

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ С ФОРМОЙ ЧАСТИЦ, БЛИЗКОЙ К СФЕРИЧЕСКОЙ, РАСПЫЛЕНИЕМ РАСПЛАВОВ ВОДОЙ

Панова В.О., Терновой Ю.Ф.

Инженерный институт Запорожского национального университета

Аннотация. В статье рассмотрен процесс распыления порошков водой высокого давления «в смерче». На примере распыления ферромарганца подтверждена возможность получения порошков с формой частиц, близкой к сферической. Предложена модель распыления. Показано, что воздействие осуществляется водой, но через тонкий слой газа, без прямого контакта вода-металл. Полученные порошки, используемые для обмазки сварочных электродов, имеют преимущество перед молотыми порошками.

Ключевые слова: порошок, распыление водой, смерч, форсунка, форма частиц, сфероидизация, сварочные электроды.

Введение

Порошковые материалы широко применяются в самых различных областях промышленности, причем область применения определяет требования к чистоте порошка, к размеру и форме их частиц. Коммерческие металлические порошки представляют собой, в основном, частицы до 300 мкм, форма которых в зависимости от способа получения варьируется от сферической до коралло-видной.

В последнее время наблюдается тенденция увеличения объемов производства сферических порошков, что связано с развитием аддитивных лазерных технологий. Сферическая форма частиц обеспечивает хорошую текучесть порошка и позволяет компактно уложить частицы в спекаемом слое, приводя к формированию приемлемой плотности получаемого изделия [1].

Большое значение имеет также пористость самих порошковых частиц и наличие сателлитов на их поверхности. Также порошки сферической формы представляют интерес при производстве изделий по технологии МІМ, как материалы припоев, сварочных электродов и др.

Основным способом получения порошков сферической формы является распыление расплавов: газовое, вакуумное (растворенным газом) или центробежное (вращающимся электродом) [1].

Условия каждого из этих процессов обеспечивают выполнение довольно высоких требований к чистоте металла. К недостаткам относится широкий разброс получаемых частиц по размерам и, следовательно, относительно малый выход годного и высокая себестоимость порошка.

Альтернативой вышеперечисленным методам является технология обработки порошков плазмой, когда порошок любой, не сферической, формы оплавляется в потоке плазмы, в результате чего частицы приобретают правильную сферическую форму. Очевидно, что порошок, полученный таким способом, довольно дорог.

В этой связи растет число работ по исследованию возможности использования порошков более низкого качества. Так, в [2] приводится информация о возможности использования в установке лазерного спекания несферических порошков титана. То есть теоретически в ближайшем будущем можно ожидать создания новых возможностей использования более дешевых порошков низкого качества в вышеуказанных технологиях или же усовершенствования существующих более экономичных способов производства порошков для повышения их качества.

Анализ публикаций

С учетом вышесказанного вызывает интерес получение порошков с повышенной текучестью и насыпной плотностью более экономичными способами, чем традиционные. Одним из таких способов является распыление расплавов водой высокого давления.

Процесс распыления расплавов водой является распространенной технологией получения металлических порошков сплавов на основе железа, а также никеля и меди. Известно, что порошки, полученные при обычном распылении расплавов водой, имеют высокую дисперсность и неправильную кораллообразную форму частиц. Такие порошки обладают более низкой сыпучестью, однако могут обеспечить меньшую пори-

стость порошковых изделий, а также, в отличие от сферических порошков, могут быть более эффективно скомпактированы в холодном состоянии [1].

Некоторые авторы утверждают, что распылением водой получить сферические порошки нельзя [3]. В то же время в ряде работ отмечалось, что данный способ позволяет регулировать микроструктуру и форму частиц путем изменения режимов распыления. Одни из первых упоминаний о получении порошков с высоким выходом частиц, близких по форме к сферическим и связанных с применением вращающихся потоков воды, встречаются в работах О.С. Ничипоренко [4]. Позже был разработан способ получения сфероидальных частиц «в смерче» [5]. В настоящее время ведутся исследования по получению мелких сферических порошков закрученной струей воды высокого давления [6].

Японские исследователи за счет усовершенствования узла распыления достигли заметных результатов по получению распылением водой «в смерче» сферических частиц на основе сплавов железа, меди, серебра, достаточных для их коммерческой реализации [7]. Было изучено влияние на выход порошка таких факторов, как давление воды, угол атаки, угол завихрения. Однако адекватной физической модели, которая объясняла бы переход от образования кораллообразных частиц к сфероидальным, авторы не предлагают. В целом, теоретическое обоснование механизмов формирования частиц сферической формы в процессе распыления металлов водой в литературе фрагментарно и неполно.

Цель и постановка задачи

Таким образом, представляет интерес обоснование формирования сферической (или близкой к ней) формы частиц порошков металлов при распылении водой высокого давления с использованием закрученной струи.

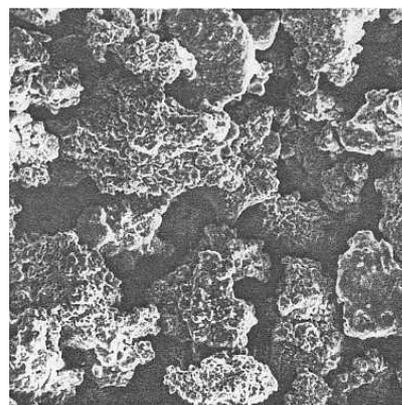
Основной материал исследования

Исследования технологических режимов получения сфероидальных порошков проводили на опытной линии ГП УкрНИИ Спецсталь по производству водно-распыленных порошков на примере среднеуглеродистого ферромарганца ФМн1,0. Узел распыления включал гидравлическую форсунку высокого давления кольцевого типа и всасывающую трубу с встроенной в нее форсункой низкого давления. Во время проведения экспериментов использовались разные варианты насадок

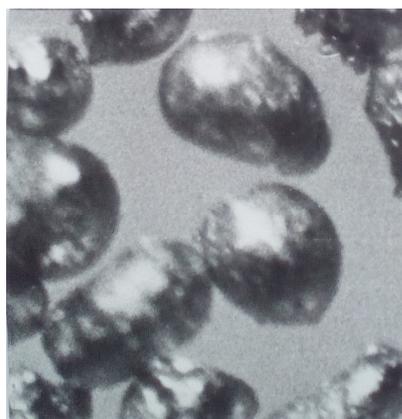
форсунки, которые обеспечивали разный удельный расход воды и угол атаки при прямоточном распылении, а также новая конструкция насадок, которая позволяет проводить эксперименты по распылению «в смерче» [8].

Для оптимизации физических (грансклад, форма частиц) и технологических (текучесть, насыпная плотность) свойств порошка варьировали давление воды, расход воды и расплава, геометрические параметры форсунки, угол атаки.

При использовании форсунки кольцевого типа, прототипом которой является форсунка Mannesmann AG [9], был достигнут режим распыления в двойном воздушно-водяном смерче, при котором образовывались частицы сфероидальной («картофельвидной») формы (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Форма частиц порошка ФМн1,0 в зависимости от типа форсунки: а – обычная моноструйная гидравлическая форсунка, б – форсунка, генерирующая двуслойный смерч

Порошок, полученный «в смерче», показал более высокую насыпную плотность (в 1,6–1,8 раза) и текучесть с выходом год-

ных фракций 95 % и дополнительным пассивированием поверхности частиц. Преимуществом нашей форсунки перед кольцевой моноструйной стало резкое снижение уровня шума (со 130 до 60 дБ) в процессе распыления, обусловленное исключением взаимного столкновения водяных потоков.

Предлагаемая схема распыления расплава приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, распыление идет без непосредственного соприкосновения потока воды со струей металла. Вращающийся поток воды с большой скоростью вытекает из кольцевой щели и образует пленку в форме гиперboloида вращения, в полость которого, вдоль его оси, поступает струя расплавленного металла. Причиной наблюдаемого распыления в данных условиях является формирование двуслойного воздушно-водяного смерча: водяная воронка приводит к всасыванию газа (воздуха) и инициирует вращение газового столба (включая водяной пар) в ее полости. В результате распыление проходит в две стадии: вращающимся воздушным потоком, а затем – вращающимся водяным.

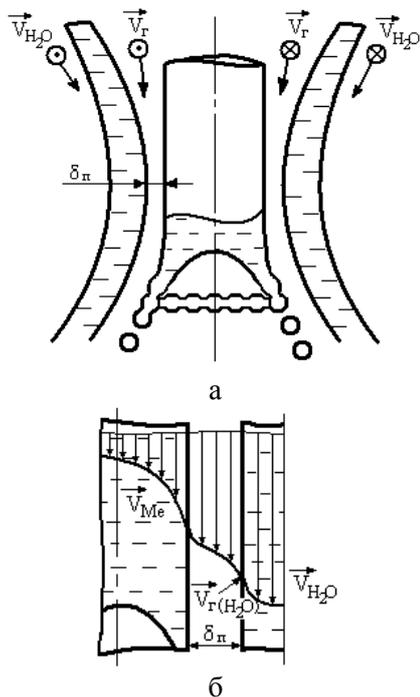


Рис. 2. Схема распыления струи расплава двойным смерчем «вода-газ» (а) и распределение скоростей в системе «вода-газ-металл» в районе «перешейка» (вертикальное направление) (б)

Газовый поток, возникающий за счет аспирации потоком воды, нагревается и смешивается с образующимся водяным паром.

При этом за счет расширения смеси газов резко возрастает давление. В районе «перешейка» скачок давления достигает максимума, приводя к резкому увеличению скорости газового потока и, в результате, к распылению струи металла.

Скорость газового столба определяется скоростью потока воды (рис. 2, б), и для эффективного распыления большое значение имеет толщина газовой прослойки δ_n , которая зависит от сочетания геометрических параметров форсунки. При оптимальном значении δ_n скорость газового потока, с учетом потерь на трение, соответствует скоростям, характерным для газового распыления.

С учетом данных работы [10], процесс формирования капель можно представить в виде следующей последовательности.

1) Исходная струя металла за счет всасывающегося газа и трения газа о поверхность воды преобразуется в коническую пленку.

2) По периферии пленки расплава возникают продольные и поперечные колебания. Из максимумов волн формируются микроструи, которые за счет развития колебаний распадаются на капли.

3) Капли начинают затвердевать в зоне газовой прослойки (газ плюс водяной пар) и далее в паро-капельной зоне охлаждения ниже фокуса распыления.

4) Капли окончательно затвердевают при контакте с вращающимся потоком воды.

Присутствие газовой прослойки оказывает на результат кристаллизации капель решающее значение.

Из теории распыления металлов известно, что форма получаемых частиц определяется соотношением времени затвердевания и сфероидизации [11]. Преимуществом газового распыления является малая охлаждающая способность газа, вследствие чего частицы затвердевают после того, как станут сферическими. При распылении водой обеспечивается быстрое охлаждение. Кроме того, при обычном распылении водой на форму частиц оказывает влияние их столкновение с водой и другими частицами. В результате частицы формируются неправильной формы с шероховатой поверхностью. В нашем случае, за счет вихревого движения и отсутствия прямого контакта струи расплава с водой частицы меньше сталкиваются друг с другом и испытывают меньшее деформирующее влияние на форму.

Охлаждение частиц в паро-капельной зоне ниже фокуса распыления осуществляется, главным образом, за счет вынужденной

конвекции. Это позволяет частицам принять форму, близкую к сферической, до момента их полного затвердевания.

Микроструктура полученного порошка (рис. 3) ячеистая, что говорит о высокой скорости охлаждения [12].

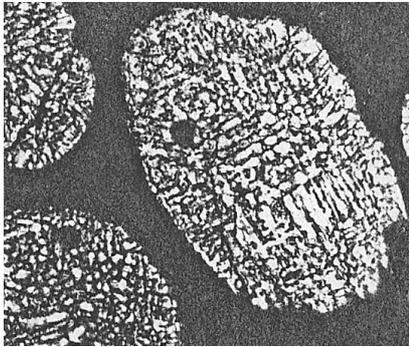


Рис. 3. Микроструктура порошка ФМн1,0, полученного распылением водой «в смерче», фракция +63-100 мкм, $\times 400$

Выполненные нами расчеты показали, что распыленные частицы охлаждаются со скоростью порядка 10^6 К/с. Такая скорость охлаждения характерна для режима пузырькового кипения воды [13]. Следует заметить, что подобная скорость охлаждения наблюдается и в случае обычного распыления металлов водой. Исходя из этого, можно сделать вывод, что распыление «в смерче» дает преимущество за счет увеличения времени затвердевания капель, что способствует получению частиц сферической формы.

С учетом модели распыления и технических параметров получена формула для расчета медианного размера частиц порошка, получаемого «в смерче»:

$$d_m \approx 2,91 v_{Me}^{0,4} \rho_{Me}^{0,2} D_C^{0,63} \gamma_{Me}^{-0,03} \rho_{\Gamma}^{-0,17} V_{\Gamma}^{-0,34} G_{Me}^{0,3} G_{H_2O}^{-0,3} V_{\Gamma}^{-0,34} \approx V_{H_2O}^{-0,34},$$

где v_{Me} , v_{H_2O} – кинематическая вязкость металла и воды соответственно, m^2/c ; ρ_{Me} , ρ_{H_2O} – плотность металла и воды соответственно, $кг/м^3$; D_C – диаметр исходной струи металла, м; γ_{Me} – удельная поверхностная энергия, Дж/м²; V_{H_2O} , V_{Γ} – скорость движения водяного потока и газа соответственно, м/с; G_{Me} , G_{H_2O} – удельная масса металла и воды соответственно, кг/с.

Формула была проверена на сталях и сплавах, в том числе ФМн1,5, Р6М5, лигатурах на основе марганца, сплавах на основе алюминия, меди. При этом в формуле вместо скорости газа в турбулентном пограничном слое δ_{II} использовали выражение для сред-

ней скорости газа в пограничном слое $V_{\Gamma} \approx 0,85 V_{H_2O}$ [10].

Порошки ферромарганца, полученные по описанной технологии, были опробованы при изготовлении обмазки сварочных электродов. Результаты показали снижение уровня газовыделения во время изготовления обмазочной массы в 10...30 раз, что исключает ее вспучивание при изготовлении электродов, характерное при использовании порошков, полученных механическим измельчением, за счет взаимодействия с жидким стеклом; повышение пластической прочности обмазки; повышение ударной вязкости сварного шва в 1,3...2 раза при отрицательных температурах.

Выводы

Получение сфероидальных порошков металлов водой высокого давления возможно по технологии распыления «в смерче».

Причиной образования сфероидальных частиц является отсутствие прямого контакта капель металла с водой. Распыление осуществляется водой, но через тонкий слой газа. При этом большое значение имеет толщина газовой прослойки. При оптимальных параметрах распыления достигается увеличение времени затвердевания капель, что способствует получению частиц сферической или близкой к сферической формы.

С учетом предложенной модели и технических параметров распыления была получена формула для определения медианного размера частиц получаемого порошка.

Продемонстрирована возможность улучшения качественных характеристик порошков ферромарганца, используемых для обмазки сварочных электродов, путем их производства распылением водой высокого давления «в смерче». Порошок, полученный этим способом, обладает большей текучестью, большей насыпной плотностью по сравнению с порошком, полученным обычным распылением водой и, тем более, механическим измельчением.

Предложенный способ представляется перспективным для получения сфероидальных порошков на основе железа и его сплавов, а также меди и ее сплавов при сохранении преимуществ водяного распыления.

Литература

1. Handbook on non-ferrous metal powders: technologies and applications / ed. Neikov O., Naboychenko S., Yefimov N.V. Elsevier, 2019. 974 p.

2. 3D-systems previews high capacity ProX 400 direct metal 3D printer tool-free manufacturing. UPL: <https://www.3dsystems.com> (дата обращения: 20.06.2019).
3. Lagutkin S., Achelis L., Sheikhaliev Sh., Uhlenwinkel V., Srivastava V. Atomization process for metal powder // *Materials Science and Engineering A*. 2004. Vol. 383. P. 1–6.
4. Ничипоренко О.С., Найда Ю.И., Медведовский Л.Б. Распыленные металлические порошки. Киев: Наукова думка, 1980. 237 с.
5. А.с. 1603649 А1 В22 F9/08 Способ получения пассивированного порошка среднеуглеродистого ферромарганца / УкрНИИспецсталь / Ю.Ф. Терновой, В.И. Билан, А.П. Александров / Заявл. 27.10.88, опубл. 27.10.89.
6. Zhu Jie, Luo Hao, Weng Ting et al. Characterization of fine metal powders produced by hybrid water-gas atomization for metal injection molding. In: *Frontiers in materials processing, applications, research and technology. Select proc. of FiMPART 2015*. P. 391–398.
7. Kikukawa M., Matsunaga S., Inaba T. et al. 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)*. P. 363–366.
8. Терновий Ю.Ф., Воденніков С.А., Панова В.О. Отримання порошків збільшеної плинності розпиленням водою високого тиску в умовах подвійного повітряно-водяного смерчу // *Металургія: зб. наук. праць ЗДІА*. 2018. Вип. 2(40). С. 33–37.
9. Патент 1151197 (ФРГ) В 22 F 9/08 Способ производства железного порошка для прессования изделий и устройство для его осуществления / Маннесманн АГ / Д. Бернхардт, Н. Даутценберг, Р. Луммер, Г. Хубер / Заявл. 14.02.78, опубл. 6.02.1979.
10. Терновой Ю.Ф., Баглюк Г.А., Кудиевский С.С. Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов: монография. Запорожье: ЗГИА, 2008. 298 с.
11. Ничипоренко О.С. Формообразование частиц порошка при распылении расплава водой // *Порошковая металлургия*. 1976. № 9. С. 5–10.
12. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. Москва: Металлургия, 1982. 168 с.
13. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. Москва: Энергия, 1979. 284 с.
- for metal powder // *Materials Science and Engineering A*. 2004. Vol. 383. P.1–6.
4. Nichiporenko O.S., Najda Ju.I., Medvedovskij L.B. Raspylennye metallicheskie poroshki [Atomized metal powders]. Kyiv: Naukova dumka, 1980. 237 s. [in Ukrainian].
5. A.s. 1603649 A1 B22 F9/08 Sposob polu-chenija passivirovannogo poroshka sred-neuglerodistogo ferromarganca [Method of obtaining of passivated powder of medium-carbon ferromanganese] / UkrNIISpecstal' / Ju.F. Ternovoj, V.I. Bilan, A.P. Aleksandrov / Zajavl. 27.10.88, opubl. 27.10.89. [in Russian].
6. Zhu Jie, Luo Hao, Weng Ting et al. Characterization of fine metal powders produced by hybrid water-gas atomization for metal injection molding. In: *Frontiers in materials processing, applications, research and technology. Select proc. of FiMPART 2015*. P. 391–398.
7. Kikukawa M., Matsunaga S., Inaba T. et al. 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)*. P. 363–366.
8. Ternovyi Yu.F., Vodennikov S.A., Panova V.O. Otrymannia poroshkiv zbilshenoj plynnosti rozpylenniam vodoiu vysokogo tysku v umovah podvoinogo povitriano-vodianogo smerchu [Production of powders of elevated fluidity by high-pressure water atomization in conditions of double air-water spout] // *Metallurgija: nauk. pr. ZDIA*. 2018. Vyp. 2(40). P. 33–37. [In Ukrainian].
9. Patent 1151197 (FRG) B 22 F 9/08 Sposob proizvodstva zhelezного poroshka dlja pressovaniya izdelij i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [Method of production of iron powder for pressing wares and device for its realization] / Mannesmann AG / D. Bernhardt, N. Dautcenberg, R. Lummer, G. Huber / Zajavl. 14.02.78, opubl. 6.02.1979. [In Russian].
10. Ternovoj Ju.F., Bagljuk G.A., Kudievskij S.S. Teoreticheskie osnovy processov raspylenija metallicheskih rasplavov [Theoretical basics of processes of atomization of metal melts]: Monografija. Zaporozh'e: Izdatel'stvo ZGIA, 2008. 298 s. [In Ukrainian].
11. Nichiporenko O.S. Formoobrazovanie chastic poroshka pri raspylenii rasplava vodoj [Formation of shape of powder particles at atomization of melt by water] // *Poroshkovaja metallurgija*. 1976. № 9. S. 5–10. [In Russian].
12. Miroshnichenko I.S. Zakalka iz zhidkogo sostojanija [Quenching from liquid state]. M.: Metallurgija, 1982. 168 s. [In Russian].
13. Kutateladze S.S. Teplperedacha pri kondensacii i kipenii [Heat transfer at condensation and boiling]. M.: Jenergija, 1979. 284 s. [In Russian].

References

1. Handbook on non-ferrous metal powders: technologies and applications / ed. Neikov O., Naboychenko S., Yefimov N.V. Elsevier, 2019. 974 p.
2. 3D-systems previews high capacity ProX 400 direct metal 3D printer tool-free manufacturing. UPL: <https://www.3dsystems.com> (accessed: 20.06.2019).
3. Lagutkin S., Achelis L., Sheikhaliev Sh., Uhlenwinkel V., Srivastava V. Atomization process

Терновой Юрий Федорович, д.т.н., профессор кафедры металлургии, Инженерный институт Запорожского национального университета,

(061) 227-12-37, e-mail: ferrous.metals@ukr.net, 226, пр. Соборний, г. Запоріжжя, 69006, Україна.

Панова Вера Олегівна, асистент кафедри металургії, Інженерний інститут Запорізького національного університету, +38 097-526-20-33, e-mail: panova.vira@ukr.net, 226, пр. Соборний, г. Запоріжжя, 69006, Україна.

Отримання порошків з формою частинок, близькою до сферичної, розпиленням розплавів водою

Анотація. Визначення проблеми. В останній час спостерігається тенденція збільшення обсягів використання сферичних порошків. Але через високу вартість сферичних порошків, отриманих за традиційними технологіями, представляє інтерес удосконалення наявних більш економічних способів їх виробництва. **Мета.** Метою є обґрунтування формування порошків металів сферичної (або близької до неї) форми в процесі розпилення водою високого тиску з використанням закрученого струменя. **Методологія.** На підставі результатів розпилення середньовуглецевого феромарганцю з використанням модифікованої кільцевої гідравлічної форсунки, а також відомих літературних даних проаналізовано умови для сфероїдизації крапель металу під час розпилення «в смерчі». Методом математичного моделювання виведено напівемпіричне рівняння для визначення середнього медіанного розміру частинок порошку. **Результати.** На прикладі розпилення феромарганцю підтверджена можливість отримання порошків з формою частинок, близькою до сферичної, розпиленням водою. Запропонована модель розпилення. Показано, що вплив здійснюється водою, але через тонкий шар газу, без прямого контакту вода-метал. Велике значення має товщина газового прошарку. У разі оптимальних параметрів розпилення досягається збільшення часу затвердіння крапель, що сприяє отриманню частинок сферичної або близької до сферичної форми. **Наукова новизна.** Запропонована модель розпилення розплавів водою «в смерчі». Обґрунтовані умови, необхідні для формування частинок сферичної або сфероїдальної форми під час розпилення розплавів водою. Отримано інженерне рівняння для визначення медіанного розміру частинок порошку. **Практична цінність.** Описана технологія є перспективною для виробництва порошків металів з частинками сферичної або близької до неї форми. Використання отриманих порошків феромарганцю для обмазки зварювальних електродів показало перевагу перед меленими порошками: виключення стучання обмазки під час виготовлення електродів, кращу пластичну міцність обмазки та вищу ударну в'язкість зварюванню шву за негативних температур. **Ключові слова:** порошок, розпилення водою, смерч, форсунка, форма частинок, сфероїдизація, зварювальні електроди.

Терновий Юрій Федорович, д.т.н., професор кафедри металургії, Інженерний інститут Запорізького національного університету, (061) 227-12-37, e-mail:

ferrous.metals@ukr.net, 226, пр. Соборний, м. Запоріжжя, 69006, Україна.

Панова Віра Олегівна, асистент кафедри металургії, Інженерний інститут Запорізького національного університету, +38 097-526-20-33, e-mail: panova.vira@ukr.net, 226, пр. Соборний, м. Запоріжжя, 69006, Україна.

Obtaining powders with particle shape near to spherical by water atomization of melts

Abstract. Problem. Recently, there is a tendency to increase volumes of use of spherical powders. But due to high cost of spherical powders obtained by conventional technologies, improvement of current more economical methods of its production is interesting. **Goal.** The goal is to substantiate formation of metal powders of spherical shape (or near to it) at high-pressure water atomization with use of swirl jet. **Methodology.** On the basis of results of atomization of medium-carbon ferromanganese with use of modified annular hydraulic nozzle and well-known literature data, conditions for spheroidization of metal drops at atomization «in spout» are analyzed. By mathematical modelling method the semiempirical equation for definition of average median size of powder particles is deduced. **Results.** Using the example of atomization of ferromanganese, possibility of obtaining powders with particle shape near to spherical by water atomization is confirmed. The model of atomization is proposed. It is shown that impact is carried out by water, but through thin gas layer, without direct contact of water and metal. Thickness of gas layer is important. At optimal parameters of atomization solidification time of drops increases, that is favourable for obtaining particles of spherical shape or near to it. **Originality.** Model of water atomization of melts «in spout» is proposed. Conditions needed to form particles of spherical or spheroidal shape during water atomization are substantiated. Engineering equation to determine median size of powder particles is obtained. **Practical value.** Described technology is promising to produce metal powders with particles of spherical shape or near to it. Use of obtained powders of ferromanganese for coating of welding electrodes demonstrated the advantage over ground powders such as elimination of swelling coating during production of electrodes, better plastic strength of coating, and higher impact strength of welded seam at negative temperatures.

Key words: powder, water atomization, spout, nozzle, particle shape, spheroidization, welding electrode.

Ternoviy Yurii, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Metallurgy, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, (061) 227-12-37, e-mail: ferrous.metals@ukr.net, 226, Cathedral Ave, Zaporizhzhia, 69006, Ukraine.

Panova Vira, assistant of the Department of Metallurgy, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, +38 097-526-20-33, e-mail: panova.vira@ukr.net, 226, Cathedral Ave, Zaporizhzhia, 69006, Ukraine.