

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ОТРИМАННЯ СФЕРИЧНИХ МІКРОГРАНУЛ БЕЗ САТЕЛІТІВ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВО-ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ВИРОБІВ

Терновий Ю.Ф., Лічконенко Н.В.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Анотація. На основі раніше виявлених теоретичних закономірностей розроблено спосіб отримання мікрогранул сферичної форми без сателітів методом газового розпилення металевих розплаву із використанням поступально-обертового газового потоку. Наведено результати дослідження експлуатаційних властивостей деталей відповідального призначення, оброблених методом ППД із використанням сферичних гранул без сателітів.

Ключові слова: газове розпилення, сферичні мікрогранули, газовий потік, сателіт, поверхнево-пластична деформація, остаточні напруження, шорсткість поверхні.

Вступ

Порошкова металургія серед різноманітних способів оброблення металів посідає особливе місце, оскільки дозволяє не тільки виготовляти вироби, різні за формою і призначенням, а й створювати принципово нові матеріали, які іншим шляхом отримати або дуже важко, або просто неможливо. У таких матеріалів можна виявити унікальні властивості, а в назці випадків істотно підвищити економічні показники виробництва [1].

В останні десятиліття спостерігається постійне зростання продукції порошкової металургії. Так, за останні 10 років щорічний приріст обсягів світового виробництва продукції з металевих порошків становить понад 4 % на рік, зокрема 43 % цього обсягу припадає на Північну Америку, 22 % – країни Європи, 18 % – Японію і до 5 % – на інші країни. Річний обсяг виробництва металевих порошків у світі на цей час становить приблизно 1,2 млн т, з них близько 500 тис. т припадає на розпилені металеві порошки, тобто ті, що отримані способом диспергування металевих розплавів різними енергоносіями [2].

Технологія розпилення характеризується порівняно низькими енерговитратами, високою продуктивністю і технологічністю процесу і має широкі можливості автоматизації. Різноманітні методи розпилення металевих порошків дозволяють отримувати матеріали, різні за формою і властивостями залежно від вимог, що висуваються безліччю галузей промисловості, де порошкові матеріали знайшли своє застосування.

Технології газового та відцентрового розпилення дають змогу отримувати металеві порошки сферичної форми. Однак найбільшого поширення набули установки газового

розпилення, тому що в разі відцентрового розпилення є низка недоліків – неоднорідність одержуваних порошків за хімічним складом, пов'язана з ліквідацією в самому електроді, який розпиляється, великий розкид за дисперсністю (50–600 мкм) з дуже низьким виходом придатного.

Різні види розпилення розплавленого металу з використанням газового потоку-енергоносія (аргону, гелію, азоту) особливо ефективні в процесі отримання порошків легуваних сплавів, оскільки забезпечують високий ступінь однорідності хімічного складу і дисперсності будову литого металу. За такої схеми розпилювання на струмінь металевий розплав, що вільно тече зі спеціального отвору, діє спрямований під кутом до його осі кільцевий газовий потік, який створюється соплами. На середній розмір і форму порошкових частинок впливають потужність і температура газового потоку, діаметр струменя, температура, поверхневий натяг і в'язкість розплаву. Крім того, дуже важливо, у якому середовищі проводять розпилення, а також конструктивне оформлення форсуночного пристрою [1, 3].

Аналіз публікацій

Особливий інтерес викликає можливість використання порошків у виробках відповідального призначення: в атомній техніці, авіаційній та космічній промисловості тощо. Так, в авіаційній промисловості широко використовують зміцнення поверхнево-пластичною деформацією (ППД) деталей відповідального призначення. У зв'язку з тим, що в процесі експлуатації саме поверхневий шар деталі піддається найбільш сильному впливу зовнішніх чинників, до нього і висуваються вищі вимоги, ніж до основної маси деталі.

Оброблення методами поверхнево-пластичної деформації полягає в силовому контактному впливі деформувального інструмента на поверхню заготовки в умовах їх відносного руху.

Оброблення ППД має низку переваг порівняно з обробленням зі зняттям стружки (точінням, шліфуванням та ін.):

- збереження цілісності волокон металу й утворення дрібнозернистої структури-текстури в поверхневому шарі;
- відсутність шаржування оброблюваної поверхні;
- можливість оброблення як пластичних металів (відпалених сталей, кольорових сплавів), так і загартованих сталей;
- зменшення в кілька разів висоти мікронерівності за один робочий хід;
- створення сприятливих залишкових напружень стиску в поверхневому шарі;
- відсутність необхідності в застосуванні складного обладнання.

Як наслідок, у використанні ППД різко підвищуються такі показники якості, як опір втоми, зносостійкість і контактна витривалість. Зокрема, як правило, помітно зростає продуктивність праці фінішних операцій і досягається значний економічний ефект [4].

Залежно від схеми силового впливу деформувального елемента на поверхню оброблюваної деталі, відповідно до ГОСТ 18296-72, можна виділити вісім основних груп процесів ППД: статичні (накочення, вигладжування, калібрування тощо), ударне оброблення (кульками, дробом, роликом, бойком тощо), галтування абразивом тощо [5].

Для поверхнево-пластичної деформації ударним способом застосовують різні робочі тіла, що мають твердість більшу, ніж твердість оброблюваної заготовки. Ідеальний продукт для ППД – сферичні мікрокульки від приладових підшипників кочення. Але технологія їх виробництва є трудомісткою і характеризується низьким коефіцієнтом використання металу, який не перевищує 0,3. Традиційний технологічний процес передбачає виготовлення злитка, кування, прокатування, волочіння на дріт, штампування в мікроформах сатурноподібних частинок, обкатування, шліфування, розбракування сфер під мікроскопом. Процес розпилення є дешевшим і більш продуктивним (0,5 кг/с). У цьому випадку технологія спрощується – залишаються операції виплавлення сталі, розпилення струменя розплаву, розсівання отриманих гранул на вузькі фракції та розбракування [6].

Порошки, що застосовуються для поверхнево-пластичної деформації деталей машин, повинні бути кулястої форми без сателітів з максимальною монодисперсністю. Для отримання порошкових частинок без сателітів в світі, наприклад, використовують REP-процес (НВО «ВИЛС», Росія) або газову сепарацію за розмірами в процесі розпилення («ASL», Великобританія) [7].

Мета і постановка завдання

Мета – розроблення процесу отримання сферичних мікрогранул без сателітів у процесі газового розпилення та вивчення параметрів якості поверхневого шару деталей, оброблених з використанням мікрогранул як робочих тіл ППД.

Результати досліджень

Для досягнення мети роботи на першому етапі досліджень були розглянуті теоретичні закономірності процесу формоутворення частинок порошку під час розпилювання газом [8].

Розпилення струменя розплаву, унаслідок впливу на нього газового потоку, відбувається під дією аеродинамічних сил, які визначаються швидкістю газового потоку. Механізм розпилення струменя розплаву за рахунок кінетичної енергії газу (енергоносія) полягає в послідовному диспергуванні розплаву на дрібні краплі. З практики розпилення розплавів інертними газами відомо, що основним формоутворювальним чинником є взаємні зіткнення частинок під час польоту [3], а також зіткнення крапель з екраном або стінками камери розпилення. У першому випадку утворюються порівняно великі частинки, до поверхні яких приварюються в процесі польоту дрібні частинки (сателіти), а в другому – лускаті або пластинчасті частинки.

У загальному випадку форма одиничних крапель, які утворюються внаслідок розпаду мікроструменів розплаву, залежить від співвідношення таких величин:

- часу охолодження $\tau_{\text{охол}}$;
- часу сфероїдизації або часу загасання коливань навколо рівноважної кулястої форми $\tau_{\text{зат}}$;
- періоду коливань монотонного або коливального руху поверхні краплі до сферичної форми $\tau_{\text{с}}$;
- часу руху крапель до екрана $\tau_{\text{прол}}$;
- часу кристалізації, коли рідка фаза присутня в частці поряд з твердою і удар об екран може змінити її форму $\tau_{\text{кр}}$;

– часу вільного пробігу між окремими взаємними зіткненнями крапель у польоті $\tau_{\text{вп}}$.

Керувати параметрами $\tau_{\text{зат}}$, $\tau_{\text{кол}}$ і $\tau_{\text{кр}}$ практично неможливо за умови фіксованих швидкостей газового потоку, фізичних властивостей газу і розплаву. Активний вплив на величину $\tau_{\text{охол}}$ також є проблематичним, оскільки, крім швидкості газового потоку і температури металу, чинників впливу більше немає, а вони впливають у межах порядку величини на широке коло високотемпературних сплавів і сталей. Величина $\tau_{\text{прол}}$ визначається конструктивно, і в разі отримання гранул її обирають такою, щоб у польоті забезпечувалося повне затвердіння крапель.

У зв'язку з цим необхідно відзначити, що в стандартних процесах газового розпилення єдина можливість управляти формою частинок закладена в регулюванні $\tau_{\text{вп}}$.

Час вільного пробігу $\tau_{\text{вп}}$ великої краплі з діаметром d_1 до зіткнення з дрібною краплею діаметром d_2 , згідно з роботою [3], визначається за рівнянням:

$$\tau_{\text{вп}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_2^2 \cdot V_{2\kappa}}{E_{21} \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot (V_{2\kappa} - V_{1\kappa}) \cdot W_{\kappa} \cdot \beta'_2}, \quad (1)$$

де W_{κ} – швидкість газового потоку; $V_{1\kappa}$, $V_{2\kappa}$ – швидкість великої та дрібної краплі відповідно; d_1 , d_2 – діаметр великої та дрібної краплі відповідно; β'_2 – об'ємна концентрація дрібних крапель у факелі розпилення; E_{21} – коефіцієнт осадження дрібних частинок на більші ($E_{21} \cong 0,7-0,9$).

Отже, величини E_{21} і β'_2 визначають ступінь присутності часток-сателітів на поверхні крупної частинки. Величина β'_2 залежить від об'ємної щільності дрібнодисперсних частинок у металогазовому факелі. Зниження виходу дрібних фракцій, отримання дрібнодисперсного порошку, розрідження факела шляхом переходу від обмеженого зливу до розпилення струменя, який вільно падає, призводить до зниження β'_2 і, як показують практичні дані, зниження кількості сателітів на поверхні більших гранул. Величини E_{21} і β'_2 можуть бути далі знижені за можливості

організації в газовому потоці факела розпилення, наприклад, у радіальному напрямку, віднесення дрібних крапель за межі факела розпилення. Дійсно, у стандартних схемах газового розпилення реалізується поступальний потік газу в металогазовому факелі, у якому, незважаючи на конічне розширення факела, мірою віддалення від зливного патрубка менш інерційні дрібні краплі, прискорюючись інтенсивніше, ніж великі, у газовому потоці наздоганяють останні та приварюються до їх поверхні. У процесі створення обертання газового потоку навколо осі розпилення в радіальному напрямку діють відцентрові сили і більш податливі дрібні частинки можуть бути винесені за межі факела розпилення. Цей процес описується рівняннями (2–3) [9]:

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{V_{\tau}^2}{x} \cdot \left[1 - \frac{\rho_{\kappa} \cdot (\omega_{\kappa} \cdot x)^2}{\rho_{\text{Me}} \cdot V_{\tau}^2} \right] - \frac{\rho_{\kappa} \cdot k \cdot A \cdot V_f \cdot V_x}{2M} \quad (2)$$

$$\frac{dV_{\tau}}{dt} = \frac{V_{\tau} \cdot V_x}{x} \cdot \left[\frac{\rho_{\Gamma} \cdot k \cdot A \cdot V_f \cdot (\omega_{\kappa} \cdot x - V_{\tau})}{2M} \right], \quad (3)$$

де ρ_{Me} і ρ_{κ} – щільність розплавленого металу і газу-енергоносія; ω_{κ} – кутова частота обертання газового потоку; M – маса краплі; A – стала величина, що визначається фізико-хімічними та технологічними властивостями даного металу; V_x , V_{τ} – вертикальна компонента швидкості частинки і радіальна її компонента відповідно, V_f – параметр, що характеризує швидкість радіального виносу частинок, $V_f = \sqrt{V_x^2 + (\omega_{\kappa} \cdot x - V_{\tau})^2}$.

Полегшує процес виносу дрібних крапель за межі початкового факела і те, що дрібні частинки утворюються здебільшого в периферійній зоні вихідного струменя розплаву, енергетичний вплив газу-енергоносія на яку максимальний. Така схема в принципі може дозволити домогтися значення $\beta'_2 \Rightarrow 0$, а $\tau_{\text{вп}} \Rightarrow \infty$. Оскільки тоді $\tau_{\text{вп}} > \tau_{\text{охол}}$, що є кінцевою величиною, може бути отриманий порошок ідеальної сферичної форми без сателітів.

Таким чином, установлено, що організація обертання газового потоку навколо осі розпилення в радіальному напрямку полегшує процес винесення дрібних частинок за межі факела розпилення, що у свою чергу призво-

дить до зниження кількості сателітів на сферичних порошкових частинках.

Викладені в роботі [8] теоретичні закономірності послужили передумовами для розроблення методу газового розпилення металевого розплаву із застосуванням поступально-обертового газового потоку [10].

Зазначений спосіб передбачає подачу струменя розплаву в зону розпилення, формування потоку газу-енергоносія і диспергування струменя обертовим газовим потоком. У цьому випадку на струмінь розплаву впливають двома закрученими в різні боки спіралеподібними газовими потоками, спрямованими зверху вниз, у вигляді розширених конусів. Між потоками на границі їх торкання утворюються потужні кільцеві завихрення, осі яких розташовані уздовж поверхні конусоподібних газових потоків, що розширюються донизу. Струмінь металу під впливом обертового газового потоку деформується, стає тоншим і захоплюється газовим потоком в його внутрішню розріджену зону, що розширюється. У цій зоні струмінь металу розпадається на тонкі металеві струмені, які у свою чергу починають розпадатися на окремі не пов'язані одна з одною частинки. У зоні розрідження спіральний газовий потік захоплює дрібні частинки, що відокремилися з поверхні тонких металевих ниток, які під дією відцентрових сил переходять із зони внутрішнього обертового газового потоку в зону потужних завихрень. Ці кільцеві завихрення продовжують руйнувати дрібні краплі в умовах розрідження, яке перешкоджає попаданню газу всередину рідкого металу та його закриттю.

Таким чином, у запропонованому методі руйнування струменя і подальше руйнування окремих дрібних частинок відбувається в умовах розрідження, що створюється двома протилежно спрямованими спіральними потоками газу. Це призводить до розширення зони дроблення металу, зниження прямого впливу газу на рідкі металеві частинки і цим дозволяє розділити в просторі рух дрібних і великих крапель, що значно знижує ймовірність утворення дрібних сателітів на поверхні більш крупних частинок.

Розпилення металевого розплаву сталі марки ШХ15, нагрітого до температури 1580 °С, проводили за умови тиску газу 1,4...1,7 МПа, витрати розплаву 0,5 кг/с і питомої витрати газу ~ 1,0 м³/кг.

Аналіз результатів

Мікрокульки зі сталі марки ШХ15, отримані запропонованим способом, поставляються розділеними на вузькі фракції в діапазоні – 400 мкм по двох групах твердості: I група – 42... 48 HRC, II група – 48 ... 56 HRC. Насипна щільність порошків-мікрокульок – 4,8 г/см³; плинність (маси 50 г через канал діаметром 5 мм) – 3,5 с; масова частка кисню – 0,01 %.

Ефективність застосування отриманих робочих тіл оцінювали шляхом випробувань за участю співробітників НДІД (м. Москва, Росія) з використанням для порівняння газорозпиленних порошків виробництва ВАТ «Тулачермет». Дані про шорсткість обробленої поверхні наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Шорсткість поверхні деталей, що обробляються, $\bar{R}_A$

Матеріал, що піддається обробленню	Вид оброблення		
	Число точіння	Зміцнення мікрокульками	Зміцнення порошками ВАТ «Тулачермет»
Сталь 40ХН2МА	0,82	0,87	1,03
Сталь 12Х2Н4А	0,97	0,98	1,07
Сталь 30ХГСА	0,78	0,82	1,19

Застосування мікрокульок зі сталі марки ШХ15 забезпечує збереження шорсткості в межах 7 класу (ближче до границі 8 класу), за умови стабільного та однорідного мікрорельєфу, що дозволяє виключити довідні операції, пов'язані з необхідністю дотримання заданої шорсткості.

Поряд з шорсткістю і мікротвердістю поверхні важливим критерієм, що визначає експлуатаційні властивості деталі, є залишкові напруження в її поверхневому шарі.

Порівняно з обробленням порошками ВАТ «Тулачермет» шорсткість знижується в середньому на 18 %.

Результати визначення величини залишкових напружень стискання по глибині поверхневого шару наведені на рис. 1.

Оброблення мікрокульками забезпечує підвищення глибини опрацювання поверхні та створення залишкових напружень стиску в поверхневому шарі на глибині 80 ... 100 мкм на 200 ... 300 МПа більше, ніж у використанні порошків ВАТ «Тулачермет». Це сприяє

зниженню ймовірності утворення тріщин у поверхневому шарі деталі та підвищує циклічну втому матеріалу (рис. 2).

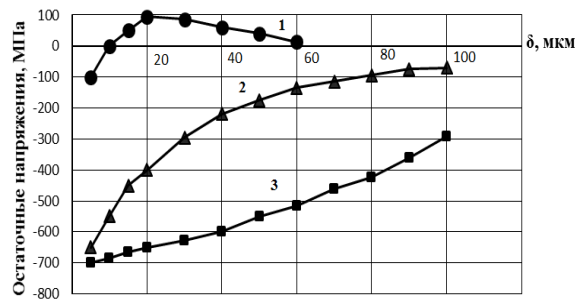


Рис. 1. Розподілення залишкових напружень стиснення по глибині поверхневого шару (δ) деталей із сталі марки 40ХН2МА: 1 – чистове точіння; 2 – зміцнення робочими тілами ПАТ «Тулачермет»; 3 – зміцнення мікрокульками

Таким чином, унаслідок зміцнювального оброблення з використанням мікрокульок без сателітів, виготовлених запропонованим методом газового розпилення, у поверхневому шарі деталей формуються такі значення параметрів якості:

- шорсткість поверхні відповідає $\bar{R}_A = 0,9 \dots 0,8$ мкм;
- ступінь деформованого стану досягає 18...30 % на глибині до 120 мкм;
- залишкові напруження стиснення становлять 300...700 МПа, якщо глибина їх залягання до 100 мкм.

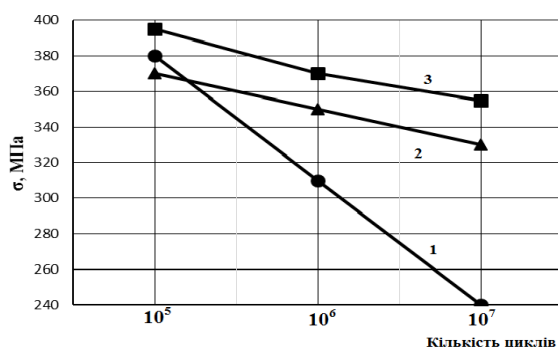


Рис. 2. Результати циклічних випробувань оброблених деталей із сталі марки 40ХН2МА: 1 – чистове точіння; 2 – зміцнення робочими тілами ПАТ «Тулачермет»; 3 – зміцнення мікрокульками

Сферична форма (без сателітів) мікрогранул дозволяє отримати правильний відбиток, що дає можливість використовувати аналітичні методи визначення оптимальних параме-

трів зміцнення, що забезпечують найбільший приріст міцності і цим скорочує витрати на експериментальні дослідження. Крім того, правильна сферична форма мікрокульок знижує дисперсію параметрів якості в поверхневому шарі оброблюваних деталей.

За даними проведених випробувань оброблення мікрокульками, виготовленими за розробленою технологією, дає вагомі технічні та економічні переваги порівняно із застосовуваними раніше методами:

- виключені витрати на довідне оброблення поверхні після поверхнево-пластичної деформації, завдяки її відповідності за шорсткістю чистовому точінню;
- збільшена на 10–30 % межа витривалості оброблюваних матеріалів;
- збільшена в 2–6 разів довговічність деталей;
- підвищений утричі ресурс роботи виробів.

Висновки

Проведені випробування показують ефективність мікрокульок без сателітів, отриманих методом газового розпилення металевих розплаву із застосуванням поступально-обертового газового потоку, як робочих тіл, призначених для поверхнево-пластичної деформації широкої номенклатури деталей відповідального призначення: лопатей вертольотів, деталей газотурбінних двигунів – дисків і корпусів компресора і турбіни, корпусів агрегатів, валів, замків лопаток турбіни, кільцевих деталей, виготовлених із сталей, титанових, алюмінієвих, магнієвих жароміцних сплавів.

Література

1. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницький Г.В. Процессы порошковой металлургии. Москва, 2002. 320 с.
2. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии. Санкт-Петербург, 2010. 385 с.
3. Ничипоренко О.С., Найда Ю.И., Медведовский А.Б. Распыленные металлические порошки. Киев, 1980. 240 с.
4. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва, 1987. 328 с.
5. Ежелев А.В., Бобровский И.Н., Лукьянов А.А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 6-3. С. 642–646. URL: <http://www.fundamentalresearch.ru/article/view?id=30091> (дата звернення: 20.06.2019).
6. Терновой Ю.Ф., Пашетнева Н.Н., Кононенко А.А., Куратченко А.Б. Технологии и оборуду-

- дование «УкрНИИспецстали» для производства распыленных металлических порошков. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 6. С. 84–88.
7. Распыление водой высокого давления для производства порошков различных металлов и сплавов. URL: http://www.netramm.com/news_pm_2. НЕТРАММ.pdf. (дата звернення: 22.06.2019).
 8. Терновой Ю.Ф., Воденников С.А., Личконенко Н.В. Получение микрогранул сферической формы без спутников при диспергировании металлических расплавов инертным газом. Сообщение 1. Теоретические основы формообразования гранул в процессе газового распыления. *Металургія: збірник наукових праць*. 2018. Вип. 1 (39). С. 48–51.
 9. Терновой Ю.Ф., Баглюк Г.А., Кудиевский С.С. Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов. Запорожье, 2008. 298 с.
 10. Терновой Ю.Ф., Воденников С.А., Личконенко Н.В. Получение микрогранул сферической формы без спутников при диспергировании металлических расплавов инертным газом. Сообщение 2. Процессы образования сферических микрогранул без спутников и поверхностно-пластическая деформация ответственных изделий. *Металургія: збірник наукових праць*. 2018. Вип. 2 (40). С. 28–32.
- ### References
1. Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskii G.V. *Protsessy poroshkovoï metallurgii* [Powder metallurgy processes]. Moscow, MISiS Publ., 2002. 320 p.
 2. Girshov V.L., Kotov S.A., Tsemenko V.N. *Sovremennye tekhnologii v poroshkovoï metallurgii* [Modern technologies in powder metallurgy]. St. Petersburg, Publ. of the Polytechnic University, 2010. 385 p.
 3. Nichiporenko O.S., Naida Yu.I., Medvedovskii A.B. *Raspylennyye metallicheskie poroshki* [Atomized metal powders]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980. 240 p.
 4. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p.
 5. Ezhelev A.V., Bobrovskii I.N., Luk'ianov A.A. Analiz sposobov obrabotki poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem [Analysis of methods for processing surface plastic deformation]. *Fundamental'nye issledovaniia – Fundamental research*, 2012, no. 6-3. pp. 642–646. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30091> (Accessed 20 June 2019).
 6. Ternovoi Yu.F., Pashetneva N.N., Kononenko A.A., Kuratchenko A.B. Tekhnologii i oborudovanie «UkrNIIspechstali» dlia proizvodstva raspylennykh metallicheskh poroshkov [Technologies and equipment of «UkrNIIspechstal» for the production of atomized metal powders]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2005, no. 6, pp. 84–88.
 7. *Raspylenie vodyi vysokogo davleniia dlia proizvodstva poroshkov razlichnykh metallov i splavov* [Atomization high pressure water to produce powders of various metals and alloys] Available at: http://www.netramm.com/news_pm_2. NETRAMM.pdf. (Accessed 22 June 2019).
 8. Ternovoi Yu.F., Vodennikov S.A., Lichkonenko N.V. Poluchenie mikrogranul sfericheskoi formy bez satellitov pri dispergirovanii metallicheskh rasplavov inertnym gazom. Soobshchenie 1. Teoreticheskie osnovy formoobrazovaniia granul v protsesse gazovogo raspyleniia [Obtaining spherical microgranules without satellites when dispersing metal melts with an inert gas. Report 1. Theoretical foundations of the shape formation of granules in the process of gas atomization]. *Metallurgii: Zbirnik naukovikh prats' – Metallurgy: Collection of Scientific Works*, 2018, no. 1 (39), pp. 48–51.
 9. Ternovoi Yu.F., Bagliuk G.A., Kudievskii S.S. *Teoreticheskie osnovy protsessov raspyleniia metallicheskh rasplavov* [The theoretical basics of the processes of atomization metal melts]. Zaporizhia, ZGIA Publ., 2008. 298 p.
 10. Ternovoi Yu.F., Vodennikov S.A., Lichkonenko N.V. Poluchenie mikrogranul sfericheskoi formy bez satellitov pri dispergirovanii metallicheskh rasplavov inertnym gazom. Soobshchenie 2. Protsessy obrazovaniia sfericheskikh mikrogranul bez satellitov i poverkhnostno-plasticheskaia deformatsiia otvetstvennykh izdelii [Obtaining spherical microgranules without satellites when dispersing metal melts with an inert gas. Report 2. The formation of spherical microgranules without satellites and surface plastic deformation of responsible products]. *Metallurgii: Zbirnik naukovikh prats' – Metallurgy: Collection of Scientific Works*, 2018, no. 2 (40), pp. 28–32.
- Терновий Юрій Федорович**, д.т.н., завідувач кафедри металургії, тел. +38 050-322-68-35, e-mail: ferrous.metals@ukr.net, Інженерний інститут Запорізького національного університету, 69006, Україна, м. Запоріжжя, пр. Соборний, 226.
- Лічконенко Наталія Володимирівна**, старший викладач кафедри металургії, +38 093-078-45-85, e-mail: nvlichkon75@ukr.net, Інженерний інститут Запорізького національного університету, 69006, Україна, м. Запоріжжя, пр. Соборний, 226.
- The possibility of obtaining spherical microgranules without satellites for surface-plastic deformation of responsible products**
- Abstract. Problem.** To strengthen the surface-plastic deformation (SPD) of components of a responsible purpose, for example, in the aviation industry, work-

ing bodies (microspheres) are used, which can be obtained by the technology of gas atomization. Powders used for SPD of machine parts must be spherical without satellites with maximum monodisperses. **Goal.** The aim of this paper is to develop a process for obtaining spherical microgranules without satellites in the process of gas atomization and to study the quality parameters of the surface layer of parts treated with the use of microgranules as SPD working bodies. **Methodology.** To obtain spherical microgranules it is proposed to use the method of gas sputtering of a metal melt with the use of a progressive rotating gas stream. In the proposed method, the destruction of the jet and the subsequent destruction of individual small particles occur in the vacuum, which is created by two opposite directed helical gas flows. This leads to the expansion of the crushing zone of the metal, reducing the direct impact of the gas on the liquid metal particles and, thus, allows the separation of the motion of small and large droplets in space, which significantly reduces the probability of the formation of small satellites on the surface of larger particles. Spraying of a metal melt of ShH15 steel, heated to a temperature of 1580 °C, was carried out at a gas pressure of 1,4... 1,7 MPa, a melt flow of 0,5 kg/s and a specific gas flow rate of 1,0 m³/kg. **Results.** The efficiency of the application of the obtained working bodies is proved by the results of the study of the operational properties of the surface layer of the parts being processed: surface roughness corresponds $\bar{R}_A = 0,9...0,8 \mu\text{m}$; the degree of deformed state reaches 18...30% at a depth of up to 120 microns; the residual compression stresses are 300...700 MPa at a depth of up to 100 μm . **Scientific originality.** The factors that influence the number of satellites on the surface of spherical microgranules are analyzed in the paper. It is established that the organization of the rotation of the gas flow around the axis of the atomization in the radial direction facilitates the process of removal of fine particles beyond the sputtering torch, which, in turn, leads to a decrease in the number of satellites on spherical powder particles. **Practical value.** According to the tests, the use of microspheres of ShH15 steel for SPD of a wide range of parts, gives significant technical and economic advantages in comparison with other methods: elimination of costs for surface finishing after SPD; increased by 10...30 % endurance of processed materials; in-

creased by 2...6 times the durability of parts; 3 times increased product life.

Key words: gas atomization, spherical microgranules, gas flow, satellite, surface plastic deformation, residual stresses, surface roughness.

Ternovyi Yurii, professor, Doct. of Technical Sciences, Head of the Department of Metallurgy, tel. +38 050-322-68-35, ferrous.metals@ukr.net, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, Soborniy Ave. 226, Zaporizhzhia, 69006, Ukraine.

Lichkonenko Natalia, Senior Teacher of the Department of Metallurgy, tel. +38 093-078-45-85, nvlichkon75@ukr.net, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, Soborniy Ave. 226, Zaporizhzhia, 69006, Ukraine.

О возможности получения сферических микрогранул без спутников для поверхностно-пластической деформации ответственных изделий

Аннотация. На основе ранее выявленных теоретических закономерностей разработан способ получения микрогранул сферической формы без спутников методом газового распыления металлического расплава с использованием поступательно-вращающегося газового потока. Приведены результаты исследования эксплуатационных свойств деталей ответственного назначения, обработанных методом ППД с использованием сферических гранул без спутников.

Ключевые слова: газовое распыление, сферические микрогранулы, газовый поток, спутник, поверхностно-пластическая деформация, остаточные напряжения, шероховатость поверхности.

Терновой Юрий Федорович, д.т.н., заведующий каф. металлургии, ferrous.metals@ukr.net, тел. +38 050-322-68-35, Инженерный институт Запорожского национального университета, 226, пр. Соборный, г. Запорожье, 69006. Украина.

Личконенко Наталия Владимировна, ст. преподаватель каф. металлургии, +38 093-078-45-85, nvlichkon75@ukr.net, Инженерный институт Запорожского национального университета, 226, пр. Соборный, г. Запорожье, 69006. Украина.