. Залишок абразивної крихти після очищення складає 1–2%.

Щодо компонентів ЗОР, куди входять мінеральні оливи, солі натрію тощо, то їх видаляють промиванням у тетрахлоретилені. Ця операція не є обов'язковою, оскільки майбутні матеріали - антифрикційні, а солі натрію, хлору, фтору, як показали досліди [6] сприяють антизадирності та зносостійкості.

Для зниження кількості кисню здійснювали операцію відновлювального відпалу порошоків-відходів сталей у середовищі водню при температурах 850–1000°C протягом 1,5–2 год.

Після цих підготовчих операцій проводили просіювання сталевих порошоків через сито №0160. Порошки CaF_2 висушували від вологи при температурі 120°C протягом 1 год. та просіювали через сито №0125.

Головними вимогами, що пред'являються до технології виготовлення матеріалів для вузлів тертя, є можлива простота технологічного процесу, його доступність, використання недефіцитної вихідної сировини, допоміжних матеріалів та обладнання, тому ці вимоги було враховано при розробці технологічних процесів виготовлення нових антифрикційних порошкових матеріалів.

Змішування компонентів шихти, а саме композицій з порошоків-відходів сталей з домішками CaF_2 , здійснювали у банковому змішувачі з йоржами з нікелю. Кількість CaF_2 було обрано у межах 4–8 мас. %, оскільки відомо [1, 6], що оптимальний вміст CaF_2 у композиційних металевих антифрикційних матеріалах становить 10–20 об. %, що відповідає 4–8 мас. %.

Пресування здійснювали на гідравлічному пресі ПСУ–125 при навантаженнях 700–900 МПа без змазування внутрішньої поверхні матриці та пуансонів.

Процес спікання зразків здійснювали у муфельній печі у середовищі висушеного водню (точка роси = -40°C) при температурах 1100 – 1150°C , 2 год.

Після спікання матеріалів системи шліф-відходи сталі ШХ15СГ – CaF_2 структура матеріалу складається з металевої матриці, у котрій залягають частинки твердого мастила CaF_2 .

У свою чергу металева матриця матеріалу має структуру зернистого перліту, а карбідна фаза представлена у вигляді цементитних включень. Причому, на відміну від звичайного цементиту Fe_3C , що утворюється у вуглецевих сталях, карбідна фаза у матриці матеріалу на основі ШХ15СГ представляє собою легований цементит типу $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$.

Мікродифракційний аналіз виявив структуру $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ як викривлений цементит з орторомбічною ґраткою, що має періоди $a=0,451$ нм; $b=0,508$ нм; $c=0,6072$ нм.

Вивчення тонкої структури матеріалу на основі відходів сталі ШХ15СГ за допомогою реплік показало, що після спікання матеріалу при температурах 1100 – 1150°C карбід сфероїдувався, що видно з рис. 1.



Рис. 1. Сфероїзовані частинки карбідів типу $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$



Рис. 2. Карбіди типу Fe_3C у приповерхневому шарі матеріалу ШХ15СГ + 5% CaF_2 після трибовипробувань, тонка фольга

Електронномікроскопічне зображення (рис. 1) показує присутність скупчень дрібних та щільних карбідів, причому, деякі з них подовжені у певному напрямку.

Відомо [7], що кулькопідшипникова конструкційна заевтектійна сталь ШХ15СГ, що містить легуючі елементи Cr, Mn, Si, входить до особливої групи конструкційних сталей, які відрізняються високою міцністю та зносостійкістю. Для цього сталі (литі) піддають зміцнюючій термічній обробці, що включає в себе загартування з температур 800 – 880°C та низький відпуск при 150 – 160°C . При цьому досягається висока твердість HRC_e 62–65, а структура являє собою приховано кристалічний мартенсит з рівномірно розподіленими дрібними надлишковими карбідами [7].

Тобто аналізуючи рис. 1, по формі сфероїзованих карбідів та їх розташуванню у матриці можна прослідкувати попередню, а для нашого випадку вихідну структуру порошків-відходів сталі ШХ15СГ.

Розташування карбідів та їх подовженість у деяких місцях свідчать, що виділення та сфероїдизація карбідів відбувається за рисунком біографічної структури мартенситу відпуску, який початково складав структуру порошоків-відходів сталі ШХ15СГ.

Цікавою виявилась поведінка зміцнюючих фаз матеріалу після прикладання навантаження у процесі триботехнічних випробувань, що видно з рис. 2. Після випробувань на тертя та знос при

підвищених навантажень поверхневий шар було видалено електрополіруванням, а з цієї поверхні претаровано тонку фольгу.

На рис. 2 зображено виділення дрібних частинок карбідів типу Fe_3C . Від цих частинок під час деформації відбувалось зародження дислокацій. Мікрофотографія показує декілька петель дислокацій, що виходять з карбідів. На тих карбідах, що виділились на існуючих дислокаціях, під час деформації, у свою чергу, відбувалось утворення нових дислокацій.

Поява дислокацій, що чинять опір пластичній плинності і тим самим зміцнюють матеріал, сприяє підвищенню зносостійкості підшипникового матеріалу, забезпечуючи тривалий термін його роботи, особливо при підвищених температурах (або підвищених швидкостях обертання).

Крім цього, позитивним також є наступний структурний фактор - відсутність у порошковому матеріалі ШХ15СГ + 5% CaF_2 карбідної ліквациї (смугастості), яка характерна для литої сталі ШХ15СГ, внаслідок вже початкової, вихідної роздрібненості порошків відходів сталі ШХ15СГ, які по суті є мікровиливками.

Легуючі елементи Si, Mn та Cr, що входять до складу матеріалу, здійснюють позитивний вплив на властивості металевої матриці і всього порошкового композиту з CaF_2 у цілому, що видно з табл. 1. Триботехнічні властивості визначали на повітрі при швидкості ковзання 1 м/с при різних навантаженнях (2–8 МПа) та температурах до 400°C у парі з контргілом із сталі Р18 з твердістю 50–52 HRC_e. Випробування проводились на високотемпературній машині тертя ВМТ–1 за схемою торцевого тертя ковзання.

Таблиця 1.

Властивості матеріалів на основі відходів сталі ШХ15СГ+ CaF_2

Склад, мас. %	Твердість, НВ, МПа	Ударна в'язкість, Дж/м ²	Міцність при згині, МПа	Гранич. наванта- ження, МПа	Інтенсивність зношування, мкм/км, при t, °С			Коефіцієнт тертя, при t, °С		
					200	300	400	200	300	400
ШХ15СГ+(4–7)CaF ₂	660– 720	540–600	420–460	8,0	28– 31	27– 29	43– 46	0,14– 0,16	0,12– 0,14	0,14– 0,17
ЖГр3М15 [2, 6]	700	80–94	290–410	3,0	84	212	470	0,22	0,26	0,29

Дані табл. 1 показують, що використання шліфувальних відходів сталі ШХ15СГ як основи досліджуваного матеріалу в порівнянні з відомим [2, 6], що застосовується за аналогічних умов, забезпечує надання матеріалу більш високих фізико-механічних властивостей. Це відбувається внаслідок позитивної дії додатково присутніх у твердому розчині легуючих елементів кремнію та марганцю. Кремній збільшує міцність фериту, сприяючи зростанню твердості, та значно підвищує жаростійкість матеріалу внаслідок зростання опору інтенсивному окисленню у атмосфері повітря при підвищених температурах, що позитивно впливає на значення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування при зовнішньому нагріві пари тертя [7].

Після охолодження від температур спікання, що відповідають температурам гомогенізуючого відпалу, при яких забезпечується більш повне розчинення карбідів і зменшення карбідної смугастості на мікрорівні, кремній, утруднюючи самодифузію, сприяє збереженню дрібного зерна, тим самим підвищуючи фізико-механічні характеристики.

Марганець зміцнює ферит та підвищує стабільність карбідів типу Me_3C внаслідок його розчинення (як і хрому) в цементиті. Марганець заміщає залізо необмежено – від $(Fe, Mn)_3C$ до Mn_3C , а також полегшує розчинення та коагуляцію карбіду [7]. Це призводить до зростання міцності та в'язкості матеріалу (табл. 1).

Крім зростання фізико-механічних властивостей, присутність легуючих елементів кремнію та марганцю, як видно з табл. 1, спричинює значне зниження коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування при температурі 400°C на повітрі та підвищує гранично-допустимі навантаження у порівнянні з відомим антифрикційним матеріалом [2, 6].

Вплив легуючих елементів на характеристики матеріалів пов'язаний зі способом їх введення у матеріал. Так, хром проявляє себе по-різному залежно від способу введення: при додаванні у вигляді чистого порошку при виготовленні спечених композитів Cr призводить до формування надто гетерогенної грубої структури, що обумовлено уповільнюванням процесів розчинення хрому у залізній основі внаслідок його високої здатності до окислення та карбідоутворення. Подібна поведінка марганцю. Проте, одержання матеріалу з легуваних порошків забезпечує

формування більш однорідної структури. За даними [6, 7] механічні властивості хромистих сталей з легованих порошків вище, ніж у сталей, одержаних механічним змішуванням компонентів: пластичність сталей з легованих порошків у 3–4 рази вище, ніж у сталей із суміші порошків, що мають підвищену гетерогенність.

Крім цього чистий порошок Cr (особливо його підвищена кількість) призводить до „росту” зразків у процесі спікання внаслідок окислення через його високу спорідненість до кисню [6, 7].

Ці обставини значно ускладнюють технологію виготовлення матеріалів з порошками хрому - потрібні додаткові заходи для спеціального захисту матеріалів від окислення та карбідизації (йдеться про неможливість використання еногазу при спіканні), застосування додаткових операцій механічної обробки деталей, що піддались збільшенню розмірів тощо.

Висновки

Виходячи з аналізу процесів структуроутворення матеріалу на основі порошків-відходів сталі ШХ15СГ, можна зробити висновок про доцільність обраних технологічних режимів виготовлення, що забезпечують формування металографічної структури, здатної надати матеріалу високих експлуатаційних властивостей.

Одержані результати відкривають можливості керування структурою матеріалів і їх властивостями у потрібному напрямку шляхом вибору вихідних легованих порошків-відходів для створення необхідної матричної основи матеріалів та кількісними варіаціями CaF_2 для конкретних умов експлуатації.

Дослідження показали доцільність та розширення подальших робіт у даному напрямку, що обіцяє значні економічні ефекти. Особливу значимість тематика отримує у зв'язку з нестачею високолегованих сталей і сплавів, необхідністю підвищення ресурсу роботи вузлів тертя в широкому діапазоні навантажуючих факторів, а також вирішенням завдань захисту довкілля від забруднень.

Література

1. Роїк Т. А. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації: Монографія/ Роїк Т. А., Киричок П. О., Гавриш А. П. - К.: НТУУ „КПІ”, 2007.- 404 с.
2. Киричок П. О. Новітні композиційні матеріали деталей тертя поліграфічних машин: Монографія/ Киричок П. О., Роїк Т. А., Гавриш А. П., Шевчук А. В., Віцюк Ю. Ю.- К.: НТУУ КПІ, 2015.- 428 с.
3. Патент України № 122870, МПК С22С 21/02 (2006.01) Композиційний зносостійкий матеріал / Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк.- Заявка № u 201708942 від 08.09.2017.- опубл. 25.01.2018, Бюл.№ 2. - 4 с.
4. Гавриш А. П. Новые высокотемпературные подшипниковые материалы на основе отходов инструментальных сталей / Гавриш А. П., Роик Т. А. // Механіка та машинобудування. – 2003. - №1. – Т. 2. – С. 193-198.
5. Шпак П.А. Влияние электронно-лучевого переплава на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 / Шпак П.А., Гречанюк В.Г., Осокин В.А. // Проблемы специальной металлургии. – 2002. – №3. - С. 14–17.
6. Косторнов А. Г. Триботехническое материаловедение: Монография. — Луганск: «Ноулидж», 2012. — 701 с.
7. Анциферов В. Н. Порошковые легированные стали/ Анциферов В. Н., Акименко Б. Н., Гревнов Л. М. - М.: Металлургия, 1991. – 318 с.
8. Зозуля В. Д. Смазки для спеченных самосмазывающихся подшипников. – К.: Наукова думка, 1976. – 191 с.

Стаття надійшла до редакції 05.03.2018