

УДК 669.295

ЛУПНОС Сергій Михайлович⁽¹⁾, кандидат технічних наук
 ПРУТЦЬКОВ Дмитро Володимирович⁽²⁾, завідувач кафедри, доктор хімічних наук
 ЛИСТОПАД Дмитро Олександрович⁽³⁾, генеральний директор, кандидат технічних наук
 ПАНОВА Віра Олегівна⁽²⁾, асистент
 БЕЗПАЛОВ Руслан Ігоревич⁽²⁾, доцент, кандидат технічних наук
 ВОЛЯР Роман Миколайович⁽²⁾, доцент, кандидат технічних наук

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГРАНУЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

⁽¹⁾ До 2015 р. - ДП «Державний науково-дослідний і проектний Інститут титану», м. Запоріжжя

⁽²⁾ Запорізька державна інженерна академія

⁽³⁾ ТОВ «ТБ ОТТОМ», м. Харків

Розглянуто тенденції удосконалення установок грануляції та процесів газоструминного і відцентрового плазмового розпилення рідкого металу. Показана можливість одержання гранульних композитів на основі титану та інтерметалідних сплавів системи «титан-алюміній» методом надшвидкого охолодження.

Ключові слова: порошки, сферична гранула, відцентрове та газоструминне розпилення, композити, інтерметаліди, фізико-механічні властивості

Вступ. Розвиток сучасної техніки, у зв'язку із зростаючими ринковими тенденціями та конкуренцією, потребує створення матеріалів, що надійно працюють за умов високотемпературного навантаження, дії агресивних середовищ, зносу, а також розробки вдосконалених технологій їх одержання.

Однією з таких технологій є гранульна (порошкова) металургія, яку широко використовують для створення нових матеріалів і сплавів, а також продукування металевих виробів на їх основі. Зазначена технологія є процесом одержання порошків сферичної форми методом відцентрового розпилення, подальшим виготовленням необхідних заготовок та їх наступної обробки. Процес дозволяє одержувати готові вироби заданої міцності, точних розмірів, у тому числі досить складної форми без додаткової або з мінімальною механічною обробкою.

Сучасний стан технології, напрями вдосконалення та розвитку. Теоретичні основи процесу грануляції металевих розплавів детально розглянуто у роботі [1].

Сучасну гранульну металургію розглядають як базову ефективну технологію одержання нових матеріалів з унікальними властивостями, що забезпечує ряд суттєвих переваг:

– мінімальну дендритну та зональну ліквідацію, що, в свою чергу, дозволяє реалізувати високий рівень рівномірності механічних характеристик в об'ємі деталей, які виготовляють;

– суттєве підвищення деформованості матеріалів, при цьому у ряді технологічних процесів

деформація матеріалу не є потрібною, оскільки стає можливим одержання деталей з остаточними розмірами складної форми;

– високу оброблюваність одержаних виробів механічним інструментом, що суттєво знижує витрати на виготовлення та собівартість;

– можливість одержувати складні вузли та вироби, які раніше виготовляли з окремих деталей, а потім сполучали зварюванням або іншими способами.

Середній розмір одержаної гранули є зворотно пропорційним до кутової швидкості заготовки, що обертається, та її радіуса. Тому, за досить значної швидкості обертання заготовки, можливим є формування гранул розміром у десятки мікрометрів, а це призводить до виключно високої швидкості їх охолодження та кристалізації металу. Як наслідок, досягаються формування мілкодисперсної структури й однорідність хімічного складу гранул, що надалі сприятливо впливає на властивості деталей, які виготовляють, особливо з титану та його сплавів.

Головними реалізованими способами одержання гранул сьогодні є:

– газоструминне розпилення рідкого металу;
 – відцентрове плазмове розпилення.

Інші методи одержання порошків, які розвиваються, за їх певних переваг та економічності, наприклад, з використанням технології гідратування-дегідратування титану, на жаль, не дозволяють сягати необхідної міри сферичності часточок, необхідної для використання в 3-D технологіях [3].

Газоструминне розпилення є розпиленням рідкого металу в керамічному тиглі, що, проте, призводить до подавання помітної кількості не-

металевих часточок, які обумовлюють зниження характеристик міцності матеріалу. За другою технологією одержання гранул виконують шляхом розпилення електроду заданого сплаву, що обертається із значною швидкістю, за дії високоенергетичної плазми.

За умов ВАТ «Композит» (Російська Федерація) для одержання гранул використовують технологію відцентрового розпилення електроду, що швидко обертається, у захисній атмосфері за торцевим плазмовим нагріванням та швидкості охолодження розплаву $1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ °C/c на установці відцентрового розпилення (УВР) з одержанням матеріалу заданого фракційного складу [4].

В одержаних гранулах у невеликій кількості є присутніми газові домішки, що впливають на характеристики міцності матеріалу. Контроль рівня їх вмісту в гранулах виконують на кожному етапі виробництва. Понизити вміст домішок можливо шляхом термічної дегазації гранул у вакуумі перед засипкою їх у капсули.

Засипку порошків у капсули та герметизацію виконують на установці СНВ 6.12. Саме на цьому етапі здійснюють термічну дегазацію гранул шляхом нагрівання у високому вакуумі перед засипкою в капсули. Герметизацію капсули виконують електронно-променевим заварюванням її приймального отвору. Такий процес дозволяє значно понизити вміст кисню, сполук вуглецю, водню й азоту. Порошки, що виробляють на ВАТ «Композит», відрізняються досить низьким вмістом газових домішок.

Подальшим технологічним етапом є газостатична обробка, під час якої, капсули, що заповнено гранулами та заварено, піддають газостатичному ущільненню за дією високої температури і тиску. Процес виконують в інтервалі температури 800-1000 °C за тиску до 200 МПа.

Окрім газових домішок, у гранулах є присутніми металеві вclusions, які потрапляють до них у результаті зношування сталевих барабанів під час плавлення електроду в установці УВР. Ефективно понизити їх вміст дозволяє здійснення розсівання й електромагнітної сепарації порошків. Відокремити робочу фракцію гранул також дозволяє установка розсівання, яку було вдосконалено на ВАТ «Композит».

За необхідності подальшого поліпшення якості та властивостей готової продукції на зазначеному підприємстві застосовують технології гарячого ізостатичного пресування й ізотермічної деформації.

Використання такої комплексної технології дозволяє забезпечити суттєве підвищення зна-

чень характеристик міцності матеріалів і виробів. Завершальним етапом технології є виконання відповідної термічної обробки. Наприклад, для сплаву ВТ6 режим термічної обробки складається з нижченаведених етапів: відпалювання за температури 750 °C, витримка протягом 2 год., охолодження на повітрі; загартування за температури 850 °C, витримка – 1 год., старіння за температури 500 °C, витримка – 2 год. та наступне охолодження з піччю.

Випробування з одержанням титанових сплавів за технологією, описаною вище, показали можливість одержувати сплави з вищими показниками міцності, у порівнянні із деформованими сплавами ідентичного складу. Результати випробувань подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця механічних властивостей гранульованих титанових сплавів за температури 20 °C та деформованих сплавів

Вид сплаву		σ_B , МПа	δ , %
ВТ6	гранульований	1000	5
	деформований	930	10
ВТ18У	гранульований	1070	5
	деформований	910	7
ВТ25У	гранульований	1020	8
	деформований	950	10

Проте гранулювання з твердого електроду, що обертається, має свої обмеження та недоліки, враховуючи які, фірмою «Сферамет» (Російська Федерація) було розроблено технологію й установку одержання сферичних гранул металів і сплавів методом відцентрового розпилення розплаву із гарнісажного тигля, що обертається з регульованою швидкістю.

У технології гранулювання фірми «Сферамет» реалізовано краплинний метод утворення гранул, що виключає захоплення інертного газу й утворення внутрішніх порожнин у сферичній гранулі. Швидкість кристалізації краплі розплаву, в інертному газі, складає $10^3 - 10^6$ град/с. Діаметр робочої камери установки (2000 мм) дозволяє гранулювати практично всі метали, сплави й інтерметаліди, одержуючи бездефектні сферичні гранули розміром від 10 до 800 мкм з дрібнозернистою структурою, у тому числі з нанорозмірними фазовими виділеннями [5]. Такі гранули автори пропонують використовувати під час конструювання гранульних композитів.

Працездатність установки перевірено за гранулюванням карбіду вольфраму із вмістом вуглецю 3,8 % та температури плавлення близько 2550 °C. Встановлено, що застосування гранульної технології дозволяє зменшити розміри часточок карбіду титану в 4-5 разів і бориду тита-

ну – в 10 разів. При цьому суттєво підвищується рівномірність їх розподілу в структурі сплаву, а форма виділень змінюється від голчастої (традиційна технологія) до округлої. Характеристики міцності сплавів при цьому зростають на 30-70 МПа, у порівнянні з традиційною технологією.

Авторами запропоновано конструювати металеві композити з сферичних гранул різного

хімічного складу, вироблених без дефектів кристалізації методами високошвидкісної кристалізації. Принцип побудови гранульних композитів із заздалегідь заданими властивостями полягає у формуванні комбінації гранул різного хімічного, фазового та фракційного складів у необхідних пропорціях, і базується на методах кристалографії металів і сплавів – формуванні щільних упаковок куль і порожнин у них.

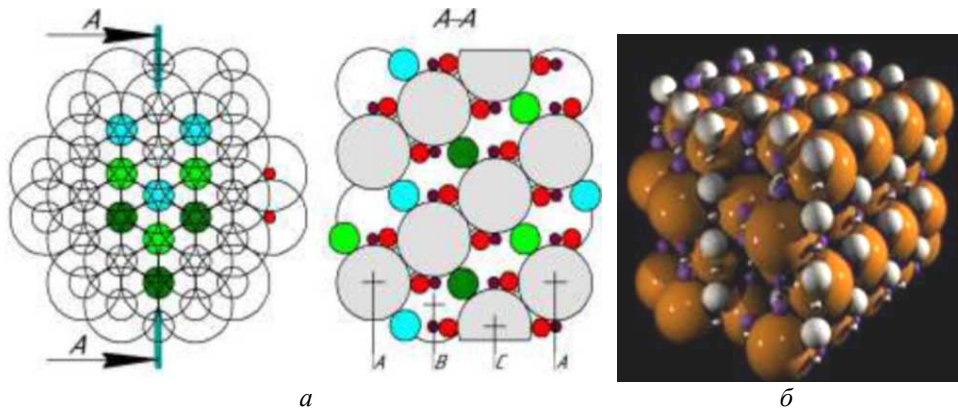


Рисунок 1 – Щільна упаковка сферичних гранул чотирьох порядків:
а - кубічна; б - об'ємна гексагональна

Для прикладу на рис. 1 подано об'ємне графічне зображення гексагональної щільної упаковки сферичних гранул чотирьох порядків. Гранули першого порядку вносять у комбінацію гранул найбільший вклад та утворюють матрицю гранульного композиту. Гранули матриці можуть складатися з одного або декількох матеріалів різного хімічного складу, також як і гранули інших порядків. Це дозволяє складати гранульні комбінації у широкому діапазоні хімічного складу композиту. Гранульний композит після компактування можна додатково піддавати деформації: екструзії, прокатці, куванню для одержання структури з необхідними властивостями. Таким чином, підбираючи гранули різного хімічного та фракційного складів, піддаючи гранульні складання деформаційним і термічним обробкам, можливим є одержання гранульних композитів із заздалегідь заданими властивостями, які найбільш повно відповідають експлуатаційним параметрам роботи виробу.

На основі відомих властивостей титанових сплавів та інтерметалідів було розраховано можливі властивості гранульних композитів з умов адитивного вкладу компонентів. Оцінний розрахунок показав зростання фізико-механічних характеристик таких композитних матеріалів, що свідчить про перспективність напрямку, який розвивається. Ефект від застосування гранульних композитів у поршневих двигунах внутрішнього

згоряння полягає у зниженні маси деталей на 20-50 %, зменшенні механічних втрат, підвищенні паливної економічності (до 8 %), зниженні емісії викидів шуму та вібрацій, а також зменшенні поступально рухомих мас.

На діючих установках відцентрового розпилення швидкість обертання заготовок зазвичай складає 14000-16000 хв⁻¹, що дозволяє одержувати робочий фракційний склад гранул з титанових сплавів 100-200 мкм, з нікелевих сплавів – 50-150 мкм.

На теперішній час за умов ВАТ «Електро-механіка» (Російська Федерація) розроблено та виготовлено нову сучасну високопродуктивну установку відцентрового розпилення (УВР), що дозволяє одержати мілкодисперсні гранули з різних сплавів. Створення такої установки відкриває нові можливості для розвитку гранульної металургії, одержання нових матеріалів, підвищення рівня властивостей виробів, що випускають, та розширення сфер застосування гранул [6]. Процес розпилення на УЦР є автоматизованим, а швидкість обертання заготовки може досягати більше ніж 25000 хв⁻¹. Це дозволяє одержувати головний робочий діапазон титанових гранул розміром 60-70 мкм, і частково гранул розміром 20-40 мкм. Технологія відповідає швидкості охолодження для отримання аморфної структури гранул і дозволяє одержувати сплави з унікальним комплексом властивостей.

Застосування методів надшвидкого охолодження (НШО) представляється дуже перспективним для поширення виробництва інтерметалідних сплавів системи «титан-алюміній». Такі сплави мають унікальну жароміцність, проте їх широкому застосуванню в конструкції газотурбінних двигунів перешкоджає досить низька пластичність за кімнатної температури. Зазначений метод відкриває можливість підвищення пластичності інтерметалідних сплавів шляхом розупорядкування та подрібнення структури.

Титанові сплави, що одержують на основі гранульних технологій, вже сьогодні знаходять широке застосування для виготовлення деталей в авіа- та ракетобудуванні, машинобудуванні, хімічній, радіоелектронній, а також інших галузях промисловості і техніки.

Висновки. Таким чином, створення досконаліших установок грануляції та розробка нових технологічних режимів процесу грануляції титану та титанових сплавів відкривають можливість створення нових матеріалів і сплавів з унікальними властивостями, а також виробів з них. Це дозволить у найближчій перспективі поширити виробництво та застосування інтерметалідних сплавів, гранульних композитів, сплавів з дрібнокристалічною й аморфною структурою та високим рівнем жароміцності, витривалості, підвищеним модулем пружності тощо. Їх застосування більшою мірою відповідатиме зростаючим вимогам сучасної техніки, а також дозволить поширити їх використання для виготовлення різноманітних виробів методами адитивних і 3D-технологій.

Бібліографічний список

1. **Терновой, Ю. Ф.** Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов [Текст] / Ю. Ф. Терновой, Г. А. Баглюк, С. С. Кудиевский. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2008. – 299 с.
2. **Глазунов, С. Г.** Порошковая металлургия титановых сплавов [Текст] / С. Г. Глазунов, К. М. Борзцовская. – М. : Металлургия, 1989. – 136 с.
3. **Хазнаферов, М. В.** Технология получения «low-cost» порошков легированного титана для аддитивных процессов [Текст] / М. В. Хазнаферов, А. В. Овчинников, Т. Б. Янко // Титан. – 2015. – № 2 (48). – С. 31-36.
4. **Берсенев, А. Г.** Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул [Текст] / А. Г. Берсенев, А. В. Логунов, А. И. Логачева // Вестник МАИ. – 2008. – № 3. – С. 8-14.
5. **Москвичев, Ю. П.** Гранульные композиты и эффективность их применения [Текст] / Ю. П. Москвичев, В. И. Панин, С. В. Агеев и др. // Материалы в машиностроении. – 2011. – № 1 (70). – С. 44-48.
6. **Александров, А. В.** Перспективы дальнейшего развития и совершенствования гранульной металлургии [Текст] / А. В. Александров, С. Ю. Кузнецов, Г. Г. Демченков и др. // Титан: – 2015. – № 3 (49). – С. 39-41.

ЛУПІНОС Сергей Михайлович, кандидат технических наук (Запорожье, Украина). E-mail: lupinosua@gmail.com

ПРУТЦКОВ Дмитрий Владимирович, доктор химических наук, заведующий кафедрой водоснабжения и водоотведения, Запорожская государственная инженерная академия. E-mail: technohim.zap@i.ua

ЛИСТОПАД Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «ГД ОТТОМ» (Харьков, Украина). E-mail: ottom@ottom.com.ua

ПАНОВА Вера Олеговна, ассистент кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: vera_ferra@mail.ru

БЕСПАЛОВ Руслан Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: rubespalov@gmail.com

ВОЛЯР Роман Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: voron@meta.ua

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГРАНУЛЬНОЙ МЕТАЛУРГИИ

Рассмотрены тенденции усовершенствования установок грануляции и процессов газоструйного и центробежного плазменного распыления жидкого металла. Показана возможность получения гранульных композитов на основе титана и интерметаллидных сплавов системы «титан-алюминий» методом сверхбыстрого охлаждения.

Ключевые слова: порошки, сферическая гранула, центробежное и газоструйное распыление, композиты, интерметаллиды, физико-механические свойства

LUPINOS Sergiy, Candidate of Technical Sciences (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: lupinosua@gmail.com

PRUTTS'KOV Dmytro, Doctor of Chemical Sciences, Head of Department of Water-Supply and Water-Way, Zaporizhaska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: technohim.zap@i.ua

LISTOPAD Dmytro, Candidate of Technical Sciences, General Director of LTD «ТН ОТТОМ», (Kharkov, Ukraine). E-mail: ottom@ottom.com.ua

PANOVA Vira, Assistant of Metallurgy Department, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: vera_ferra@mail.ru

BEZPALOV Ruslan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metallurgy Department, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: rubespalov@gmail.com

VOLYAR Roman, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metallurgy Department, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: voron@meta.ua

MODERN TRENDS OF DEVELOPMENT FOR GRANULAR METALLURGY

The tendencies of improvement of granulation apparatuses and processes of gas-jet and centrifugal plasma sputtering of liquid metal are considered. The possibility of obtaining granule composites based on titanium and intermetallic alloys of «Titanium-Aluminium» system by the method of ultrafast cooling is shown.

Keywords: powders, spherical granule, centrifugal and gas-jet spraying, composites, intermetallides, physical and mechanical properties

Стаття надійшла до редакції 29.06.2017 р.
Рецензент, проф. Ю.Ф. Терновий

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>