

УДК 621.767:532.52

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-03>

**Терновий Юрій Федорович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-1078-4430

**Баглюк Геннадій Анатолійович**, старший науковий співробітник, доктор технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ

**Панова Віра Олегівна**, асистент, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-8871-251X

## ОДЕРЖАННЯ ПОРОШКІВ ПІДВИЩЕНОЇ ПЛИННОСТІ РОЗПИЛЕННЯМ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ВОДОЮ ВИСОКОГО ТИСКУ ЗА УМОВ ПОДВІЙНОГО ПОВІТРЯНО-ВОДЯНОГО СМЕРЧУ

Повідомлення 2. Модель розпилення

На основі моделі водяного розпилення високотемпературних розплавів, а також з урахуванням експериментальних і літературних даних розроблено модель розпилення розплавів водою в «смерчі». Стабільний режим розпилення з утворенням сфероїдальних частинок забезпечується мінімальним відстанню між струменем розплаву і потоком води, що обертається, за якої в пограничному шарі газового потоку досягається швидкість близько 90...100% від швидкості води. Розглянуто причини перетворення форми частинок, що утворюються, під час переходу від розпилення кільцевою форсункою до розпилення в «смерчі». Головною причиною є відсутність прямого контакту струменя розплаву та рідких крапель металу з водою. З урахуванням запропонованої моделі та технічних параметрів розпилення було отримано формулу для визначення медіанного діаметра частинок порошку.

Ключеві слова: водяне розпилення, розплав, «смерч», модель, частинка, формоутворення, сфероїдизація

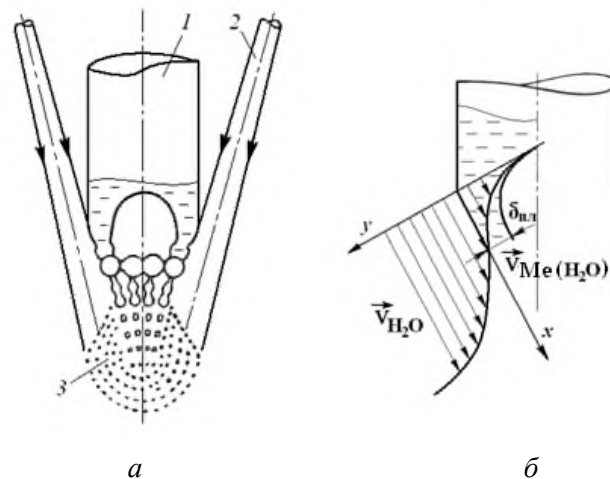
*Вступ.* Процес розпилення струменя рідкого металу водою з використанням кільцевої форсунки за стандартною схемою широко досліджено експериментально та теоретично [1-3]. За цією технологією у великому діапазоні умов частинки порошку набувають неправильної форми, яка обмежує сферу їхнього застосування, зокрема через низьку плинність. Як результат варіювання параметрів розпилення, а саме кута атаки водяного потоку та його закручування, у роботах [4,5] експериментально було знайдено спосіб отримання порошків, якість яких принципово відрізняється від характерного для водяного розпилення. Частинки залежно від умов розпилення набувають форми від сфероїдальної до сферичної. Цей спосіб було покладено до основи технологій, відомих в літературі як, відповідно, «розпилення розплавів водою високого тиску в смерчі» та «ultra high pressure swirl water atomization».

У роботі [6] нами показано, що розпилення розплавів водою високого тиску в «смерчі» є перспективною схемою отримання порошків металів підвищеної насипної щільності та плинності. Одночасно має інтерес механізм формування зазначеним способом частинок сфероїдальної форми різних розмірів. Проте теоретичне обґрунтування механізмів формування частинок сферичної форми під час розпилення металів водою в літературі подано фрагментарно та неповно.

*Постановка завдання.* На підставі отриманих раніше експериментальних даних зробити модель розпилення розплавів водою високого тиску в «смерчі», порівняти з моделлю розпилення кільцевою форсункою без обертання водяного потоку та визначити умови, що призводять до утворення часточок сфероїдальної форми.

*Головна частина досліджень.* Відомою є фізико-математична модель розпилення водою струменя металевого розплаву [2], яку апробовано під час отримання порошків ви-

соколегованих інструментальних сталей, феросплавів, комплексних лігатур, алюмінію та його сплавів на дослідному заводі ДП «УкрНДІспецсталь» (м. Запоріжжя). Модель включає (рис. 1): перетворення початкового струменя металу під час контакту з потоком води на конічну плівку, що сходиться до осі струменя; розвиток на поверхні плівки поздовжніх і поперечних хвиль; нестійкість і розпад торця плівки на краплі. Краплі металу інтенсивно охолоджуються в зоні розпилення у водно-паровому середовищі та кристалізуються, не досягнувши геометричної рівноваги, у вигляді часточок коралоподібної форми.



1 - струмінь металу; 2 - кільцевий потік води; 3 - зона охолодження крапель металу;  
 $V_{H_2O}$  - швидкість потоку води;  $V_{Me(H_2O)}$  - швидкість струменя металу, що зумовлена контактом із струменем води;  $\delta_{пл}$  - товщина плівки металу

Рисунок 1 – Розпилення струменя рідкого металу:

а - схема розпилення, б - розподіл швидкостей у системі «вода-метал»

Формування плівки рідкого металу ( $\delta_{пл}$ , рис. 1б) з поперечними та поздовжніми коливаннями підтверджує знімок, що подано на рис. 2.

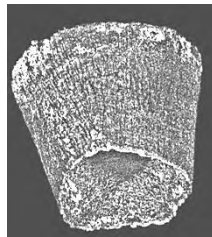


Рисунок 2 – Поперечні та поздовжні хвилі на плівці металу під час водяного розпилення

Утворення коралоподібних частинок зумовлено дією динамічного потоку води, а також закипанням водяних крапель, що утворюються при попаданні води у розплав, що підтверджує структура поверхневого шару застиглого металу у вузлі розпилення (рис. 3), а також порожнисті частинки порошку (рис. 4).

Медіанний розмір частинок у такому разі визначається за формулою [7]:

$$d_m = k \cdot G_{Me}^{1,44} \cdot G_{H_2O}^{-0,5} \cdot v_{Me}^{0,35} \cdot \gamma_{Me}^{0,15} \cdot D_c^{-1,03} \cdot \rho_{Me}^{-0,56} \cdot \rho_{H_2O}^{-0,25} \cdot v_{H_2O}^{-0,07} \cdot V_{H_2O}^{-0,96}, \quad (1)$$

де  $G_{Me}$ ,  $G_{H_2O}$  – витрата металу та води, відповідно, кг/с;  $v_{Me}$ ,  $v_{H_2O}$  – кінематична в'язкість рідкого металу та води, м<sup>2</sup>/с;  $\gamma_{Me}$  – поверхневий натяг рідкого металу, Дж/м<sup>2</sup>;  $D_c$  – діаметр

струменя металу, м;  $\rho_{Me}$ ,  $\rho_{H_2O}$  – щільність рідкого металу та води, відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{H_2O}$  – швидкість води, м/с.

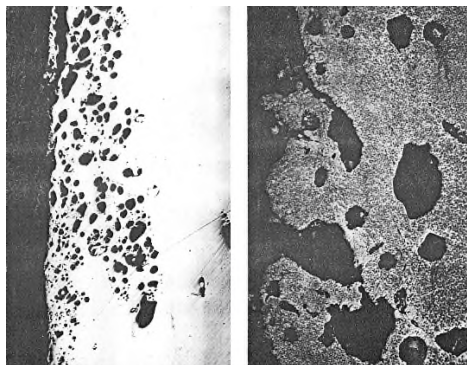


Рисунок 3 – Структура біляповерхневого шару металу, застиглого у вузлі розпилення під час водяного розпилення сталі Р6М5: а -  $\times 20$ , б -  $\times 100$

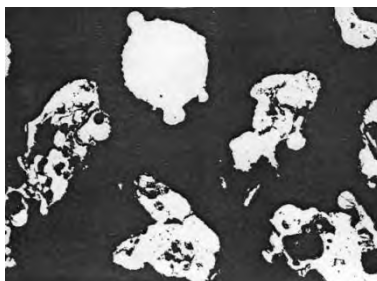


Рисунок 4 – Шліф порошку сталі Р6М5, фр. - 400+315

При цьому витрату металу визначають як  $G_{Me} = 0,25\rho_m \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot (2g \cdot h)^{0,5}$ , де  $h$  – висота шару металу в металоприймачі, м.

Таким чином, чим більша витрата та швидкість води та чим менша в'язкість розплаву, тим вища ймовірність отримання дрібних порошоків за заданої товщини струменя металу. Проте вплинути на форму частинок головної фракції порошку під час розпилення за такою схемою не є можливим.

У зв'язку із спостереженням останнім часом підвищення інтересу до процесів отримання сферичних порошоків, зумовленого, зокрема, розвитком адитивних лазерних технологій, представляє інтерес технологія водяного розпилення з отриманням сферичних порошоків як економічніша у порівнянні з газовим розпиленням.

Особливістю технології розпилення у «смерчі» є розпилення струменя рідкого металу кільцевим потоком води без їхнього зіткнення [6]. Кільцева форсунка вихрового типу формує потік води, що обертається, у вигляді гіперболоїда, в порожнину якого подають струмінь металу. У експериментах з різними сплавами нами було витримано відстань між потоком води та струменем металу близько  $10^{-3}$  м. Одночасно формувався газовий (пароповітряний) прошарок, що обертався, який призводив до розпилення струменя металу. Створювані частинки порошку мали сфероїдальну форму.

Пізніше автори робіт [4,8] визначили, що в області «перешийка» гіперболоїда та нижче нього різко понижується тиск пароповітряного середовища, внаслідок чого струмінь металу стає нестійким і диспергує. Одночасно, чим більше досягається перепад тиску, тим дрібнішим є отриманий порошок. Використовуючи форсунку зі всмоктуючою трубою, автори отримали дуже дрібні порошки сфероїдальної форми. Автори припустили, що краплі металу, пройшовши звужену частину гіперболоїда, відносно спокійно охолоджуються практично без контакту з водою та тверднуть у вигляді частинок з формою бли-

зкою до сферичної або ж сферичних за рахунок поверхневого натягу. Проте формалізації моделі, яка пояснювала б утворення сферичних частинок, запропоновано не було.

Особливістю способу розпилення у «смерчі» є можливість отримання сфероїдальних порошків як дрібних, так і великих фракцій (рис. 5).

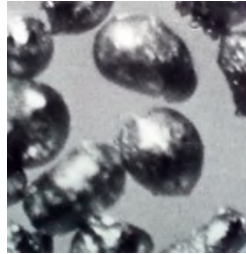
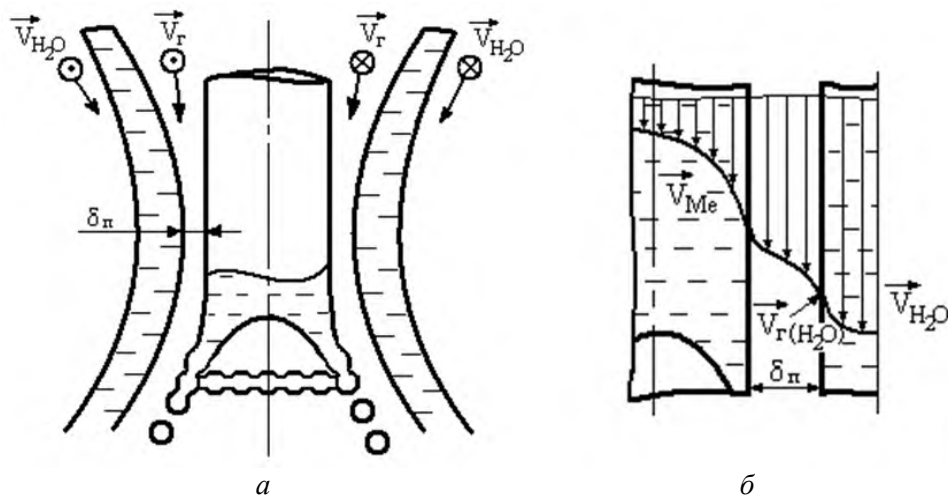


Рисунок 5 – Частинки порошку ФМн1,5 (фракція +63-100 мкм), отриманого за технологією розпиленням у «смерчі» [6]

Експериментальні дослідження технологічних режимів отримання сфероїдальних порошків виконували на дослідній лінії ДП «УкрНДІспецсталь» з виробництва водно-розпиленних порошків. Вузол розпилення включав гідравлічну форсунку високого тиску кільцевого типу з подаванням води уздовж осі й одночасним обертанням навколо струменя металу, що розпилюють.

Було встановлено, що сфероїдальні частинки утворюються за умов, коли потік води, що обертається, не торкався струменя металу та проходив на мінімальній відстані від неї й утворював повітряний пограничний шар, що обертається водним потоком.

Результати досліджень дозволяють припускати наступну модель розпилення струменя металу «в смерчі» (рис. 6).



$\vec{V}_{H_2O}$  - швидкість руху водяного конічного потоку;  $\vec{V}_r$  - швидкість ежектованого газу (повітря);  $\vec{V}_{r(H_2O)}$  - швидкість газу в зоні перешийка (зона  $\delta_n$ );  $\delta_n$  - мінімальна відстань між водою і рідким металом

Рисунок 6 – а) схема розпилення подвійним смерчем вода-газ; б) розподіл швидкостей в системі «вода-газ-метал» в області «перешийка» (вертикальний напрям)

Як видно з рис. 8, розпилення відбувається без безпосереднього зіткнення потоку води із струменем металу. Потік води, що обертається, із значною швидкістю витікає з кільцевої щілини й утворює плівку у формі гіперболоїда обертання, до порожнини якого, уздовж його осі, поступає струмінь розплавленого металу. Причиною розпилення металу за таких умов є формування подвійного повітряно-водяного смерчу: водяна воронка, що обертається, призводить до ежекції газу (повітря) та ініціює обертання газового стовпа у її

порожнині. У районі мінімальної відстані між водою та струменем металу  $\delta_n$  швидкість газового потоку повинна різко зростати, призводячи до зниження нормальної складової тиску газового середовища (розрідженню), та, як результат, до нестабільності й руйнування струменя розплаву.

Швидкість газового стовпа визначається швидкістю потоку води (рис. 8,б) і суттєво знижується під час видалення від поверхні їхнього контакту:  $V_{H_2O}(y)/V_{H_2O} = (y/\delta_T)^{1/7}$  (тут  $y$  – координата, що перпендикулярна поверхні) [7]. Тому велике значення має товщина газового прошарку  $\delta_n$ , яка забезпечується поєднанням геометричних параметрів форсунок за заданим діаметром струменя металу. Для забезпечення ефективного розпилення потрібно досягти деякого оптимального (мінімального) значення  $\delta_n$ , коли швидкість газового потоку, що примикає до поверхні струменя металу, відповідатиме швидкостям, характерним для газового розпилення. Кут атаки потоку води, а також кут його закручування є тими параметрами, що визначають місце розташування та глибину розрідження, що створюється, а отже і величину ежекції і витрату газу.

Модель розпаду струменя металу на краплі у такому разі відрізняється від поданої на рис. 1 і включає наступну послідовність:

- початковий струмінь металу за рахунок потоку газу, що всмоктується та обертається, перетворюється на кінцеву плівку, що розбігається;
- в плівці розвиваються поздовжні та поперечні коливання;
- на периферії плівки з хвиль з максимальною амплітудою формуються мікрострумені;
- мікрострумені за рахунок розвитку в них коливань розпадаються на краплі;
- краплі тверднуть за рахунок охолодження у пароповітряній області, а потім – у воді.

Підтвердженням викладеної вище схеми може бути плівка рідкого металу, що затверділа під час розпилення (рис. 7).



Рисунок 7 – Поперечні та поздовжні хвилі на плівці металу під час розпилення у «смерчі»

Присутність газового прошарку, що динамічно обертається, має вирішальний вплив на результат кристалізації крапель. У нашому випадку, за рахунок вихрового руху та відсутності прямого контакту струменя розплаву з водою частинки менше стикаються одна з одною і зазнають меншого деформуючого впливу на форму. Первинне охолодження частинок здійснюється, головним чином, за рахунок вимушеної конвекції в газі [9], що дає змогу частинкам набутти форми, близької до сферичної, до моменту їх повного твердіння.

Таким чином, розпилення у «смерчі», по суті, є розпиленням газом, що рухається зі швидкістю, яку визначає потік води.

Одночасно слід враховувати також температурний градієнт газового прошарку. Ми не мали можливості виміряти температуру в цій зоні. Проте спостережуване формування частинок з комірчастою структурою (рис. 8) свідчить про високі швидкості твердіння (близько  $10^6$  K/c). Це може бути пояснено лише взаємодією крапель, що твердіють, з во-

дою, що призводить до їх загартування під час кристалізації з урахуванням впливу режиму кипіння води, що показано нами в роботі [9]. Проте сферична форма частинок свідчить, що розпилення у подвійному водно-повітряному смерчі дає перевагу перед звичайним водяним розпиленням, яка полягає у відсутності руйнівної дії води на краплі, що формуються, та у збільшенні часу твердіння крапель (часу пробігу до зустрічі з водою) завдяки наявності газового прошарку. Форма частинок також непрямо або опосередковано свідчить про відсутність деформуючого ефекту під час зіткнення частинок з водою, а отже про формування до цього моменту твердої оболонки достатньої товщини, щоб витримати тангенціальний вхід у воду (ймовірно, за рахунок зіткнення крапель металу з краплями води).

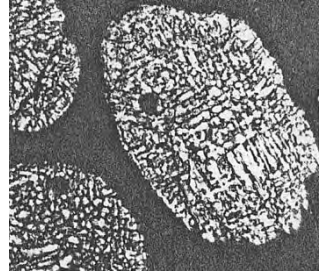


Рисунок 8 – Мікроструктура порошку ФМн1,5, отриманого розпиленням водою «у смерчі», фракція +63-100 мкм,  $\times 400$

Запропонована модель розпиленням «газовим прошарком» схожа з моделлю розпиленням газом, описаною в роботі [2]. Відмінність полягає лише в тому, що швидкість газу задається швидкістю води.

Враховуючи технологічні, фізичні та геометричні параметри, частинок порошку, що формуються «у смерчі»:

$$d_m = k \cdot G_{Me}^{0,3} \cdot G_{H_2O}^{-0,3} \cdot v_{Me}^{0,4} \cdot \gamma_{Me}^{-0,03} \cdot D_c^{0,63} \cdot \rho_{Me}^{0,2} \cdot \rho_{\Gamma}^{-0,17} \cdot V_{\Gamma}^{-0,34}, \quad (2)$$

де  $\rho_{\Gamma}$ ,  $V_{\Gamma}$  – щільність і швидкість руху газу в шарі, що примикає до потоку води, м/с.

Одночасно у формулі (2) замість швидкості газу в турбулентному пограничному шарі  $\delta_n$  використовували вираз для середньої швидкості води в пограничному шарі  $V_{\Gamma} \approx 0,85V_{H_2O}$ . Формулу було перевірено на сталях і сплавах, у тому числі ФМн1,5, Р6М5, лігатурах на основі марганцю, сплавах на основі алюмінію та міді.

*Висновки.* Причиною утворення сфероїдальних частинок є відсутність прямого контакту крапель металу з водою. Розпилення здійснюють водою, але через тонкий шар газу. Одночасно велике значення має товщина газового прошарку. За оптимальних параметрів розпилення досягається збільшення часу твердіння крапель, що сприяє отриманню частинок сферичної або близькою до сферичної форми.

З урахуванням запропонованої моделі та технічних параметрів розпилення було отримано реальну формулу для визначення медіанного розміру частинок отриманого порошку.

Запропонований спосіб є перспективним для одержання сфероїдальних порошків будь-якого хімічного складу, у тому числі на основі заліза та його сплавів, а також міді та її сплавів і збереженням переваг водяного розпилення.

### Бібліографічний перелік

1. Ничипоренко О. С., Найда Ю. И., Медведовский Л. Б. Распыленные металлические порошки. Киев : Наукова думка, 1980. 237 с.
2. Терновой Ю. Ф., Баглюк Г. А., Кудиевский С. С. Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов : монография. Запорожье: РИО ЗГИА, 2008. 298 с.

3. Handbook on non-ferrous metal powders: technologies and applications. Ed.: O. Neikov, S. Naboychenko, N. V. Yefimov. Elsevier, 2019. 974 p.
4. Спосіб получения пасивированного порошка среднеуглеродистого ферромарганца: А.с. 1603649 СССР А1, МКИ<sup>3</sup> В22 F9/08. Заявл. 27.10.88, опубл. 27.10.89.
5. Method for preparing metal powder. Patent US6336953 B1. Publ. 01.08.2002.
6. Терновий Ю. Ф., Воденніков С. А., Панова В. О. Отримання порошоків збільшеної плинності розпиленням водою високого тиску в умовах подвійного повітряно-водяного смерчу. (Повідомлення 1). *Металургія: наукові праці ЗДІА*. 2018. Вип. 2(40). С. 33-37.
7. Терновой Ю. Ф., Кудиевский С. С., Пашетнева Н. Н. Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов : монография. Запорожье : РИО ЗГИА, 2005. 149 с.
8. Development of spherical fine powders by high pressure water atomization using swirl water jet / M. Kikukawa, S. Matsunaga, T. Inaba et al. *Proc. of 2000 Powder Metallurgy World Congress*. Part 1. Nov. 12-16, 2000. Kyoto (Japan). P. 363-366.
9. Терновой Ю. Ф., Панова В. О. Вынужденный теплообмен и скорость охлаждения капель при распылении расплава водой. *Металургія: наукові праці ІІ ЗНУ*. 2019. Вип. 1(1). С. 15-18.

### References

1. Nichiporenko O. S., Naida Yu. I., Medvedovskii L. B. Raspylennye metallicheskie poroshki [Atomized metal powders]. Kiev: Naukova dumka, 1980. 237 p.
2. Ternovoi Yu. F., Bagliuk G. A., Kudievskii S. S. Teoreticheskie osnovy protsessov raspylenia metallicheskih rasplavov [Theoretical basis for processes of atomization of metal melts] : monograph. Zaporozh'e : RIO ZGIA, 2008. 298 p.
3. Handbook on non-ferrous metal powders: technologies and applications. Ed. O. Neikov, S. Naboychenko, N. V. Yefimov. Elsevier, 2019. 974 p.
4. Sposob poluchenia passivirovannogo poroshka sredneuglerodistogo ferromargantsa [Method for obtaining passivated powder of medium carbon ferromanganese] : A.I. 1603649 UdSSR A1, МКИ<sup>3</sup> В22 F9/08; claim. 27.10.88; publ. 27.10.89.
5. Method for preparing metal powder : Pat. US6336953 B1. / M. Kikukawa, Sh. Matsunaga, T. Inaba etc ; publ. 01.08.2002.
6. Ternovyi Yu. F., Vodennikov S. A., Panova V. O. Otrymannia poroshkiv zbilshenoї plynnosti rozpylenniam vodoiu vysokogo tysku v umovakh podviinogo povitriano-vodianogo smerchu. (Povidomlennia 1) [Obtaining powders with improved fluidity by high pressure water atomization in conditions of dual air-water spout. Report 1]. *Metallurgia: naukovi pratsi ZDIA*. 2018. vol. 2(40). pp. 33-37.
7. Ternovoy Yu. F., Kudievskiy S. S., Pashetneva N. N. Inzhenernye raschety tehnologicheskikh protsessov raspylenia rasplavlennykh metallov [Engineering calculations of technological processes of atomization of melted melts] : monograph. Zaporozh'e : RIO ZGIA, 2005. 149 p.
8. Kikukawa M., Matsunaga S., Inaba T. Development of spherical fine powders by high pressure water atomization using swirl water jet. *Proc. of 2000 Powder Metallurgy World Congress*. Part 1. Nov. 12-16, 2000. Kyoto (Japan). pp. 363-366.
9. Ternovoi Yu. F., Panova V. O. Vynuzhdennyi teploobmen i skorost' okhlazhdenia kapel' pri raspylenii rasplava vodoj. *Metallurgia: naukovi pratsi ІІ ZNU*. 2019. vol. 1(1). pp. 15-18.

**Ternovoy Yurii**, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university

**Baglyuk Gennadii**, senior staff scientist, doctor of technical sciences, Frantsevich institute of problem materials technology HASU.

**Panova Vera**, assistant, Zaporozhe national university.

---

**MADING OF POWDERS WITH THE INCREASED FLUIDITY BY NEBULIZED OF METAL FUSIONS BY WATER OF HIGH-PRESSURE IN THE CONDITIONS OF DOUBLE AIR-HYDRONIC TORNADO**

## Report 2. Model of atomization

Water atomization of metal melts in a «spout» is a promising method for producing powders of any chemical composition with a spheroid particle shape. This shape is not typical for traditional water atomization. A model explaining and predicting the formation of spheroid powder particles with a size of more than 10  $\mu\text{m}$  during water atomization is absent in the literature. The work based on the well-known model for water atomization of high-temperature melts. Based on this model, as well as taking into account the experimental and literature data, a model of melt atomization by high pressure water in an air-water «spout» has been developed. It is shown that the feature of atomization in «spout» is the fragmentation of metal jet by a rotating gas layer between the melt jet and the water flow, which causes thermophysical conditions leading to the formation of spheroid particles. The characteristics of the gas layer are determined by the technical parameters of the water flow, such as pressure, velocity, impact angle, swirl angle, and affect both the shape of the atomized particles and their size. It is shown that the thickness of the gas layer is of decisive importance. Stable atomization mode with the formation of spheroid particles is ensured by a minimum distance between the melt jet and the rotating water stream, at which the boundary layer of the gas flow has a rate of about 90...100% of the water flow rate. The reasons for the transformation of the shape of the atomized particles at the transition from atomization by an annular nozzle to a «spout» are considered. The main reason is the absence of direct contact between the melt jet and liquid metal droplets with water. With optimal atomization parameters, an increase in the solidification time of the droplets, sufficient for their spheroidization, is achieved. Taking into account the proposed model and technical parameters of atomization, a formula was obtained to predict the median diameter of powder particles.

Стаття надійшла: 06.08.2020 р.