

с однородной (без крупных пор) макроструктурой. Вероятность наличия крупных пор в таких прессовках должна учитываться в технологии дальнейшего изготовления изделий и компенсироваться, например, использованием дополнительного обжата в гидростате и/или спекания под давлением (спекание в компрессионной печи или дополнительное обжатие спеченных заготовок в газостате).

Литература

1. Чапорова И. Н., Чернявский К. С. Структура спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1975. С. 90.
2. Ртутная порометрия: Метод. указ. к лаб. раб. Л.: Технол. ин-т им. Ленсовета (каф. химии и технологии сорбентов), 1985.
3. Злобин Г. П. Формование изделий из порошков твердых сплавов. М.: Металлургия, 1980. С. 24.
4. Григорьев Г. П., Ляндзберг Г. Я., Сирота А. Г. Полимерные материалы. М.: Высш. шк., 1968. С. 14.
5. Третьяков В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976. С. 327, 344.
6. Сердюченко К. Ю. Формирование свойств и структуры твердых сплавов с различными пластификаторами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2006.
7. Клячко Л. И., Кудря Н. А., Зотова Г. М. и др. // Сб. науч. тр. ВНИИТС № 22. М.: Металлургия, 1981. С. 114.

УДК 621.762.22

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

Часть 1. Влияние режимных параметров форсунки

© 2014 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», г. Шелехов

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

В. А. Архипов – 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@hiipmm.tsu.ru.

М. Я. Евсевлев – вед. инженер филиала «Центр инноваций» ООО «СУАЛ-ПМ» (666034, Иркутская обл., г. Шелехов, ул. Южная, 2). E-mail: Maksim.Evsevliev@rusal.com.

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

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

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

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

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

Представлены результаты анализа влияния режимных параметров 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 проведены при варьировании расхода и температуры распыливающего газа соответственно в диапазонах 0,17–0,21 м³/с и 873–933 К, а также температуры расплава в пределах 1153–1253 К. Приведены результаты определения медианного диаметра частиц (d_m) и содержания высокодисперсной фракции (z) (с диаметром частиц не более 10 мкм) в пульверизате. Показано, что при модификации режимных параметров форсунки значение d_m уменьшается на 3,7–12,4 %, а величина z повышается на 0,4–3,2 %. Установлено, что наиболее эффективно сказывается на свойствах порошка повышение температуры распыливающего газа.

Ключевые слова: эжекционная форсунка, расплав алюминия, распыливающий газ, факел распыла, пульверизат, высокодисперсная фракция порошка, медианный диаметр частиц, режимные параметры, расход газа, температура газа, температура расплава.

There were presented results of analysis regard to influence of duty parameters of ejection nozzle on characteristics of highly dispersed powder of aluminum under the conditions of production of enterprise LLC «SUAL-PM». There were conducted measurements of dispersed indices of spray product under condition of aluminum melt spraying by ejection nozzle at various flow rate and temperature of atomizing gas, consequently, at the range of 0,17–0,21 m³/s and 873–933 K, as well as temperature of melt in the range of 1153–1253 K. There were presented results of medium particle diameter determination (d_m) and content of highly dispersed fraction (z) (with particles diameter $\leq 10 \mu\text{m}$) in spray product. There was showed that under modification of duty parameters of nozzle value of d_m is decreasing by 3,7–12,4 %, and value of z is increasing by 0,4–3,2 %. There was established that most effective factor influencing on powder properties, is increasing of temperature of atomizing gas.

Key words: ejection nozzle, aluminum melt, atomizing gas, spray jet, spray product, highly dispersed fraction of powder, median particle diameter, duty parameters, gas flow rate, temperature of gas, melt temperature.

Введение

В ряде отраслей промышленности и в современных технологиях все более широкое применение находят высокодисперсные порошки алюминия, в частности, в качестве горючего компонента высокоэнергетических материалов [1–3]. В настоящее время известно большое количество способов получения высокодисперсных порошков металлов, основанных на разных физических принципах [4–10]. Наиболее распространенным промышленным методом среди них является газодинамическое диспергирование струи расплава металла эжекционной форсункой [11–14]. Для существующей технологии получения порошков алюминия промышленных марок АСД [15] содержание высокодисперсной фракции порошка алюминия с диаметром частиц не более 10 мкм в факеле распыла форсунки (пульверизате) составляет ~ 18 %.

Усовершенствование используемой в настоящее время технологии распыливания расплава алюминия сжатым газом с целью повышения ее эффективности (увеличение выхода высокодисперсной фракции, улучшение однородности дисперсного состава), а также экономичности производства (снижение расхода распыливающего газа при одновременном уменьшении себестоимости производства) является актуальной задачей порошковой металлургии. В связи с этим возникает необходимость решения ряда научно-практических задач, к числу которых относится поиск перспективных технических решений для совершенствования технологии [16]. При реализации технические решения должны отвечать жестким требованиям:

- их внедрение не должно допускать принципиальных изменений в существующие технологию, оборудование и производственный регламент предприятия;

- внесение технических решений и технологических изменений должно осуществляться без

остановки производства в целом, без экономического ущерба и риска экологических проблем.

Критерием эффективности эжекционной форсунки для распыливания расплава алюминия является максимальный выход высокодисперсной фракции частиц алюминия. Основная 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 [17].

Вторым критерием, по которому оценивается эффективность технологии получения порошка алюминия в промышленном производстве, является содержание (z) высокодисперсной фракции частиц (с диаметром менее 10 мкм) в факеле распыла эжекционной форсунки.

Указанные критерии непосредственно вытекают из анализа интегральной функции $G(d)$ распределения частиц по размерам (рис. 1).

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

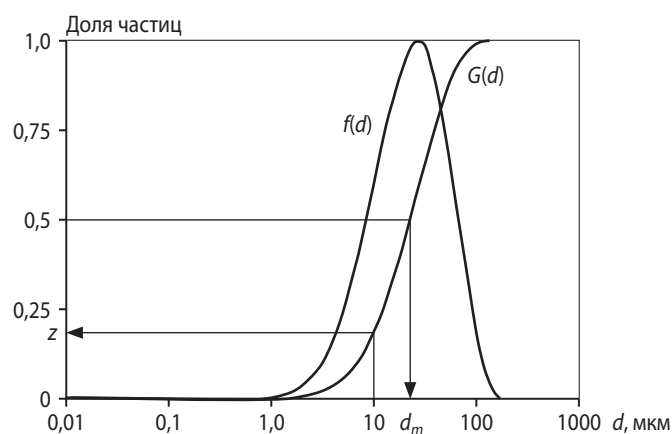


Рис. 1. Дифференциальная $f(d)$ и интегральная $G(d)$ функции распределения частиц по размерам

Целью настоящей работы являлся анализ влияния режимных параметров эжекционной форсунки на характеристики высокодисперсного порошка алюминия в условиях реального производства на предприятии ООО «СУАЛ-ПМ».

Схема установки по производству высокодисперсного порошка алюминия показана на рис. 2. Распыливание осуществляется струей азота при избыточном давлении в пылеосадительной камере 1 не менее 3 кПа. Газообразный азот под давлением 6 МПа через печь подогрева 6 и клапан 7 подается на эжекционную форсунку 4, установленную на раструбе 2, примыкающей к камере 1. За счет эжекционного эффекта расплавленный алюминий из подогреваемой ванны 8 по трубопроводу 5 направляется в форсунку и распыливается горячим газом. Факел распыла охлаждается азотом, поступающим из охлаждающего кольца 3, и образующийся пульверизат осаждается в донной части камеры 1.

Полученный порошок через шаровой клапан 9 и грохот 10 попадает в кубель 11. Азот из камеры 1 проходит через циклонный фильтр 12, две батареи рукавных фильтров 13 и возвращается на азотно-кислородную станцию для повторного использования в технологическом цикле.

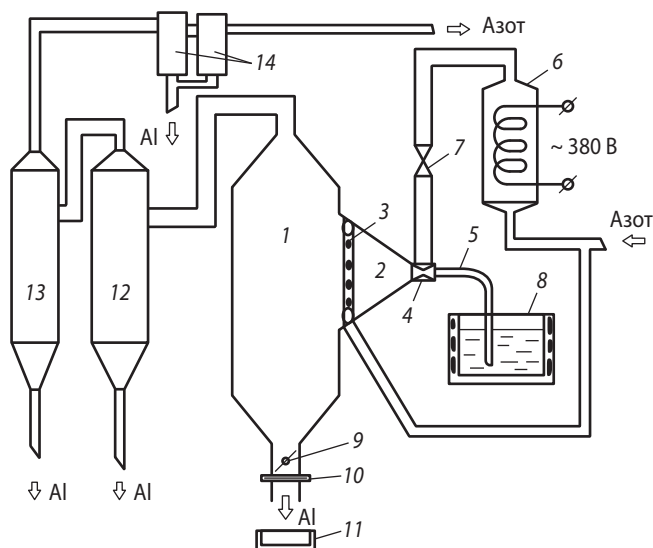


Рис. 2. Схема установки для получения высокодисперсного порошка алюминия
1 – пылеосадительная камера; 2 – раструб; 3 – охлаждающее кольцо; 4 – эжекционная форсунка; 5 – трубопровод подачи расплава; 6 – узел подогрева газа; 7 – клапан; 8 – подогреваемая ванна с расплавом; 9 – шаровой клапан; 10 – грохот; 11 – кубель; 12 – циклонный фильтр грубой очистки; 13 – циклонный фильтр тонкой очистки; 14 – батареи рукавных фильтров

Анализ влияния технологических параметров на дисперсность частиц пульверизата

В испытаниях на промышленной установке определяли производительность и дисперсный состав образующегося при распыливании расплава алюминия пульверизата. Распыливание расплава осуществлялось эжекционной форсункой, эффективность работы которой оценивали по результатам дисперсного анализа проб пульверизата, проводимого с использованием прибора «Analysette 22» (фирма FRITSCH, Германия).

Схема эжекционной форсунки представлена на рис. 3.

В табл. 1 приведены модификации режимов производства высокодисперсного пульверизата (звездочкой отмечены варьируемые технологические параметры).

В качестве базового принят следующий технологический режим (P_0): $Q = 0,17 \text{ м}^3/\text{с}$, $T_a = 873 \text{ К}$, $T_p = 1253 \text{ К}$.

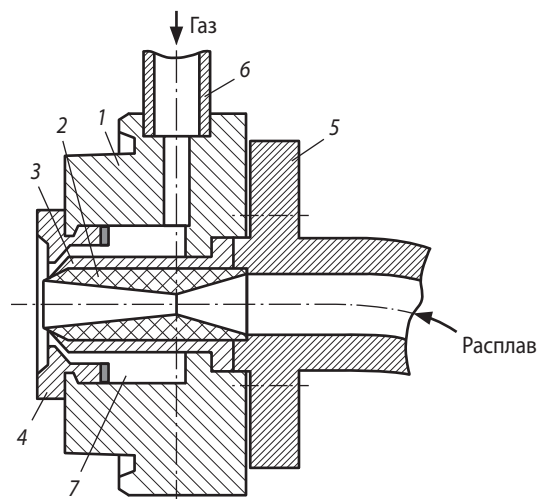


Рис. 3. Схема эжекционной форсунки
1 – корпус; 2 – ниппель; 3 – защитная втулка; 4 – крышка; 5 – металлопровод; 6 – патрубок; 7 – кольцевая полость

Таблица 1. Варьируемые технологические параметры

Технологический режим	Расход азота Q , $\text{м}^3/\text{с}$	Температура азота T_a , К	Температура расплава T_p , К
P_0	0,17	973	1253
P_1	0,21*	873	1253
P_2	0,17	933*	1253
P_3	0,17	933*	1153*

Модифицированные режимы включали:

- увеличение расхода подаваемого на форсунку азота (Q) от 0,17 до 0,21 м³/с за счет изменения геометрических характеристик форсуночно-го блока с сохранением базовых температур газа и расплава (режим P_1);

- повышение температуры подаваемого на форсунку азота (T_a) от 873 до 933 К (режим P_2), при этом значения Q и T_p соответствовали технологическому режиму P_0 ;

- рост T_a от 873 до 933 К и снижение температуры нагрева алюминия в печи пульверизации (T_p) от 1253 до 1153 К (режим P_3) при базовом значении Q .

В табл. 2 приведены основные показатели эффективности распыливания для режимов P_1 – P_3 по отношению к базовому P_0 .

Показатели эффективности рассчитывались по формулам

$$K(d_m) = \frac{d_m(P_0) - d_m(P_i)}{d_m(P_0)} \cdot 100 \%,$$

$$K(z) = z(P_i) - z(P_0),$$

$$i = 1 \div 3,$$

где $K(d_m)$, $K(z)$ – показатели эффективности форсунки соответственно по медианному диаметру частиц и содержанию высокодисперсной фракции в пульверизате; i – номер технологического режима.

Сравнительные данные результатов испытаний эжекционной форсунки при изменении технологических режимов приведены на рис. 4.

Анализ приведенных в табл. 2 и на рис. 4 данных позволил выявить влияние технологических параметров на дисперсные характеристики пульверизата алюминия.

При увеличении расхода подаваемого на форсунку азота от 0,17 до 0,21 м³/с (режим P_1) значе-

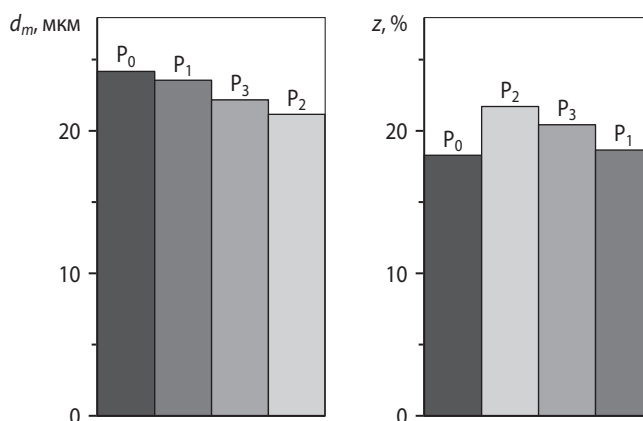


Рис. 4. Влияние режимных параметров на дисперсные характеристики пульверизата

ние d_m – медианного диаметра частиц пульверизата – уменьшается на 3,7 % (от 24,2 до 23,3 мкм), а содержание высокодисперсной фракции порошка алюминия (с диаметром частиц менее 10 мкм) повышается на 0,4 %.

При возрастании температуры подаваемого на форсунку азота до 933 К (режим P_2) диаметр d_m снижается на 12,4 % (от 24,2 до 21,2 мкм), при этом содержание z увеличивается на 3,2 %.

При большей температуре T_a (933 К) и одновременном снижении T_p от 1253 до 1153 К (режим P_3) диаметр d_m уменьшается на 8,3 % (от 24,2 до 22,2 мкм), а содержание z повышается на 2,2 %.

Заключение

Проведены измерения дисперсных характеристик пульверизата при распыливании расплава алюминия эжекционной форсункой в условиях промышленного производства высокодисперсного металлического порошка на предприятии ООО «СУАЛ-ПМ» при модификации режимных параметров – расхода распыливающего газа, температур газа и расплава. Диапазоны их варьирования не нарушали регламент существующей технологии и не требовали принципиальных изменений технологического оборудования предприятия.

При модификации режимных параметров форсунки получено уменьшение медианного диаметра частиц пульверизата на 3,7–12,4 % и увеличение содержания высокодисперсной фракции в пульверизате на 0,4–3,2 %.

Таблица 2. Сравнение основных характеристик эффективности распыливания

Технологический режим	d_m , мкм	Содержание высокодисперсной фракции в пульверизате z , %	Эффективность, %	
			$K(d_m)$	$K(z)$
P_0	24,2	18,1	–	–
P_1	23,3	18,5	3,7	0,4
P_2	21,2	21,3	12,4	3,2
P_3	22,2	20,3	8,3	2,2

Показано, что наиболее эффективно повышение температуры подаваемого на форсунку азота от 873 до 933 К (режим P_2), при этом медианный диаметр пульверизата снижается на 12,4 %, а содержание высокодисперсной фракции порошка в пульверизате возрастает на 3,2 %.

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

Литература

1. Meda L., Marra G., Galfetti L. et al. // Mater. Sci. Eng. 2007. Vol. 27, № 5. P. 1393.
2. Luman J. R., Wehrman B., Kuo K. K. et al. // Proc. Combust. Inst. 2007. Vol. 31. P. 2089.
3. Rossi C., Estève A., Vashishta P. // J. Phys. Chem. Solids. 2010. Vol. 71, № 2. P. 57.
4. Ничипоренко О. С., Найдя Ю. И., Медведовский А. Б. Распыливание металлических порошков. Киев: Наук. думка, 1980.
5. Силаев А. Д., Фишман Б. Д. Диспергирование жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.
6. Teipel U. Energetic materials. Particle processing and characterization. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2005.
7. Schwartz M. New materials, processes and methods technology. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor and Francis, 2005.
8. Gash A. E., Simpson R. L., Satcher J. H. // Defense Appl. Nanomat. / ACS Symp. Ser. 2005. Vol. 891. P. 198.
9. Cheng Zhi-Peng, Yang Yi., Li Feng-Sheng, Pan Zhen-Hua // Trans. Nonfer. Metals Soc. China. 2008. Vol. 18. P. 378.
10. Ha Y.-C., Cho C. // J. Korean Phys. Soc. 2010. P. 1574.
11. Сизов А. М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. М.: Металлургия, 1987.
12. Сизов А. М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми газовыми струями. М.: Металлургия, 1991.
13. Rao C. N. R., Müller A., Cheetham A. K. Nanomaterials chemistry: Recent developments and new directions. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2007.
14. Xiao Y., Qi L., Zeng X. et al. // J. Mech. Eng. 2011. Vol. 47, № 15. P. 156.
15. Порошок алюминиевый высокодисперсный АСД-1, АСД-4, АСД-6: Технические условия 48-5-28-87. Шелехов: ООО «СУАЛ-ПМ», 1987.
16. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Евсеев М. Я. и др. // Инж.-физ. журн. 2013. Т. 86, № 6. С. 1229.
17. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1971.

УДК 669.018.95 + 620.178.162

Изменение структуры и свойств спеченных сплавов под влиянием наноразмерных углеродных добавок

© 2014 г. **П. А. Витязь, В. И. Жорник, С. А. Ковалева, В. А. Кукареко**

Президиум НАН Беларуси

Объединенный институт машиностроения (ОИМ) НАН Беларуси, г. Минск

Статья поступила в редакцию 25.11.13 г., доработана 24.07.14 г., подписана в печать 28.07.14 г.

П. А. Витязь – докт. техн. наук, проф., акад. НАНБ, рук-ль аппарата НАНБ

(220072, Респ. Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 66). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by.

В. И. Жорник – докт. техн. наук, доцент, зав. лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов ОИМ НАНБ

(220072, Респ. Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 12). E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by.

С. А. Ковалева – ст. науч. сотр. той же лаборатории. E-mail: sveta_kovaleva@tut.by.

В. А. Кукареко – докт. физ.-мат. наук, доцент, нач-к Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов ОИМ НАНБ. E-mail: v_kukareko@mail.ru.

Рассмотрено влияние наноразмерных углеродных добавок на структурно-фазовое состояние и свойства спеченных сплавов на медной, железной и вольфрамокобальтовой основах. Показано, что при жидкофазном спекании и процессе кристаллизации порошковых композиций, содержащих наноразмерные углеродные частицы, нерастворившаяся доля наноразмерной добавки может выступать в качестве дополнительных центров зарождения кристаллов, что способствует измельчению структуры. Установлено, что для сплавов, способных образовывать с углеродом твердые растворы или упрочняющие карбидные фазы, наноразмерная алмазно-графитовая добавка приводит к увеличению твердости спекаемых композитов и улучшению их триботехнических свойств.

Ключевые слова: спеченные сплавы, наноразмерная углеродная добавка, структура, свойства.