

УДК 621.793

А.М. Степанчук, М.Б. Шевчук, Л.О. Бірюкович, А.П. Воробей
Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ СТВОРЕННЯ ТОВСТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ПОВЕРХНЯХ ДЕТАЛЕЙ ОБЕРТАННЯ

Background. Creation of theoretical and technological basics of obtaining thick layer coating from composite materials on the rotation details surface is actual task. In order to solve this problem, it is necessary to determine dependencies of coating properties from characteristics of material and obtaining conditions.

Objective. The purpose of this paper is conduction a model studies of thick layer coating of composite materials based on solid refractory compounds and self-fluxing alloys on the detail with a horizontal axis of rotation obtaining process. Investigation of the influence of density granules rotational angular velocity of shape, size of the particles (granules) form and size on the centrifugal force during sealing and impregnation, as a result, the density of the obtained products was assumed.

Methods. Acting stand for obtaining thick layer coatings by centrifugal impregnation of solid granules of refractory compounds melts of metals and alloys using induction heating in the external and internal surfaces of revolution was developed. Study of the properties and structure of the obtained materials was carried out using modern methods of determining the density of composite materials and optical and electron microscopy, computer technology.

Results. Physical and mathematical models of obtaining thick layer coatings on the surfaces of details of rotation were developed. It allows evaluation of the influence of pellets density, the angular velocity of shape rotation, particles (pellets) size and mold size to centrifugal force during sealing and impregnation, as a result, obtained products density. The dependence of the sealing force of the powder density is linear, the radius of the particles – cubic, the angular velocity – quadratic, and shape radius – a linear dependence. Real samples of coatings have been got and density and structure depending on the particle size distribution of solids part of coatings were studied. Obtained results are adequate for the proposed theoretical dependences in this work.

Conclusions. The regularities of structure formation and composite thick layer coatings properties, obtained by centrifugal impregnation of starting materials composition, and conditions of receipt.

Keywords: thick layer coating; solid refractory compounds; self-fluxing alloys; centrifugal impregnation; grain size; structure; density

Вступ

Сучасною актуальною проблемою є збільшення працездатності деталей машин і механізмів гірничо- та нафтодобувної, будівельної, машинобудівної галузей, які працюють в умовах зносу тертям, дії абразивних середовищ тощо [1, 2]. Одним із методів збільшення працездатності таких деталей може бути нанесення багатофункціональних товстошарових покриттів, які можна створювати наплавленням композиційних покриттів, що складаються з гранул твердих тугоплавких сполук (ТТС) та металевої зв'язки [3, 4]. Але такі покриття не завжди гомогенні та часто потребують значної механічної обробки. Також проблемним є створення таких покриттів на внутрішніх і зовнішніх поверхнях обертання, наприклад на поверхні напрямних роликів прокатних станів у металургійній промисловості, ущільнювачів бурових пристроїв тощо. Перспективним у цьому контексті є застосування методу відцентрового просочування гранул ТТС розплавами металів та сплавів [5, 6], насамперед самофлюсівними [7]. Тому розробка теоретичних і технологічних ос-

нов отримання таких товстошарових покриттів на поверхнях деталей обертання є актуальною проблемою. Зважаючи на те що виготовлення експериментальних виробів із композиційних матеріалів методом відцентрового лиття є трудомістким і довготривалим процесом, уявлення про реальний хід процесів формування властивостей покриттів, отриманих цим методом, можна одержати, застосовуючи метод моделювання.

Мета роботи

Мета роботи – провести модельні дослідження процесу отримання товстошарових покриттів на деталях обертання з горизонтально розміщеною віссю обертання. Для цього необхідно дослідити вплив складу вихідного матеріалу та частоти обертання на формування властивостей покриттів.

Результати досліджень і їх обговорення

У роботі для проведення досліджень щодо впливу відцентрових сил на процес формування товстошарових покриттів за наявності рідкої

фази за температур до 1500 °С було розроблено конструкцію і виготовлено діючий стенд установки, схема якої показана на рис. 1.

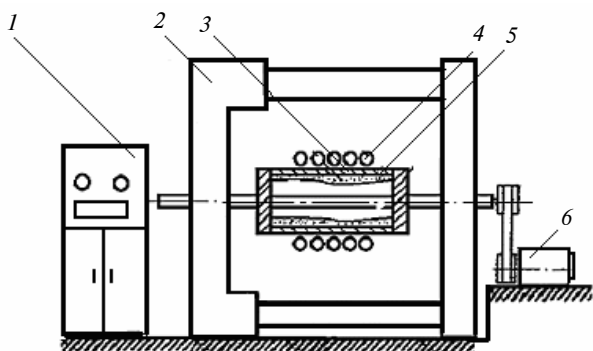


Рис. 1. Схема установки для формування покриттів відцентровим формуванням: 1 – генератор високої частоти; 2 – станина; 3 – керамічна форма; 4 – індуктор; 5 – прошарок вихідної шихти; 6 – електродвигун

Стенд дає змогу досліджувати процеси ущільнення порошкових матеріалів, суспензій (шлікерів) і порошкових композиційних матеріалів просоченням розплавами металів і сплавів на поверхнях обертання під дією відцентрових сил. Можливе також створення на зовнішніх і внутрішніх поверхнях товстошарових покриттів з одночасним виготовленням деталей.

При створенні на поверхні циліндричної деталі товстошарового покриття з композиційного матеріалу за участю гранул із твердих тугоплавких сполук і самофлюсівного сплаву на основі заліза принцип дії стенду такий. На внутрішній поверхні керамічної форми 3 під дією відцентрових сил формується прошарок 5 із суміші гранул і порошку самофлюсівного сплаву. Для цього суміш (можливо у вигляді суспензії) засипають у форму і потім починають обертати за допомогою двигуна 6 з кількістю обертів, що регулюється. Після цього таким же чином формується прошарок із матеріалу основи. Потім за допомогою індуктора 4, який живиться від генератора високої частоти 1, матеріал нагрівають до температури плавлення матеріалу основи і самофлюсівного сплаву. Під час обертання форми під дією відцентрових сил відбувається просочення каркаса з гранул твердого сплаву розплавом самофлюсівного сплаву і формування основи деталі.

Для досягнення поставленої мети була побудована силова модель відцентрового просочення гранул згідно зі схемою дії сил на частинку гранули з твердої складової покриття, показаної на рис. 2.

Відцентрова сила, яка діє на частинку при частоті обертання форми n [6, 8], дорівнює

$$F_{\text{ц}} = mr\omega^2,$$

де m – маса частинки, кг; r – радіус обертання, м; ω – кутова швидкість форми, хв^{-1} ($\omega = \pi n/30$).

При розрахунку силової взаємодії допускаються спрощення:

- 1) рух рідини (розплаву) стаціонарний у ламінарному режимі;
- 2) рідина однорідна і її можна розглядати як нестисливу ($\rho = \text{const}$);
- 3) частинки гранул мають рівновісну форму.

За другим законом Ньютона, під час руху тіла в рідині на нього діють сили тяжіння ($F_{\text{тяж}}$), відцентрова сила ($F_{\text{вцтр}}$), архімедова сила ($F_{\text{арх}}$) і сила опору ($F_{\text{оп}}$) (сила тертя частинки з рідиною):

$$F_{\text{тяж}} + F_{\text{вцтр}} + F_{\text{арх}} + F_{\text{оп}} = 0.$$

Відповідно до закону Стокса, опір середовища зумовлений практично тільки силами тертя. Сила опору в цьому випадку пропорційна коефіцієнту динамічної в'язкості η , швидкості руху тіла відносно рідини v і характерному розміру тіла l :

$$f \sim k\eta lv.$$

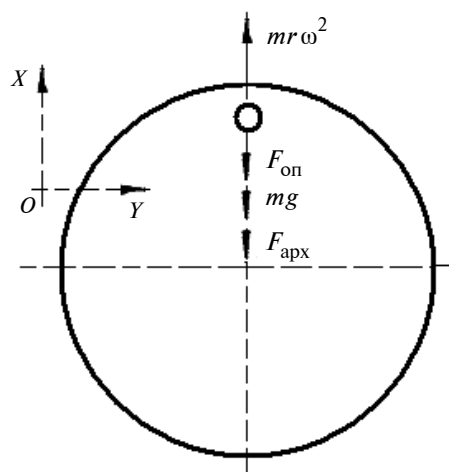


Рис. 2. Положення кульки, за якого всі сили будуть направлені проти дії відцентрової сили

Коефіцієнт пропорційності (k) залежить від форми тіла. Для кулі, якщо за l взяти радіус кулі R , коефіцієнт пропорційності дорівнює 6π . Отже, сила опору руху частинки рівновісну (сферичної) форми в рідинах за невели-

ких швидкостей відповідно до закону Стокса може бути визначена за формулою [6, 8, 9]

$$f = 6\pi\eta Rv,$$

Сила Архімеда визначається за формулою

$$F_{\text{арх}} = \frac{4}{3}\pi R^3 g \rho_{\text{ч}}.$$

Рідину, в якій міститься велика кількість дрібних твердих частинок (суспензія), можна розглядати як однорідне середовище, яке буде мати ефективну в'язкість η , відмінну від в'язкості η_0 основної рідини. Ця в'язкість для випадку частинок кулястої форми може бути розрахована за формулою Ейнштейна:

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{5}{2} \varphi \right),$$

де $\varphi = \frac{4\pi R^3}{3} n$ (n – кількість частинок).

Виходячи зі схеми, зображеної на рис. 3, та відповідно до другого закону Ньютона можна записати нерівність, при виконанні якої гранули тугоплавкої складової будуть ущільнюватись і формувати покриття:

ОХ:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\text{ч}} r \omega^2 &> \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\text{р}} (r \omega^2 - g) + \\ &+ 6\pi\eta R v + \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\text{ч}} g. \end{aligned} \quad (1)$$

Виконання нерівності (1) є необхідною умовою для руху гранули в напрямку до зовнішньої частини форми. Якщо врахувати, що частинка почне рух при як завгодно малій швидкості v і граничних умовах $r \omega^2 > g$, і якщо початкову швидкість прирівняти до 0, $\rightarrow f = 6\pi\eta R v = 0$, то можна розрахувати макси-

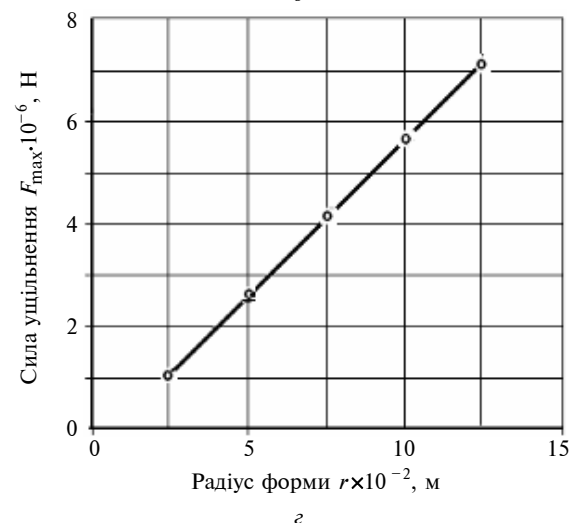
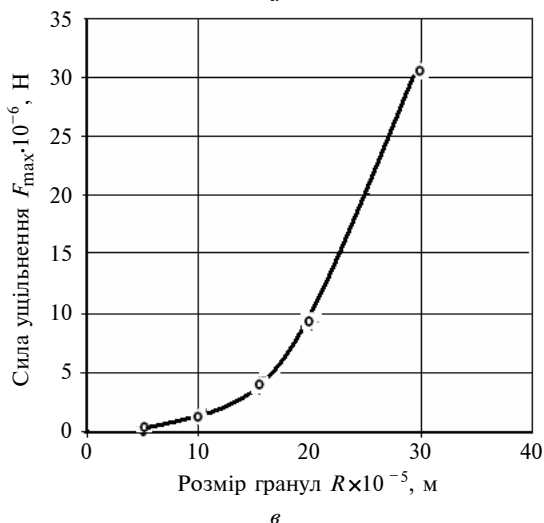
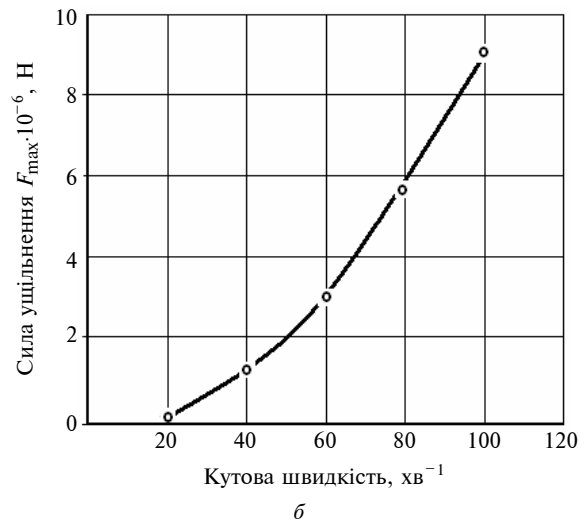
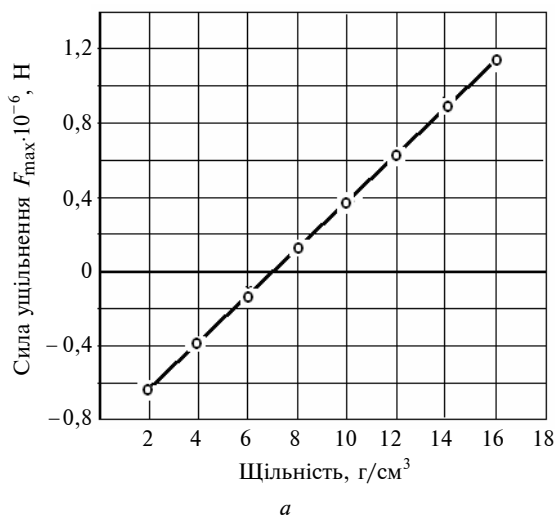


Рис. 3. Вплив щільності порошку (а), кутової швидкості (б), розміру частинок (гранул) (в) та радіусу форми (г) на силу ущільнення

мальну силу, яка буде діяти на частинку в початковий момент часу за певної частоти обертання форми.

З використанням нерівності (1) було проведено розрахунки та визначено залежності сили ущільнення від кутової швидкості, щільності, розміру гранул та розміру форми. Відповідні залежності зображені на рис. 3, з якого видно, що спостерігається тенденція до збільшення сили ущільнення з ростом кутової швидкості, щільності, розміру частинок та розміру форми. Крім того, за щільності $\rho_p > \rho_c$ результатом є зміна знака (змінюється напрямок дії сили). З цього також слідує, що при щільності частинки більше щільності рідини частинка буде рухатися до зовнішньої частини форми, при щільності менше щільності рідини частинка буде спливати до середини форми.

З графіків на рис. 3 видно, що залежність сили ущільнення від густини порошку має лінійний характер, залежність від радіуса частинок є кубічною, від кутової швидкості – квадратичною, а від радіуса форми – лінійною, що теоретично підтверджується нерівністю (1).

Проведення експериментів з отримання товстошарових покриттів із композиційних матеріалів методом відцентрового просочення на реальних об'єктах є матеріало-, енерго-, трудомістким і довготривалим процесом. При цьому повністю не вдається з'ясувати механізми формування заданих властивостей виробів, правильно представити реальний хід процесів ущільнення матеріалу. Багато в чому розв'язати ці задачі допомагає метод моделювання процесу відцентрового лиття, який є оперативним і простим методом виявлення особливостей формування структури композиційного матеріалу під час відцентрового лиття та запобігає утворенню браку й непотрібним витратам матеріалів.

З використанням теорії подібності для моделювання процесу в роботі було підібрано необхідні матеріали [10].

Повна подібність до реальних процесів, що відбуваються при відцентровому литті в моделях, як відомо, "недосяжна". Тому на практиці застосовують методи наближеної подібності, за яких моделюються основні параметри процесу. Подібність явищ визначається рівністю критеріїв подібності. Подібність між двома явищами досягається при забезпеченні геометричної, кінематичної та динамічної подібності [6].

У геометрично подібних систем сталими мають бути співвідношення площ та об'ємів. Під кінематичною подібністю мається на увазі, що швидкості v_n і v_m та прискорення a_n і a_m у подібних точках натури і моделі знаходяться в однакових співвідношеннях:

$$\frac{v_n}{v_m} = M_v = \text{const},$$

$$\frac{a_n}{a_m} = M_a = \text{const}.$$

Для розрахунку масштабів моделювання процесів відцентрового лиття, що відбуваються в однорідних фізичних системах, для справжнього моделювання з урахуванням зовнішніх дій та фізичних параметрів система може бути виражена як функція із сукупності величин. На рідину під час відцентрового лиття діють такі сили: тяжіння, атмосферного тиску, відцентрова, тертя, поверхневого натягу. Для повної подібності необхідно дотримуватися подібності усіх перелічених сил.

Подібність сил тяжіння визначається критерієм Фруда:

$$Fr = \frac{gl}{v^2}.$$

Відповідно до відцентрового лиття у випадку виникнення сили Коріоліса критерій Фруда набуває такого вигляду:

$$Fr_x = \frac{2\omega v l}{g v^2} \text{ або } Fr_x = \frac{\omega l}{v}.$$

Подібність сил тертя визначається критерієм Рейнольдса:

$$Re = \frac{vl\rho}{\mu},$$

де v – швидкість потоку, l – характерний розмір, ρ – густина рідини, μ – динамічний коефіцієнт в'язкості середовища.

Подібність сил поверхневого натягу описується критерієм Вебера, який визначає відношення сил поверхневого натягу до сил інерції:

$$We = \frac{\sigma}{\rho l v^2},$$

де σ – поверхневий натяг.

Отже, при моделюванні процесу було враховано всі перелічені вище критерії, а також фізичні параметри покриття і моделі:

$$\frac{\rho_{\text{тв.ч.}}}{\rho_{\text{СФЗ}}} = \frac{\rho_{\text{тв.ч.м.}}}{\rho_{\text{розч.м.}}}.$$

Тобто співвідношення щільності твердих частинок (литий карбід вольфраму) та самофлюсівного сплаву натури мають бути рівними співвідношенню твердих частинок і сплаву моделі. Динамічні в'язкості самофлюсівного сплаву та модельної речовини мають бути пропорційними.

Виконавши розрахунки відповідно до викладеного вище для різних матеріалів, з'ясували, що найбільш придатним для моделювання розплаву самофлюсівного сплаву є епоксидний клей з динамічною в'язкістю 1,04 Па·с (за температури 70 °С). Як модель твердих частинок карбиду вольфраму використовували порошок кремнію.

Проведені модельні дослідження показали можливість отримання композиційних покриттів на поверхнях обертання з властивостями, адекватними до розрахункових. Загальний вигляд отримуваних зразків показаний на рис. 4.



Рис. 4. Загальний вигляд зразків, отриманих відцентровим ущільненням

Оскільки розроблена математична модель не враховувала вплив фракційного складу вихідних гранул твердої складової, в роботі вивчали його вплив на щільність покриття.

Відомо [11, 12], що бімодальні комбінації частинок, особливо при вібраційному формуванні, можуть упаковуватись до більш високої щільності, ніж монорозмірні частинки. При цьому визначальним фактором у пакуванні є

співвідношення розмірів частинок. Середній розмір частинок дрібної фракції вибирають таким, щоб вони розміщувалися в пустотах, утворених частинками крупнішої фракції. При цьому відносна щільність упакованої суміші частинок залежить від співвідношення їх розмірів.

Якщо розглядати потрібну суміш великих, середніх і малих частинок, то закономірності пакування можна зобразити у вигляді потрібної діаграми складів з проекціями контурів однакової щільності на рівнобічний трикутник, утворений осями складів бінарних сумішей (рис. 5). Склад суміші визначається відстанню від кожної граничної точки. В кожній бінарній суміші найвища щільність пакування реалізується на боці більшої концентрації більших за розміром частинок. Як і можна очікувати, висока щільність пакування реалізується в суміші великих і малих частинок. У той же час залежно від співвідношення розмірів проміжна потрібна суміш з вмістом середніх частинок може мати більшу густину пакування, ніж бінарна суміш великих і малих частинок. Склад суміші, що утворює пакування з максимальною щільністю, залежить від співвідношення розмірів частинок трикомпонентного порошку.

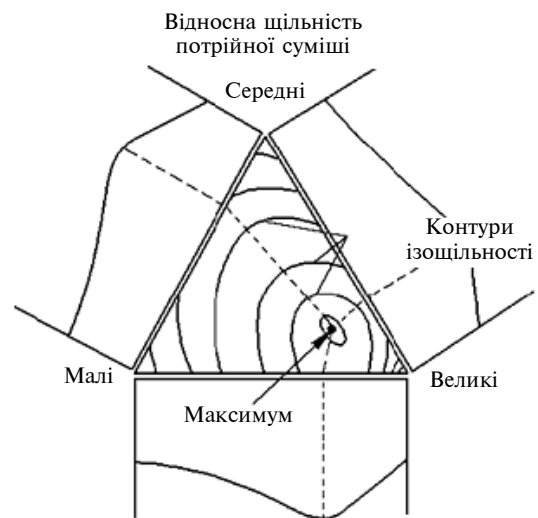


Рис. 5. Діаграма пакування потрібної суміші великих, середніх і малих частинок

Для мультимодальних сумішей і безперервного розподілу частинок порошоків за розміром загальна тенденція до підвищення відносної щільності зберігається, якщо розміри частинок різняться принаймні у 7 разів. Якщо ж різниця в розмірах частинок незначна, то на збільшення щільності пакування не слід очікувати.

Отже, важливе значення для отримання максимально щільних виробів при відцентровому формуванні має гранулометричний склад порошків. Найвищі значення щільності досягаються під час ущільнення порошків, що містять дві і більше фракції. При цьому важливим є співвідношення розмірів частинок окремих фракцій, яке повинне бути таким, щоб дрібніша фракція повністю просіювалась через паралелограмну пору, утворену найдрібнішими частинками крупної фракції. Так, при вібраційному ущільненні порошкових виробів повне просівання забезпечується при виконанні такої умови [11]:

$$d_{\max} = 0,256 D_{\min}, \frac{D_{\min}}{d_{\max}} > 3,77,$$

де $d_{\max}$ — максимальний розмір частинок дрібної фракції, $D_{\min}$ — мінімальний розмір частинок крупної фракції.

Для отримання заданої щільності виробів при формуванні їх із порошків, що складаються з декількох фракцій, важливим є кількісне співвідношення цих фракцій. За В.В. Івашенком [13], щільність двокомпонентної системи може бути визначена так:

$$\gamma = \gamma_{\text{кр}} [1 + x_1(1 - \theta)],$$

де $\gamma_{\text{кр}}$ — щільність заповнення форми найкрупнішими частинками порошку матеріалу г/см^3 , у першому наближенні ця величина рівна щільності утруски; θ — відносна щільність заповнення форми найкрупнішим порошком. Для сферичних частинок і відносно великих об'ємів, що ущільнюються, ця величина змінюється в межах 0,62–0,68; x_1 — коефіцієнт відносного заповнення, що змінюється в межах $1 > x_1 > 0$ і дорівнює $x_1 = \frac{\theta_1}{\theta}$; θ_1 — відносна щільність заповнення об'єму дрібнішою фракцією.

Для випадку, коли порошок, який ущільнюється, складається з $(n + 1)$ фракцій, щільність і кількісне співвідношення фракцій можуть бути визначені з таких виразів:

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_{\text{кр}} [1 + x_1(1 - \theta) + x_2(1 - \theta)(1 - x_1\theta) + \dots + \\ &+ x_n(1 - \theta)(1 - x_1\theta) \dots (1 - x_{n-1}\theta)], \\ 1 : x_1(1 - \theta) : x_2(1 - \theta)(1 - x_1\theta) : \dots \\ &\dots : x_n(1 - \theta)(1 - x_1\theta) \dots (1 - x_{n-1}\theta). \end{aligned}$$

Коефіцієнт з достатньою для практики точністю може бути визначений з виразу

$$x_n = 1 - 2,2 \frac{d_n}{d_{n-1}}$$

при $\frac{d_n}{d_{n-1}} \leq 0,265$.

З урахуванням викладеного вище нами були визначені фракції та співвідношення вихідних гранул твердої складової композиції.

Гістограма зміни насипної щільності вихідної суміші гранул залежно від її фракційного складу наведена на рис. 6, а, а гістограми щільності отриманих модельних зразків — на рис. 6, б.

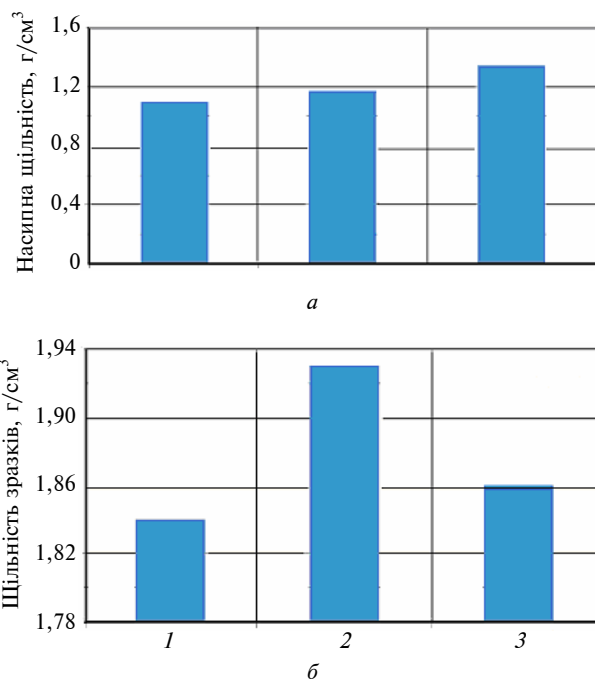


Рис. 6. Гістограми щільності зразків вихідних сумішей (а) та після відцентрового ущільнення (б) залежно від їх фракційного складу: 1 — одноmodalьна, 2 — двомодальна, 3 — тримодальна

Результати визначення насипної щільності вихідних гранул узгоджуються з викладеними вище уявленнями про пакування порошків при їх ущільненні під дією вібрації або утрусування. Збільшення кількості фракцій у вихідній суміші сприяє отриманню більш щільних виробів. Щодо щільності зразків, отриманих відцентровим просоченням, то її залежність від вмісту фракцій неоднозначна.

Як видно з рис. 6, б, щільність зразків з використанням для їх отримання тримодальної

суміші займає проміжне положення. Хоча, як видно з рис. 6, *а* і виходячи з теоретичних уявлень, викладених вище, у цьому випадку мали б спостерігати найбільшу щільність.

Отримані результати з визначення щільності зразків, отриманих відцентровим просочуванням, узгоджуються з результатами вивчення їх структури (рис. 7), які показують, що найбільша щільність упаковки спостерігається для бімодальних сумішей (рис. 7, *б*). Зі структури таких матеріалів видно, що частинки дрібної фракції розміщені між частинками крупної. Використання тримодальних сумішей не приводить до збільшення щільності пакування (рис. 7, *в*), як це слідує з теоретичних уявлень та має місце при пакуванні вібрацією за відсутності рідини (розплаву).

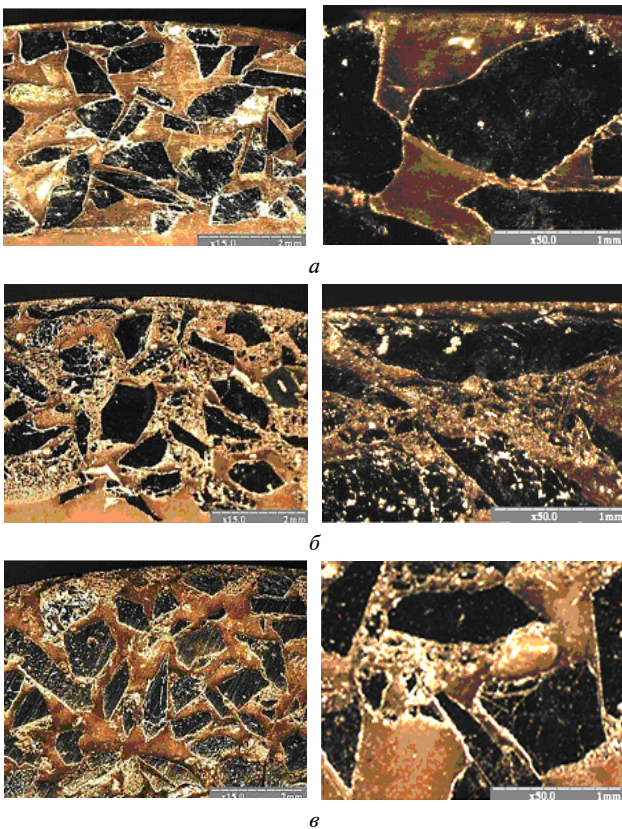


Рис. 7. Мікроструктура модельних зразків із використанням різних сумішей порошків твердої складової покриттів: *а* — одномодальна, *б* — двомодальна, *в* — тримодальна суміш порошків

Останнє може бути пояснене тим, що, на відміну від теоретично максимально можливого пакування порошків, розробленого для сфе-

ричних частинок, у випадку частинок неправильної форми можуть утворюватись пори менших розмірів, ніж величина середньої фракції порошку (підібраного з використанням теорії пакування), і, таким чином, відбувається закупорювання пор. Крім того, на відміну від вібраційно ущільнених порошків, при відцентровому литті частинки піддаються впливу однонаправленої радіальної сили, що не сприяє переміщенню частинок одна відносно одної у різних напрямках, як у випадку вібраційного формування. Слід також враховувати те, що за наявності рідини, яка змочує поверхню твердої фази у місці контакту крупних і дрібних частинок, виникають меніски і, як наслідок, лапласівські (капілярні) сили, які стягують (склеюють) частинки. Останнє утруднює відносне переміщення частинок і більш щільне їх пакування. При цьому ці сили зростають зі зменшенням радіуса кривизни меніска, який пов'язаний із розміром частинок гранул. Це може і бути однією з причин того, що щільність зразків, які отримані з використанням тримодальних сумішей із наявністю в них більш дрібних частинок, менша, ніж у зразків, отриманих із використанням бімодальних сумішей.

Висновки

Проведено модельні дослідження процесів отримання товстошарових покриттів із композиційних матеріалів відцентровим просочуванням гранул з твердої тугоплавкої складової розплавами самофлюсівних сплавів на основі заліза. Розроблено фізичну та математичну моделі отримання товстошарових покриттів на поверхнях деталей обертання, яка дала змогу оцінити вплив щільності гранул, кутової швидкості обертання форми, розміру частинок (гранул) та розміру форми на силу ущільнення при відцентровому просочуванні і, як наслідок, на щільність отримуваних виробів. Встановлено, що сили ущільнення від густини порошку має лінійний характер, залежність від радіуса частинок є кубічною, від кутової швидкості — квадратичною, а від радіуса форми — лінійною. Отримані результати адекватні теоретичним залежностям, запропонованими у роботі.

У подальшому доцільним є проведення досліджень з отримання натурних покриттів на деталях обертання та вивчення їх властивостей.

Список літератури

1. *Белорусская* научно-техническая программа “Триботехника” / Ю.М. Плескачевский, В.Н. Савицкий, В.В. Кончиц, В.А. Барабась // Трение и износ. – 1995. – **16**, № 3. – С. 404–415.
2. *Сиваченко Л.А., Селезнев Н.Г., Шуляк В.А.* Проблема износа рабочего оборудования дробильно-размольных машин // Трение и износ. – 1995. – **16**, № 3. – С. 599–609.
3. *Bao J., Newkirk J.W., Bao S.* Wear-resistant WC composite hard coatings by brazing // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2004. – **13**, № 4. – Р. 385–388.
4. *Berns H.* Comparison of wear resistant MMC and white cast iron // *Wear*. – 2003. – **254**. – Р. 47–54.
5. *Elevated temperature sliding wear behavior of WCP-reinforced ferrous matrix composites* / Yan-pei Song, Hua Yu, Jun-guang He, Hui-gai Wang // *J. Mater. Sci.* – 2008. – № 4. – Р. 38–47.
6. *Серебряков С.П.* Развитие центробежного литья точных отливок. – Ярославль: ЯПИ, 1986. – 80 с.
7. *Степанчук А.М., Степанов О.В., Гончарук О.Й.* Експлуатаційні властивості самофлюсівних сплавів на основі заліза одержаних з використанням недефіцитної сировини // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2004. – Вип. 4. – С. 317–330.
8. *Савельев И. В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1970. – Т. I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – 511 с.
9. *Шевченко А.И.* Центробежное литье под флюсом. – К.: Наук. думка, 1991. – 192 с.
10. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. – М.: Физматлит, 2001. – Т. VI. Гидродинамика. – 736 с.
11. *Моделирование* плотных материалов методом упаковки сферополлиэдров / В.В. Мизгулин, Р.М. Кадушников, В.М. Алиевский, Д.М. Алиевский // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – **4**, № 4. – С. 757–766.
12. *Сергеев В.В., Рудь В.Д., Гуменюк Л.О.* Дослідження щільності стохастичних упаковок часток при застосуванні вібрацій // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ. – 2009. – Вип. 14. – С. 279–288.
13. *Степанчук А.Н.* Закономерности прессования порошковых материалов. – К.: УМК ВО, 1992. – 176 с.

References

1. Y.M. Pleskachevsky *et al.*, “The Belarusian scientific and technical program “tribotechnology”, *Friction and Wear*, vol. 16, no. 3, pp. 404–415, 1995 (in Russian).
2. L.A. Sivachenko *et al.*, “Wear problem working, grinding, crushing machines”, *Friction and Wear*, vol. 16, no. 3, pp. 599–609, 1995 (in Russian).
3. J. Bao *et al.*, “Wear-Resistant WC Composite Hard Coatings by Brazing”, *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 13, no. 4, pp. 385–388, 2004.
4. H. Berns, “Comparison of wear resistant MMC and white cast iron”, *Wear*, no. 254, pp. 47–54, 2003.
5. Yan-pei Song *et al.*, “Elevated temperature sliding wear behavior of WCP-reinforced ferrous matrix composites”, *J. Mater. Sci.*, no. 4, pp. 38–47, 2008.
6. S.P. Serebrjakov, *Development Centrifugal Casting Precision Castings*. Yaroslavl, Russia: YaNP, 1986, 80 p. (in Russian).
7. A.M. Stepanchuk, “Performance Features self-fluxing alloys based on iron obtained using non-deficient materials”, in *Naukovy Notatky*. Lutsk, Ukraine: LTDU, vol. 4, 2004, pp. 317–330 (in Ukrainian).
8. I.V. Saveliev, *Course of General Physic*, vol. 1, *Mechanics, Fluctuations and Waves, Molecular Physics*. Moscow, Russia: Nauka, 1970, 511 p. (in Russian).
9. A.I. Shevchenko, *Tsentrobezhnoe Lyte Pod Flux*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 1991, 192 p. (in Russian).
10. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Theoretical Physics*, vol. 4. *Hydrodynamics*. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2001, 736 p. (in Russian).
11. V.V. Mizgulin *et al.*, “Modeling dense packing materials by Sphere-Polyhedra”, *Computer Studies and Modeling*, vol. 4, no. 4, pp. 757–766, 2012 (in Russian).
12. V.V. Sergeev *et al.*, “Research density packaging stochastic particle vibration application”, in *Naukovy Notatky*. Lutsk, Ukraine: LTDU, vol. 14, 2009, pp. 279–288 (in Ukrainian).
13. A.N. Stepanchuk, *Laws of Compaction of Powder Materials*. Kyiv, Ukraine: UMC VO, 1992, 176 p. (in Russian).

А.М. Степанчук, М.Б. Шевчук, Л.О. Бірюкович, А.П. Воробей

ЗАКОНОМІРНОСТІ СТВОРЕННЯ ТОВСТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ПОВЕРХНЯХ ДЕТАЛЕЙ ОБЕРТАННЯ

Проблематика. Створення теоретичних і технологічних засад отримання товстошарових покриттів з композиційних матеріалів на поверхнях обертання є актуальною задачею, розв’язання якої потребує установлення залежностей властивостей покриттів від характеристик вихідних матеріалів та умов їх отримання.

Мета дослідження. У роботі поставлено за мету провести модельні дослідження процесу отримання товстошарових покриттів із композиційних матеріалів на основі твердих тугоплавких сполук і самофлюсівних сплавів на деталях з горизонтально розміщеною віссю обертання. Передбачалось дослідити вплив щільності гранул, кутової швидкості обертання форми, розміру частинок (гранул) та розміру форми на силу ущільнення при відцентровому просочуванні і, як наслідок, на щільність отримуваних виробів.

Методика реалізації. Розроблено діючий стенд отримання товстошарових покриттів на зовнішніх і внутрішніх поверхнях деталей обертання відцентровим просочуванням гранул із твердих тугоплавких сполук розплавами металів та сплавів із використанням індукційного нагріву. Вивчення властивостей та структури отриманих матеріалів проводилось із використанням сучасних методик визначення щільності композиційних матеріалів і оптичної та електронної мікроскопії, комп'ютерних технологій.

Результати дослідження. Розроблено фізичну та математичну моделі отримання товстошарових покриттів на поверхнях деталей обертання, яка дала змогу оцінити вплив щільності гранул, кутової швидкості обертання форми, розміру частинок (гранул) та розміру форми на силу ущільнення при відцентровому просочуванні і, як наслідок, на щільність отримуваних виробів. Встановлено, що залежність сили ущільнення від густини порошку має лінійний характер, залежність від радіуса частинок є кубичною, від кутової швидкості – квадратичною, а від радіусу форми – лінійною. Отримано реальні зразки покриттів та вивчено їх щільність і структуру залежно від гранулометричного складу частинок твердої складової покриттів. Отримано результати, адекватні теоретичним залежностям, запропонованим у роботі.

Висновки. Встановлено залежності формування структури та властивостей товстошарових композиційних покриттів, одержаних відцентровим просоченням, від складу вихідних матеріалів та умов отримання.

Ключові слова: товстошарові покриття; тверді тугоплавкі сполуки; самофлюсівні сплави; відцентрове просочення; гранулометричний склад; структура; щільність.

А.Н. Степанчук, М.Б. Шевчук, Л.О. Бирюкович, А.П. Воробей

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОЗДАНИЯ ТОЛСТОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ ВРАЩЕНИЯ

Проблематика. Создание теоретических и технологических основ получения толстослойных покрытий из композиционных материалов на поверхностях вращения является актуальной задачей, решение которой требует установление зависимости свойств покрытий от характеристик исходных материалов и условий их получения.

Цель исследования. В работе была поставлена цель провести модельные исследования процесса получения толстослойных покрытий из композиционных материалов на основе твердых тугоплавких соединений и самофлюсующихся сплавов на деталях с горизонтально расположенной осью вращения. Предполагалось исследовать влияние плотности гранул, угловой скорости вращения формы, размера частиц (гранул) и размера формы на силу уплотнения при центробежной пропитке и, как следствие, на плотность получаемых изделий.

Методика реализации. Разработан действующий стенд получения толстослойных покрытий на внешних и внутренних поверхностях деталей вращения центробежной пропиткой гранул из твердых тугоплавких соединений расплавами металлов и сплавов с использованием индукционного нагрева. Изучение свойств и структуры полученных материалов проводилось с использованием современных методик определения плотности композиционных материалов и оптической и электронной микроскопии, компьютерных технологий.

Результаты исследования. Разработаны физическая и математическая модели получения толстослойных покрытий на поверхностях деталей вращения, которая позволила оценить влияние плотности гранул, угловой скорости вращения формы, размера частиц (гранул) и размера формы на силу уплотнения при центробежной пропитке и, как следствие, на плотность получаемых изделий. Установлено, что зависимость силы уплотнения от плотности порошка имеет линейный характер, зависимость от радиуса частиц – кубическая, от угловой скорости – квадратичная, а от радиуса формы – линейная. Получены реальные образцы покрытий и изучены их плотность и структура в зависимости от гранулометрического состава частиц твердой составляющей покрытий. Полученные результаты адекватны теоретическим зависимостям, предложенным в работе.

Выводы. Установлены зависимости формирования структуры и свойств толстослойных композиционных покрытий, полученных центробежной пропиткой, от состава исходных материалов и условий получения.

Ключевые слова: толстослойные покрытия; твердые тугоплавкие соединения; самофлюсующиеся сплавы; центробежная пропитка; гранулометрический состав; структура, плотность.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
26 грудня 2014 року