

ИННОВАЦИОННАЯ ГИДРОВАКУУМНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГРАНУЛЯЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Г. В. Джандиери¹, И. Ф. Горбенко³, Д. В. Сахвадзе^{2,3}, Т. И. Цирекидзе³

¹Metallurgical Engineering and Consulting LTD, Тбилиси, Грузия.

E-mail: Gigo.jandieri@yahoo.com

²ЮЛПП «Государственный научно-технический центр «Дельта», Грузия.

³G-Metall LLC, Грузия.

Рассмотрена эффективность грануляции жидких передельных ферросплавов в условиях полупромышленной апробации нового способа и установки для гидровакуумного диспергирования расплавов. Новизной представленной разработки является то, что рабочая жидкость (техническая вода высокого давления), которая течет в закрытых каналах по замкнутому контуру в торцевой головке установки в зоне сопряжения основного канала и специальной насадки, погруженной в жидкий сплав. Из-за резкого изменения формы и диаметра основного канала создается тороидальный вихрь, который на входе насадки образует разрежение, под воздействием которого осуществляется вакуумное всасывание расплава. Вертикальный поток расплава, проходя через тороидальный вихрь, подвергается растягивающим воздействиям, в результате чего он многократно расширяется и разрывается на мелкие гранулы (хлопья). Полученная дробь, смешанная с водой, уносится этой же водой к пульпоприемному отстойнику. Приведена схема и внешний вид рабочей установки, а также основные экспериментальные данные процесса в условиях грануляции высококремнистого передельного силикомарганца FeMnSi28. Представлены графические зависимости дисперсности гранул, производительности процесса и расхода циркулируемой воды от начальной температуры расплава и диаметра вакуумного канала всасывающей насадки, морфология поверхностей и структура полученных гранул (примерно 2,5 мм). Показана принципиальная возможность получения сферических мелкодисперсных (примерно 50 мкм) порошков, пригодных как для прецизионной выпечной обработки металлических расплавов, так и для аддитивного производства. Библиогр. 12, ил. 5.

Ключевые слова: жидкие ферросплавы; грануляция; гидровакуум; гидродинамическое диспергирование; гранулы; порошки

Известно, что гранулированию в основном подвергают передельные ферросплавы. Чаще всего в жидком состоянии гранулируют высококремнистый ферросиликомарганец, высокоуглеродистый феррохром и ферросиликохром. Также диспергируют некоторые марки ферроникеля и ферросилиция.

Существующая технология грануляции жидких расплавов, которая берет начало с 1930-х годов [1], предусматривает распыление жидкого сплава водяной струей с последующим охлаждением гранул в камере (бане) с проточной водой. Сплав после слива в копильник, стекая по направляющему желобу, в зоне воздействия водяных форсунок дробится до гранул 0,5...5,0 мм, которые попадают в корзину, установленную на дне бака с охлаждающей водой. После завершения процесса корзину поднимают и гранулы пересыпают в короба с отверстиями в днищах, которые поступают на склад товарной продукции или передаются в цех для дальнейшей переработки. Гранулы имеют чрезвычайно мелкозернистую структуру, где практически отсутствует ликвация. При этом жидкофазной грануляцией достигается более полное очищение сплава от частичек шлака и вредных включений карбидов SiC [2].

К существенным недостаткам ныне применяемой технологии можно отнести: низкую надежность и безопасность функционирования (строгое выполнение норм безопасности) [3]; необходимость фильтрации повторно используемой воды (без очистки от механических примесей высока вероятность засорения и интенсивного изнашивания сопел высокого давления); отсутствие возможности регулирования дисперсности гранул; поверхностное окисление гранул из-за свободного контакта капель жидкого металла с атмосферным кислородом; высокий удельный расход воды, интенсивное выделение пара и газов.

В последние годы в некоторых ферросплавных производствах часто начали внедрять технологию грануляции «GRANSHOT process» [4]. Расплавленный металл направляют из разливочного устройства на разбрызгивающую роторную головку (огнеупорный диск). Металл ударяется о диск, дробится и распределяется в радиальном направлении по находящемуся под ним резервуару с охлаждающей водой. После охлаждения гранулы подают на сушку. Размеры полученных гранул находятся в диапазоне 5...25 мм [5]. Главным достоинством этого процесса считается стабильный и высокий выход желаемой фракции, недостат-

ком — дискретность (периодичность) и связанная с ним пониженная производительность процесса. Также недостатком можно считать то, что при использовании этой технологии практически невозможно получить мелкодисперсные порошкообразные фракции разного назначения.

В отличие от существующих технологий, предложенная предусматривает грануляцию жидкого металла в закрытом высокоскоростном водяном потоке за счет растягивающих напряжений, создаваемых вакуумным всасыванием и внутренним гидродинамическим трением между водой и расплавом. В предлагаемой технологии, аналогично способу, описанному в работе [1], основой процесса является циркулирующая техническая вода, однако отличие заключается в том, что вода перемещается в закрытых каналах по замкнутому контуру, вследствие чего, проходя через участок резкого расширения канала и падения давления, создается разрежение (гидравлический вакуум), сила которого начинает воздействовать на расплав, всасывая его через специальную насадку и подавая в гидродинамическую тороидальную головку на диспергирование. Диспергированный расплав с водой образует пульпу и подается в приемный бак-отстойник. Так как к образованным в процессе гидровакуумного диспергирования металлическим гранулам ограничен доступ атмосферного (свободного) кислорода, предотвращается образование оксидов, также не происходит перегрев и испарение воды, а сама вода не нуждается в фильтрации, поскольку грануляция осуществляется без применения специальных сопел.

В основу предлагаемой технологии заложены разработки украинского исследователя Е. В. Годецкого [6]. Путем дальнейших исследований и многократного совершенствования создана принципиально новая технологическая схема и соответствующая экспериментальная установка грануляции расплавов, новизна которой защищена патентом Грузии [7]. Функциональная схема технологического процесса гидровакуумной грануля-

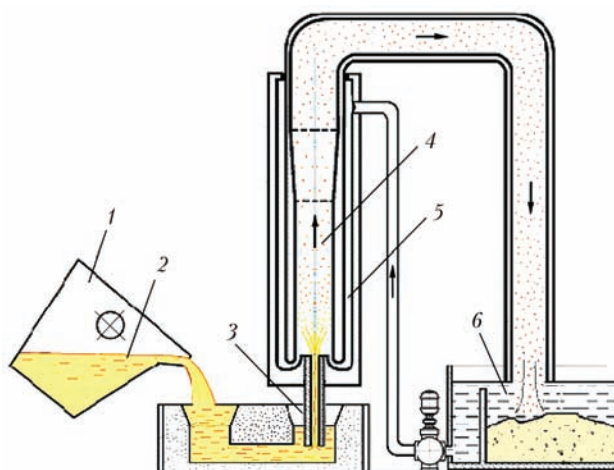


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема технологического процесса грануляции: 1 — ковш; 2 — расплав; 3 — всасывающая насадка; 4 — пульпа; 5 — вода высокого давления; 6 — накопитель порошка

ции расплавов приведена на рис. 1. На рис. 2 представлена экспериментальная полупромышленная установка для осуществления данного технологического процесса.

Экспериментальные исследования показали, что механизм предложенного способа и установки гидровакуумной грануляции жидких сплавов принципиально отличается от механизма распыления водой. При вакуумном всасывании с момента поступления жидкого сплава в приемную камеру торцевой головки она окружается спирально-структурированным турбулентным потоком воды, создаваемым тороидальным вихрем (рис. 3). Это гидродинамическое силовое воздействие формирует вертикально направленную конусную струю с тангенциальными и радиальными растягивающими напряжениями, вследствие чего струя резко расширяется и измельчается. На поверхностях раздробленного и переохлажденного металла мгновенно образуются пузырьки водяного пара, которые попутно с образованными дисперсными частицами удаляются из рабочей зоны. Пузырьки из-за быстрого конденсирования содер-

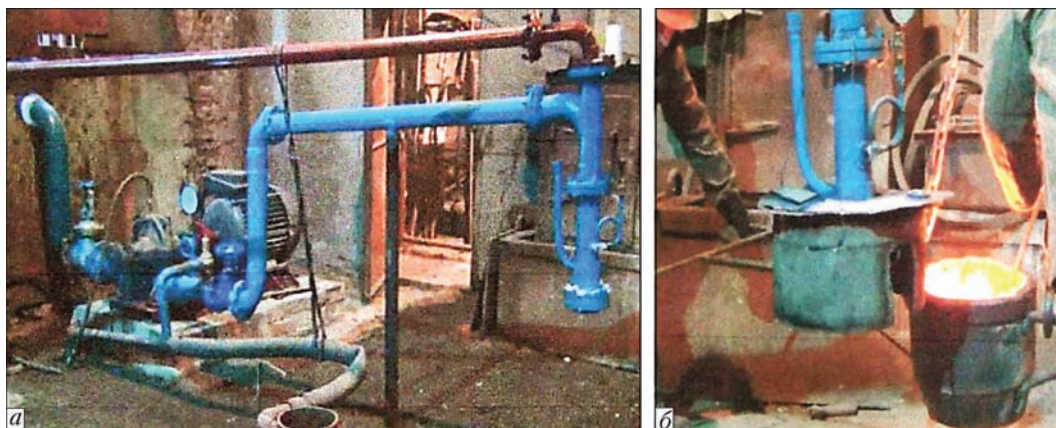


Рис. 2. Общий вид экспериментальной полупромышленной установки (а) и рабочий процесс гидровакуумной грануляции(б)

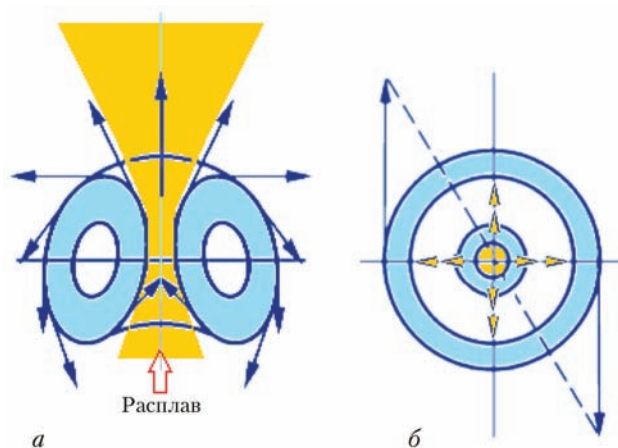


Рис. 3. Гидродинамическая структура образованного торoidalного вихря: *a, б* — продольный и поперечный разрез соответственно

жащегося в них водяного пара и резкого падения внутреннего давления захлопываются (смыкаются) и образуют гидравлические микроудары, что, в свою очередь, обуславливает вторичное разрушение поверхностно затвердевших металлических частиц. В итоге на выходе получаем механически упрочненные (механоактивированные) закаленные гранулы со сложной формой и с повышенной удельной поверхностью.

Исследования проводили в экспериментальном участке литейного цеха ООО «Грузинская сталь» (Русставский металлургический комбинат). В качестве гранулируемого сплава применяли жидкий передельный силикомарганец марки FeMnSi28 (25...30 % Si, 60...65 % Mn, 0,5 % C, 0,03 % P). В гидравлической системе давление воды составляло в среднем 120 МПа, а величина вакуума у входа всасывающей насадки патрубка в среднем достигала 9 МПа. Основные результаты проведенных экспериментальных работ приведены на рис. 4 (диаграммы графических зависимостей дисперсности (*D*), производительности (*Q*) и расхода воды (*V*) от температуры и внутреннего диаметра насадки (*d*)). Из отмеченных графических

зависимостей видно, что основные технико-технологические показатели процесса грануляции — производительность, дисперсность гранул и условный расход циркулируемой технической воды можно регулировать, меняя температуру жидкого ферросплава и рабочий диаметр вакуумной насадки (рис. 4, *a*). В частности, при всасывании передельного силикомарганца 25-миллиметровой насадкой, повышением температуры на 100 °С (от 1200 до 1300 °С), из-за существенного повышения жидкотекучести сплава, производительность процесса грануляции растет от 6 до 30 т/ч, фракционность гранул уменьшается от 2 до 0,9 мм, а условный расход циркулируемой воды растет от 200 до 350 м³/ч. В свою очередь, при установленной рациональной температуре сплава 1260 °С уменьшение диаметра всасывающего канала от 25 до 5 мм обуславливает снижение дисперсности гранул до 50 мкм и ниже (рис. 4, *б*). Можно сказать, что в данном случае на выходе получен мелкодисперсный порошок, пригодный как для прокатки, так и производства порошковой проволоки для прецизионной внепечной обработки жидкого чугуна и стали. Морфология и микроструктура полученных гранул приведены на рис. 5. С точки зрения сохранения высокой производительности процесса при получении гранул мелких фракций (≤ 50 мкм), как это видно из диаграмм, гранулирование целесообразно осуществлять при высоких перегревах расплава.

Аналогичные работы по исследованию эффективности процесса гидровакуумной грануляции уже были проведены авторами статьи для расплавов алюминия, бронзы, серого чугуна и конструкционной стали. Изложенное выше инновационное решение задачи грануляции металлических сплавов хорошо себя зарекомендовало по всем направлениям. Основные результаты отмеченных работ приведены в публикациях [8–10].

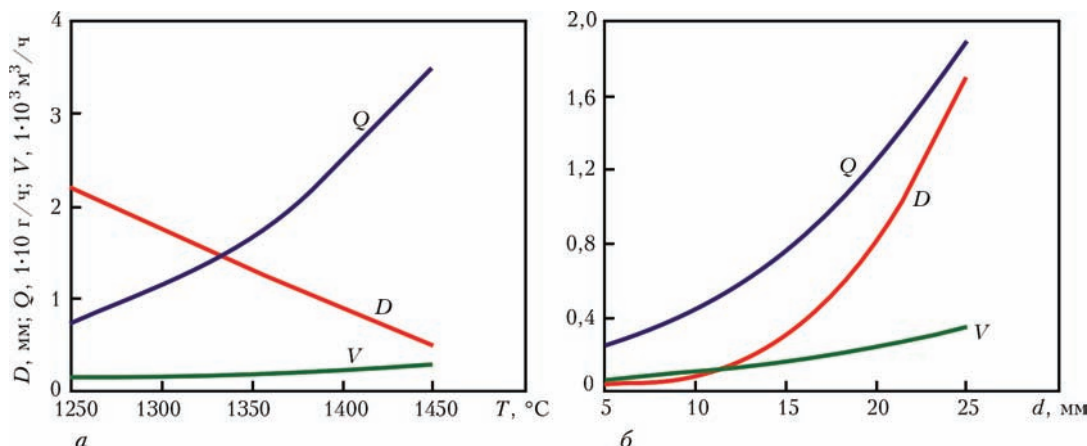


Рис. 4. Влияние температуры жидкого сплава (*a*) и диаметра всасывающей насадки (*б*) на основные технические характеристики процесса грануляции передельного силикомарганца FeMnSi28 (обозначения см. в тексте)

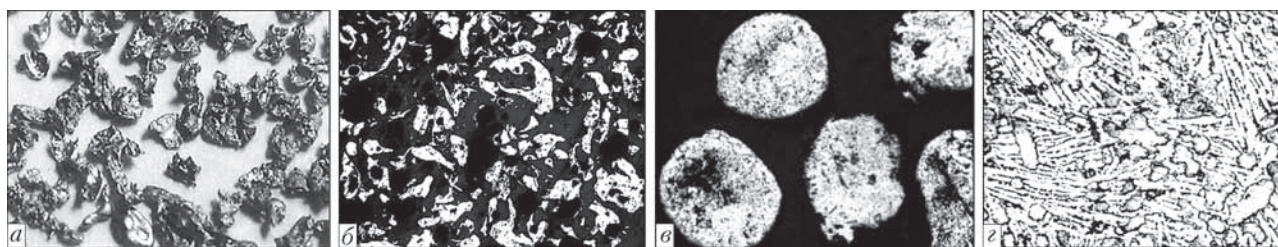


Рис. 5. Морфология поверхности и структура гранул передельного силикомарганца: а — гранулы размерами 0,5...2,5 мм; б — гранулы в шлифе; в — гранулы 50 мкм; г — структура гранул ($\times 10^3$)

Системный анализ функциональных особенностей и технологических возможностей представленной технологии показывает, что гидровакуумную технологию грануляции жидких металлических сплавов также успешно можно применять для грануляции высокожаропрочных никелевых сплавов нового поколения [11], что особенно важно с точки зрения получения быстрозакаленных гранул для их последующей консолидации (горячим прессованием) с достижением плотной, беспористой структуры изделий, работающих в критических условиях. Также перспективной является возможность получения металлических сферических микропорошков [12], пригодных для аддитивного производства — 3D печати металлических изделий.

В заключение можно отметить, что данная технология имеет следующие технические преимущества:

высокую надежность и безопасность функционирования в непрерывном режиме работы;

небольшие размеры и малую стоимость оборудования;

возможность монтажа оборудования в функционирующих цехах без простоя и существенной реконструкции;

возможность регулирования технологических режимов дисперсности, производительности и управления процессом в широком диапазоне;

исключение необходимости восстановительно-го обжига порошков;

высокую экологичность (в рабочую зону и окружающую среду не производится выброс пара, пыли и газов);

высокую производственную эргономичность, низкий уровень шума.

Список литературы

1. Ervin J.F. (1939) *Method of disintegrating metal into shottling*. US, Pat. 2159433. <https://patents.google.com/patent/US2159433>
2. (2000) *Энциклопедический словарь по металлургии*. Н. П. Лякишев (ред.). Москва, Интернет Инжиниринг. <https://metallurgicheskii.academic.ru/2421>
3. (2017) *НПА ОП 27.35-1.01-09*: Правила охраны труда в ферросплавном производстве. Глава 11, Грануляция ферросплавов. <http://ohranatruda.in.ua/pages/481/>

4. Vesterberg P., Beskow K., C.-J. Rick (2013) Granulation of ferroalloys — results from industrial operations and comparative study on fines generation. *Infacon XIII. Proceedings of the Thirteenth International Ferroalloys Congress. Almaty, Kazakhstan*, pp. 140–141.
5. Uvan Holding AB. (2015) *Granulation of molten material*. Pat. WO 2015/034425 A1, B22F 9/10, B22F 9/08.
6. Годецкий Е. В. (1974) *Способ скачивания шлака*, А. с. СССР 433214, C21C 5/52.
7. Sakhvadze D., Jandieri G., Tsirekidze T., Gorbenco I. (2015) *Device for producing metallic powder from melt*. Pat. GE P20156384 (B), B22F9/08.
8. Sakhvadze D., Jandieri G., Gorbenco I. et al. (2015) Device of molten granulation for obtaining the powder materials for SHS. *XIII International Symposium on SHS, Antalya, Turkey*, pp. 140–141.
9. Sakhvadze D., Gorbenco I., Jandieri G., Tsirekidze T. (2015) Obtaining metal powders in hydrovacuum melt suction plant. *Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в металлургии и материаловедении»*, Грузия, Тбилиси, сс. 38–44.
10. Sakhvadze D., Jandieri G., Bolqvadze A. et al. (2017) Morphological and metallographic analysis of metallic powders produced by the method of hydro-vacuum dispersion of melts. *XIV International Symposium on SHS, Tbilisi, Georgia*. pp. 218–221.
11. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Бакрадзе М. М., Востриков А. В., Волков А. М., Иноземцев А. А., Гришечкин А. И., Перевозов А. С. (2017) *Гранулируемый высокожаропрочный никелевый сплав и изделие, изготовленное из него*, Россия, Пат. 2623540C1, №217.015.D91F.
12. (2017) *Микропорошки для АМ-технологий*. (SRI TP) Научно-исследовательский институт технологического прогресса. <http://progress.institute/am-texnologij/>

References

1. Ervin, J.F. (1939) *Method of disintegrating metal into shottling*. Pat. 2159433, US <https://patents.google.com/patent/US2159433>.
2. (2000) *Encyclopaedia on metallurgy*. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Internet Engineering. <https://metallurgicheskii.academic.ru/2421> [in Russian].
3. (2017) *НПА ОП 27.35-1.01-09*: Regulations of occupational safety in ferroalloy production. Pt 11: Granulation of ferroalloys. <http://ohranatruda.in.ua/pages/481/> [in Russian].
4. Vesterberg, P., Beskow, K., Rick, C.-J. (2013) Granulation of ferroalloys — results from industrial operations and comparative study on fines generation. In: *Proc. of the 13th Int. Ferroalloys Congress Infacon XIII* (Almaty, Kazakhstan) 140–141.
5. Uvan Holding AB (2015) *Granulation of molten material*. Pat. WO 2015/034425 A1, Int. Cl. B22F 9/10, B22F 9/08.
6. Godetsky, E.V. (1974) *Method of slag removal*. USSR author's cert. 433214, C21C 5/52 [in Russian].

7. Sakhvadze, D., Jandieri, G., Tsirekidze, T., Gorbenko, I. (2015) *Device for producing metallic powder from melt*. Pat. GE P20156384 (B), Int. Cl. B22F9/08.
8. Sakhvadze, D., Jandieri, G., Gorbenko, I. et al. (2015) Device of molten granulation for obtaining the powder materials for SHS. In: *Proc. of 13th Int. Symp. on SHS* (Antalya, Turkey), 140–141.
9. Sakhvadze, D., Gorbenko, I., Jandieri, G., Tsirekidze, T. (2015) Obtaining metal powders in hydrovacuum melt suction plant. In: *Proc. of Int. Sci.-Techn. Conf. on Innovative Technologies in Metallurgy and Materials Science* (Georgia, Tbilisi), 38–44.
10. Sakhvadze, D., Jandieri, G., Bolqvadze, A. et al. (2017) Morphological and metallographic analysis of metallic powders produced by the method of hydro-vacuum dispersion of melts. In: *Proc. of 14th Int. Symp. on SHS* (Tbilisi, Georgia), 218–221.
11. Kablov, E.N., Ospennikova, O.G., Bakradze, M.M., Vostrikov, A.V. et al. (2017) *Granulated super high-temperature nickel alloy and product manufactured from it*. Pat. 2623540C1, Russia, 217.015.D91F [in Russian].
12. (2017) *Micropowders for AM-technologies*. SRI TP. <http://progress.institute/am-technologij/> [in Russian].

ІНОВАЦІЙНА ГІДРОВАКУУМНА ТЕХНОЛОГІЯ ГРАНУЛЯЦІЇ МЕТАЛІЧНИХ РОЗПЛАВІВ

Г. В. Джандієрі¹, І. Ф. Горбенко³, Д. В. Сахвадзе^{2,3}, Т. І. Цирекідзе³

¹Metallurgical Engineering and Consulting LTD, Тбілісі, Грузія.

E-mail: Gigo.jandieri@yahoo.com

²ЮЛПП «Державний науково-технічний центр «Дельта», Грузія.

³G-Metall LLC, Грузія.

Розглянуто ефективність грануляції рідких передільних феросплавів в умовах напівпромислової апробації нового способу і установки для гідровакуумного диспергування розплавів. Новизною представленої розробки є те, що робоча рідина (технічна вода високого тиску), яка тече в закритих каналах по замкнутому контуру в торцевій голівці установки в зоні сполучення основного каналу і спеціальної насадки, зануреної в рідкий метал. Через різку зміну форми і діаметра основного каналу створюється тороїдний вихор, який на вході насадки утворює розрідження, впливом якого здійснюється вакуумне всмоктування розплаву. Вертикальний потік розплаву, проходячи через тороїдний вихор, піддається розтяжному впливу, в результаті чого він багаторазово розширюється і розривається на дрібні гранули (пластівці). Отримана дріб, змішана з водою, яка несеться цією ж водою до пульпоприймального відстійника. Наведено схему і зовнішній вигляд робочої установки, а також основні експериментальні дані процесу в умовах грануляції висококремністого передільного силікомарганцю FeMnSi28. Представлені графічні залежності дисперсності гранул, продуктивності процесу і витрати циркулюючої води від початкової температури розплаву і діаметра вакуумного каналу всмоктуючої насадки, морфологія поверхонь і структура отриманих гранул (приблизно 2,5 мм). Показано принципову можливість отримання сферичних дрібнодисперсних (приблизно 50 мкм) порошоків, придатних як для прецизійної позапічної обробки металевих розплавів, так і для адитивного виробництва. Бібліогр. 12, іл. 5.

Ключові слова: рідкі феросплави; грануляція; гідровакуум; гідродинамічне диспергування; гранули; порошки

INNOVATIVE HYDROVACUUM TECHNOLOGY OF GRANULATION OF METAL MELTS

G. V. Janndieri¹, I. F. Gorbenko³, D. V. Sakhvadze^{2,3}, T. I. Tsirekidze³

¹Metallurgical Engineering and Consulting LTD, Tbilisi, Georgia.

E-mail: Gigo.jandieri@yahoo.com

²State Scientific-Technical Center: «Delta» Georgia.

³G-Metall LLC, Georgia.

The efficiency of granulation of molten processed ferroalloys under conditions of semi-industrial testing of new method and equipment for hydrovacuum dispersion of melts was considered. The novelty of the presented development is the fact that the working fluid (high-pressure technical water) is running in closed channels around the closed contour in end head of the installation in the zone of mating the main channel and a special tip, immersed into a molten alloy. Due to a sharp change in shape and diameter of the main channel a toroidal vortex is created which forms rarefaction at the tip outlet, thus suctioning the melt by vacuum. The vertical melt flow is subjected during passing through the toroidal vortex to tensile effects, as a result of which it is widened many times and separated into fine granules (flakes). The produced shots, mixed with water, are removed by the same water to the pulp sewage tank Presented are the scheme and appearance of the working installation, as well as main experimental data of the process under the conditions of granulation of high-silicon processed silicomanganese FeMnSi28. The graphical dependence of granules dispersion, process efficiency and consumption of circulating water on initial temperature of melt and diameter of vacuum channel of a suction tip, morphology of surfaces and structure of produced granules (approximately 2.5 mm) are given. A principal feasibility of producing spherical fine-dispersed (approximately 50 μm) powders suitable both for the precision ladle treatment of metal melts, and for the additive production is shown. Ref. 12, Fig. 5.

Key words: molten ferroalloys; granules; hydrovacuum; hydrodynamic dispersion; granules; powders

Поступила 06.06.2018