

УДК 621.762.22

DOI 10.17073/1997-308X-2015-1-3-7

Влияние режимных параметров и конструкции эжекционной форсунки на характеристики высокодисперсного порошка алюминия

Часть 2. Влияние конструкции форсунки*

© 2015 г. **В.А. Архипов, М.Я. Евсевлев, И.К. Жарова, А.С. Жуков, С.В. Змановский, Е.А. Козлов, А.И. Коноваленко**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета (НИИ ПММ ТГУ), г. Томск

Филиал «Центр инноваций» ООО «СУАЛ-ПМ», г. Шелехов

Статья поступила в редакцию 01.04.14 г., доработана 25.06.14 г., подписана в печать 30.06.14 г.

Архипов В.А. — докт. физ.-мат. наук, проф., зав. отделом газовой динамики и физики взрыва НИИ ПММ ТГУ (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, стр. 27). Тел.: (3822) 52-96-56. E-mail: zharova@niipmm.tsu.ru.

Евсевлев М.Я. — вед. инженер филиала «Центр инноваций» ООО «СУАЛ-ПМ» (666034, Иркутская обл., г. Шелехов, л. Южная, 2). Тел.: (39550) 94-514. E-mail: Maksim.Evsevlev@rusal.com.

Жарова И.К. — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. того же отдела НИИ ПММ ТГУ. Тел.: (3822) 52-95-22. E-mail: zharova@niipmm.tsu.ru.

Жуков А.С. — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ. Тел.: (3822) 52-96-56. E-mail: zhuk_77@mail.ru.

Змановский С.В. — директор филиала «Центр инноваций» ООО «СУАЛ-ПМ». Тел.: (39550) 94-514. E-mail: Sergey.Zmanovskiy@rusal.com.

Козлов Е.А. — докт. техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, гл. науч. сотр. того же отдела НИИ ПММ ТГУ. Тел.: (3822) 52-95-22. E-mail: zharova@niipmm.tsu.ru.

Коноваленко А.И. — канд. физ.-мат. наук, вед. инженер того же отдела НИИ ПММ ТГУ. Тел.: (3822) 52-95-22. E-mail: zharova@niipmm.tsu.ru.

Проведен анализ влияния конструкции эжекционной форсунки на характеристики высокодисперсного порошка алюминия в условиях производства на предприятии ООО «СУАЛ-ПМ». Измерения дисперсных показателей пульверизата при распыливании расплава алюминия эжекционной форсункой выполнены для 6 вариантов модифицированных форсунок. Представлены результаты определения медианного диаметра частиц (d_m) и содержания высокодисперсной фракции (z) (с диаметром частиц не более 10 мкм) в пульверизате. Показано, что наиболее эффективным способом модификации узла распыла являются профилирование конусной части защитной втулки и наложение ультразвуковых колебаний на корпус форсунки (снижение d_m на ~31,6 % и увеличение z на ~8,5 %).

Ключевые слова: эжекционная форсунка, расплав алюминия, распыливающий газ, факел распыла, пульверизат, высокодисперсная фракция порошка, медианный диаметр частиц, модификации конструкции форсунки.

The influence of the design of an ejection nozzle on characteristics of highly dispersed aluminum powder in industrial conditions at the LLC «SUAL-PM» enterprise is performed. Measurements of dispersed characteristics of the spray product when spraying the aluminum melt by the ejection nozzle are performed for six variants of modified nozzles. The results of determining the median diameter of particles (d_m) and content of a highly dispersed phase (z) (with the particle diameter no larger than 10 μ m) in the spray product are presented. It is shown that the most efficient method of modifying the spray nozzle is profiling the cone part of a protective bush and imposition of ultrasonic vibrations on a nozzle case (a decrease in d_m by ~31,6 % and an increase in z by ~8,5 %).

Keywords: ejection nozzle, aluminum melt, spraying jet, spray torch, highly dispersed powder fraction, median particle diameter, modifications of the nozzle design.

Введение

Диспергирование расплавов газовыми струями является наиболее распространенным способом промышленного производства металлических

порошков [1—9]. Для существующей технологии получения порошков алюминия промышленных марок АСД (газодинамическое распыливание струи расплава эжекционной форсункой) содержание высокодисперсной фракции порошка с

* Часть 1 см. в № 4, 2014 г.

диаметром частиц не более 10 мкм составляет ~18 % [10].

Усовершенствование технологии распыливания расплава алюминия сжатым газом с целью повышения ее эффективности (увеличение выхода высокодисперсной фракции и улучшение однородности дисперсного состава порошка) стало актуальной задачей порошковой металлургии [11]. Эффективность эжекционной форсунки для распыливания расплава оценивается максимальным выходом высокодисперсной (с диаметром частиц менее 10 мкм) фракции частиц алюминия, а именно ее содержанием в факеле распыла форсунки [12]. Важная характеристика дисперсной фракции — это медианный диаметр частиц (d_m), примечательный тем, что массовая доля частиц меньшего диаметра ($d \leq d_m$) составляет 50 % от массы переработанного металла [12].

Повышение эффективности технологии возможно путем оптимизации режимных параметров процесса распыливания (температура, расход и давление подачи расплава алюминия и распыливающего газа) [10], а также модификацией конструкции эжекционной форсунки [13–16].

Целью настоящей работы являлось совершенствование существующей технологии диспергирования расплава алюминия в условиях реального

производства на предприятии ООО «СУАЛ-ПМ» за счет внесения изменений в конструкцию форсуночного блока.

Анализ влияния конструкции эжекционной форсунки на дисперсность частиц пульверизата

В испытаниях на промышленной установке определяли дисперсный состав частиц в факеле распыла (пульверизата) и среднюю производительность установки. Эффективность работы эжекционной форсунки при распыливания расплава алюминия оценивали по результатам дисперсного анализа отобранных проб пульверизата, проводимого с использованием прибора «Analysette 22» фирмы FRITSCH (Германия).

При сравнительном анализе эффективность модифицированных форсунок оценивалась по отношению к характеристикам базовой форсунки Φ_0 (рис. 1), работающей при номинальных значениях режимных параметров:

Расход азота, м ³ /с.....	0,17
Температура азота, К.....	873
Температура расплава, К.....	1253
Средняя производительность пульверизационной установки, кг/ч.....	180

Основные геометрические характеристики базовой форсунки:

Диаметр отверстий в ниппеле, мм:	
в минимальном сечении	4–7
в выходном сечении.....	10–14
Кольцевой зазор между ниппелем и крышкой, мм	0,5–0,8
Диаметр выходного отверстия в крышке, мм.....	17–19
Выступающая часть носика ниппеля над крышкой, мм	0,5–1,0
Угол конуса крышки, град	90
Угол внешнего конуса чехла ниппеля, град.....	46–52

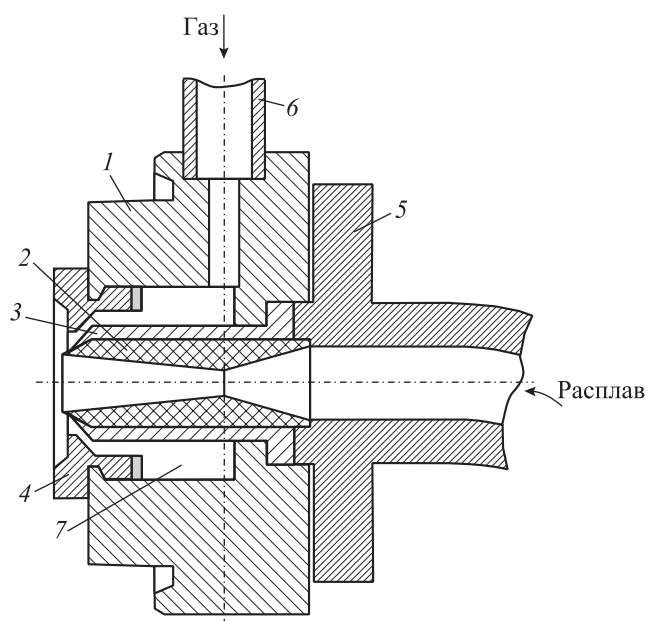


Рис. 1. Схема базовой эжекционной форсунки Φ_0
1 — корпус; 2 — ниппель; 3 — защитная втулка; 4 — крышка;
5 — металлопровод; 6 — патрубок; 7 — кольцевая полость

При модификации конструкции эжекционной форсунки использовались результаты моделирования процесса диспергирования жидкости газовым потоком в условиях холодных продувок на пневмогидравлическом стенде [11]. Были ис-

следованы следующие модифицированные форсунки:

- Φ_1 — форсунка с закруткой газового потока (тангенциальная подача распыливающего газа);
- Φ_2 — форсунка с рассекателем в форме центрального тела;
- Φ_3 — форсунка с ниппелем, имеющим угловые точки в минимальном сечении (квадрат $3,5 \times 3,5$ мм);
- Φ_4 — форсунка с дополнительным вводом газа в канал подачи расплава;
- Φ_5 — форсунка с применением ультразвукового аппарата;
- Φ_6 — форсунка с вырезами в конусной части втулки.

Влияние закрутки потока распыливающего газа на дисперсность частиц пульверизата определялось по результатам испытаний форсунки Φ_1 , конструкция которой аналогична базовой (за исключением корпуса). Конструкция корпуса изменена с целью обеспечения тангенциальной подачи газа через входной патрубок. Тангенциальная компонента скорости газа при вводе в кольцевую полость форсунки составляла 300–350 м/с, что представляет ~30 % от осевой компоненты скорости газа на выходе из форсунки.

Форсунка Φ_2 соответствует базовой, на выходе которой установлен каплевидный рассекатель на 4 пилонх сечением 2×4 мм. Расстояние от рассекателя с максимальным диаметром 10 мм до выходного сечения ниппеля форсунки составляло 17 мм. На пульверизационной установке форсунка Φ_2 проработала ~30 с, после чего произошла остановка из-за прекращения подачи расплава. Его причиной (по результатам визуального осмотра) было уменьшение разрежения вследствие зашлаковывания центрального тела рассекателя (рис. 2). Таким образом, конструкция форсуночного узла с установкой дополнительных деталей (в данном случае — рассекателя) не обеспечивает работоспособности пульверизационной установки.

В форсунке Φ_3 , идентичной базовой, минимальное сечение керамического ниппеля выполнено с угловыми точками (в виде квадрата с площадью сечения, соответствующей площади круглого сечения базовой форсунки диаметром 3,95 мм).

В форсунке Φ_4 дополнительный ввод газа в канал подачи расплава осуществлялся из кольце-

вой полости форсунки через два отверстия диаметром 1,5 мм с углом наклона к оси симметрии форсунки 35° (рис. 3). При испытании форсунки Φ_4 дополнительный ввод газа привел к снижению уровня разрежения в канале подачи расплава, вследствие чего прекратилась подача расплава алюминия в форсунку. Низкий уровень разрежения был получен и при испытаниях в условиях холодных продувок форсунки Φ_4 на стенде ООО «СУАЛ-ПМ».

Влияние ультразвуковых колебаний на дисперсность пульверизата изучалось на базовой форсунке Φ_0 с использованием ультразвукового аппарата УЗТА-1/22-О для двух схем закрепления излучателя — на трубе подачи азота для форсунки Φ_5 (1) и непосредственно на корпусе для форсунки Φ_5 (2). Частота ультразвуковых колебаний составляла 18 ± 2 кГц.

Форсунка Φ_6 была идентична базовой Φ_0 за исключением конструкции защитной втулки, на выходной кромке конусной части которой выполнены два симметрично расположенных полукруглых выреза радиусом 0,6 мм (рис. 4).



Рис. 2. Форсунка Φ_2 после испытаний на пульверизационной установке

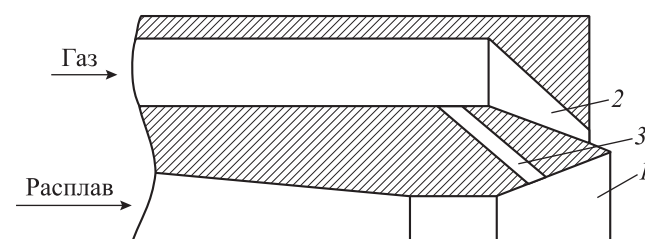


Рис. 3. Схема форсунки Φ_4 с дополнительным вводом газа в канал подачи расплава

1 — канал подачи расплава; 2 — канал подачи газа; 3 — дополнительные отверстия для подачи газа

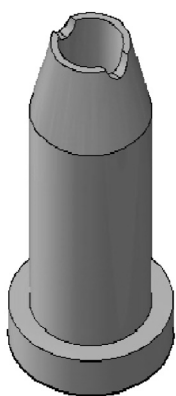


Рис. 4. Защитная втулка форсунки Φ_6

Влияние конструктивных параметров форсунок на дисперсные характеристики пульверизата

Форсунка	Медианный диаметр		Выход высокодисперсного пульверизата	
	d_m , мкм	Эффективность, %	z , мас. %	Эффективность, мас. %
Φ_0	24,2	—	18,1	—
Φ_1	19,3	20,2	18,6	0,5
Φ_3	23,3	3,7	18,5	0,4
Φ_5 (1)	—	—	20,09	1,99
Φ_5 (2)	16,5	31,8	26,2	8,1
Φ_6	16,6	31,4	26,6	8,5

Сравнительные данные результатов испытаний модифицированных форсунок по исследованию влияния их конструктивных параметров на дисперсные характеристики пульверизата приведены в таблице и на рис. 5.

Анализ полученных данных показал, что для форсунки Φ_1 достигнуто существенное снижение медианного диаметра частиц пульверизата на 20,2 % (от 24,2 до 19,3 мкм) при незначительном (на 0,5 %) повышении выхода высокодисперсной фракции порошка алюминия.

При использовании форсунки Φ_3 уменьшение величины d_m составило 3,7 % (от 24,2 до 23,3 мкм) при незначительном (на 0,4 %) росте содержания высокодисперсной фракции порошка. При испытаниях на пульверизационной установке форсунка Φ_3 отработала 4 ч, после чего произошло ее зашлаковывание. Аналогичная ситуация наблюдалась и для базовой форсунки Φ_0 , что связано, по-видимому, с попаданием в канал подачи расплава посторонних примесей.

Применение ультразвукового аппарата обеспечивает повышение эффективности получения высокодисперсного порошка алюминия при закреплении колебательной системы аппарата непосредственно на корпусе форсунки Φ_5 (2). При этом воздействие механических колебаний ультразвуковой частоты приводит к существенному снижению медианного диаметра частиц пульверизата на 31,8 % (от 24,2 до 16,5 мкм) и увеличению выхода высокодисперсной фракции на 8,1 %.

Форсунка Φ_6 способствует значительному уменьшению диаметра d_m на 31,4 % (от 24,2 до 16,6 мкм) и росту z на 8,5 %.

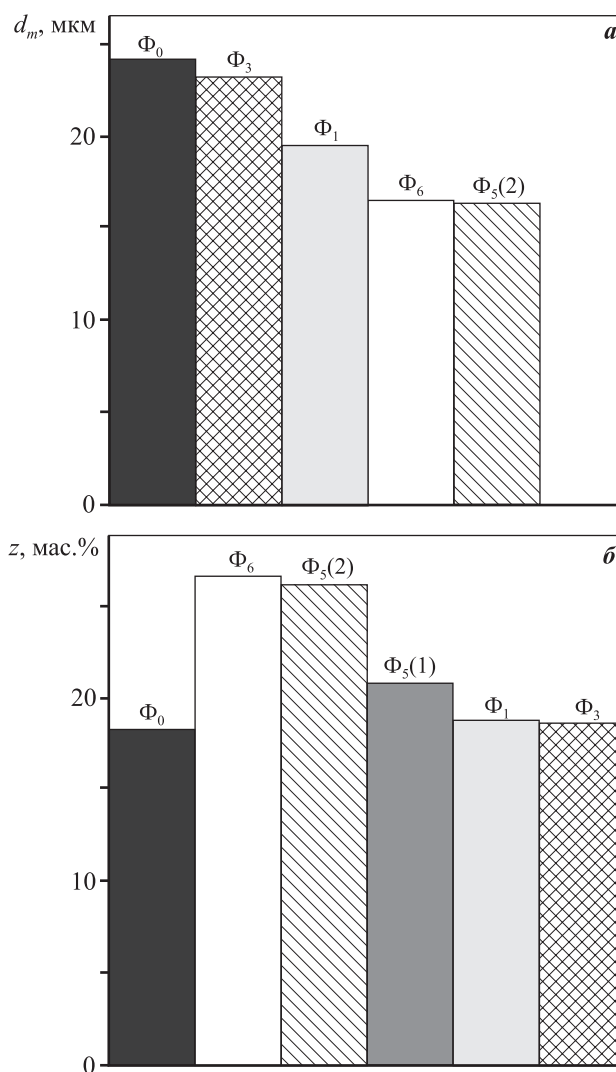


Рис. 5. Влияние конструктивных параметров на дисперсные характеристики пульверизата – медианный диаметр (а) и выход высокодисперсной (с диаметром частиц <10 мкм) фракции порошка алюминия (б)

Средняя производительность установки при испытаниях рассмотренных модификаций эжекционной форсунки соответствовала номинальному значению (см. выше).

Выводы

Результаты исследования влияния конструкции эжекционной форсунки на характеристики высокодисперсного порошка алюминия позволяют сделать следующие выводы.

1. Проведены измерения дисперсных характеристик пульверизата при распыливании расплава алюминия эжекционной форсункой в условиях промышленного производства высокодисперсного металлического порошка на предприятии ООО «СУАЛ-ПМ» при варьировании конструктивных параметров форсуночного узла.

2. Исследованы различные модификации эжекционной форсунки — с закрученным вводом распыливающего газа; с установкой расщепителя струи за форсункой; с профилем ниппеля, имеющим угловые точки в минимальном сечении; с дополнительным вводом газа в канал подачи расплава; при наложении ультразвуковых колебаний на элементы форсуночного узла; форсунка с вырезами в конусной части защитной втулки. Указанные модификации не нарушали регламент существующей технологии и не требовали принципиальных изменений технологического оборудования предприятия.

3. При использовании для распыливания расплава модифицированных конструкций форсунки получено уменьшение значения медианного диаметра частиц пульверизата на 3,7—31,8 % и повышение содержания высокодисперсной фракции в пульверизате на 0,4—8,5 %.

4. Показано, что установка конструктивных элементов (в частности, расщепителя) в области факела распыла и дополнительный ввод газа в канал подачи расплава приводят к снижению разрежения в зоне распыливания и, как следствие, к прекращению подачи расплава металла в форсунку.

5. Установлено, что наиболее эффективным способом модификации узла распыла являются профилирование конусной части защитной втулки [17] и наложение ультразвуковых колебаний на корпус форсунки (достигаются снижение d_m на

~31,6 % и увеличение выхода высокодисперсной фракции на ~8,5 %).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1567).

Литература

1. Силаев А.Д., Фишман Б.Д. Диспергирование жидких металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1983.
2. Сизов А.М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми газовыми струями. М.: Metallurgy, 1991.
3. Teipel U. Energetic materials. particle processing and characterization. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2005.
4. Schwartz M. New materials, processes and methods technology. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor and Francis, 2005.
5. Gash A.E., Simpson R.L., Satcher J.H. // Defense Appl. of Nanomat. / ACS Symp. Ser. 2005. Vol. 891. P. 198.
6. Rao C.N.R., Myller A., Cheetham A.K. Nanomaterials chemistry: Recent developments and new directions. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2007.
7. Cheng Zhi-Peng, Yang Yi., Li Feng-Sheng, Pan Zhen-Hua // Trans. Nonfer. Metals Soc. China. 2008. Vol. 18. P. 378.
8. Xiao Y., Qi L., Zeng X. et al. // J. Mech. Eng. 2011. Vol. 47, № 15. P. 156.
9. Андрушкин А.Ю. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2012. № 2. С. 17.
10. Архипов В.А., Евсеев М.Я., Жарова И.К. и др. // Там же. 2014. № 4. С. 8.
11. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Евсеев М.Я. и др. // Инж.-физ. журн. 2013. Т. 86, № 6. С. 1229.
12. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1971.
13. Pat. 4178335 A (US). Method of production solid particles of metal / R.A. Metcatte, R.G. Bourdeau. 1979.
14. Pat. 4374074 A (US). Process for producing fibers with a specially fixed size of melts / Setsuo Veda, Tafashi Yasuda, Tokuyoshi Yamada, Shigeki Kobayashi. 1983.
15. Pat. 5302182 A (US). Method of preparing particles with a controlled narrow distribution / B.V. Farmakovsky, I.V. Gorynin, K.V. Kalogina et al. 1994.
16. Pat. 5917113A (US). Process for producing spherical metal particles / Gozo Suzuki. 1999.
17. Заявка № 2013132256 на патент РФ. Эжекционная форсунка для распыливания расплавов / С.В. Змановский, А.С. Патрушев, М.Я. Евсеев и др. Приоритет от 11.07.2013.