

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПЫЛЕНИЕ СТРУЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ПОПЕРЕЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ УДАРНЫМИ И ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ*

С. М. Фролов¹, В. С. Иванов², В. С. Аксёнов³, И. О. Шамшин⁴, Ф. С. Фролов⁵,
А. Э. Зангиев⁶, Т. И. Эйвазова⁷, В. Я. Попкова⁸, М. В. Гришин⁹, А. К. Гатин¹⁰,
Т. В. Дударева¹¹

Аннотация: Предложен новый способ получения металлических порошков для аддитивных технологий (АТ) путем аэродинамического распыления свободно падающей струи расплава поперечными импульсными ударными или детонационными волнами. Способ позволяет контролировать интенсивность ударной/детонационной волны (от числа Маха 4 до примерно 7), а также состав и температуру продуктов детонации путем выбора соответствующего горючего и окислителя. Способ реализован на лабораторной и промышленной установках и предварительно опробован на расплавах трех металлов: цинка, алюминиевого сплава AlMg5 и нержавеющей стали AISI 304, обладающих существенно различными свойствами по плотности, поверхностному натяжению и вязкости. Импульсные ударные и детонационные волны, используемые для распыления свободно падающих струй расплавов, генерируются импульсно-детонационной пушкой (ИДП), работающей на стехиометрической смеси жидкого углеводородного горючего (ЖУГ) и газообразного кислорода. Рабочий процесс установки контролируется видеокамерой, а анализ формы и размеров затвердевших частиц в получаемых порошках изучается методами разделения фракций сухим просеиванием на ситах, оптической микроскопии, лазерной дифракции и атомно-силовой микроскопии. Показано, что минимальный размер частиц получаемых порошков составляет 0,1–1 мкм, а их максимальный размер превышает 400–800 мкм. Последнее объясняется дефицитом энергии ударно-волнового воздействия для полного тонкого распыления струй расплавов, особенно плотных и толстых (8 мм) струй расплава нержавеющей стали. Массовая доля частиц фракции 0–10 мкм может составлять не менее 20%. Форма частиц самых мелких фракций в порошках (0–30 и 30–70 мкм) близка к сферической (цинк, алюминий) или идеально сферической (нержавеющая сталь). Форма частиц более крупных фракций (70–140 мкм и более) в основном нерегулярная. Порошки цинка и алюминия содержат агломераты в виде частиц с мелкими сателлитами. Содержание агломератов в порошках нержавеющей стали очень низкое. В целом предварительные эксперименты показывают, что предлагаемый способ получения мелкодисперсных металлических порошков представляется перспективным по характеристикам порошков.

Ключевые слова: металлический порошок; газовое распыление; свободно падающая струя расплава; импульсно-детонационная пушка; детонационная волна; распределение частиц по размерам; цинк; алюминий; нержавеющая сталь; аддитивные технологии

DOI: 10.30826/CE25180108

EDN: LVNBLV

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (государственный контракт № 075-15-2024-543 от 24 апреля 2024 г.).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, igor_shamshin@mail.ru

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

⁶Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sydra777@gmail.com

⁷Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Tanya.Eyvaзова@mail.ru

⁸Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vega.porkova@chph.ras.ru

⁹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, grishin@chph.ras.ru

¹⁰Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, akगतin@yandex.ru

¹¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, yanadva@mail.ru

Литература

1. Guo N., Leu M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs // *Frontiers Mechanical Engineering*, 2013. Vol. 8. No. 3. P. 215–243. doi: 10.1007/s11465-013-0248-8.
2. Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sunkara L. D., Bernat J. Additive manufacturing: A comprehensive review // *Sensors*, 2024. Vol. 24. P. 2668. doi: 10.3390/s24092668.
3. Milewski J. O. Additive manufacturing of metals: From fundamental technology to rocket nozzles, medical implants, and custom jewelry. — Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2017. 369 p.
4. Sherif El-Eskandarany M., Sumiyama K., Aoki K., Suzuki K. Reactive ball mill for solid state synthesis of metal nitrides powders. *Mater. Sci. Forum*, 1992. Vol. 88. P. 801–808.
5. Sherif El-Eskandarany M., Saida J., Inoue A. Structural and calorimetric evolutions of mechanically-induced solid-state devitrificated $Zr_{60}Ni_{25}Al_{15}$ glassy alloy powder // *Acta Mater.*, 2003. Vol. 51. No. 5. P. 1481–1492.
6. Champagne B., Angers R. REP atomization mechanism // *Powder Metall. Int.*, 1984. Vol. 16. No. 3. P. 125–128.
7. Бондарев Б. И., Шмаков Ю. В. Технология производства быстрозакристаллизованных алюминиевых сплавов. — М.: ВИЛС, 1997. 231 с.
8. Huo S. H., Qian M., Schaffer G. B., Crossin E. Aluminium powder metallurgy // *Fundamentals of aluminium metallurgy; production, processing and applications* / Ed. R. Lumley. — Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing Ltd., 2011. P. 655–701.
9. Xia Y., Fang Z. Z., Sun P., Zhang Y., Zhu J. Novel method for making biomedical segregation-free Ti-30Ta alloy spherical powder for additive manufacturing // *JOM — J. Min. Met. Mat. S.*, 2018. Vol. 70. P. 364–369. doi: 10.1007/s11837-017-2713-z.
10. Singh D., Koria S. C., Dube R. K. Study of free fall gas atomisation of liquid metals to produce powder // *Powder Metall.*, 2001. Vol. 44. No. 2. P. 177–184. doi: 10.1179/003258901666239.
11. Lawley A. Atomization of specialty alloy powders // *JOM — J. Min. Met. Mat. S.*, 2014. Vol. 33. No. 1. P. 13–18. doi: 10.1007/BF03354395.
12. Dawes J., Bowerman R., Trepleton R. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain // *Johnson Matthey Tech.*, 2015. Vol. 59. No. 3. P. 243–256. doi: 10.1595/205651315X688686.
13. Ciftci N., Ellendt N., Mädler L., Uhlenwinkel V. Impact of hot gas atomization on glass forming alloys // *PM World Congress Proceedings*. — Hamburg, Germany, 2016. 7 p.
14. Lohner H., Czisch C., Schreckenberger P., Fritsching U., Bauckhage K. Atomization of viscous melts // *Atomization Spray*, 2005. Vol. 15. P. 169–180.
15. Wolf G., Neoth M., Schubert M. V. E., Bergmann H. W. Production and characterization of liquid gas atomized hard magnetic NdFeB alloy powders for bonded isotropic magnets // *Powder Metallurgy World Congress Proceedings*, 1994. Vol. 3. P. 1745–1753.
16. Wolf G., Lang A., Bergmann H. W. Investigations on melt atomization with gas and liquefied cryogenic gas // *Conference (International) on Spray Deposition and Melt Forming Proceedings*. — Bremen, Germany: Bremen University, 2000. P. 535–547.
17. Dunkley J. J. Atomization // *ASM handbook*, 1998. — ASM International Publs., 1998. Vol. 7. P. 35–52.
18. Small S., Bruce T. J. The comparison of characteristics of water and inert gas atomized powders // *Int. J. Powder Metall.*, 1968. Vol. 4. No. 3. P. 7–17.
19. Cao W., Shu J., Chen J. Enhanced recovery of high-purity Fe powder from iron-rich electrolytic manganese residue by slurry electrolysis // *Int. J. Min. Met. Mater.*, 2024. Vol. 31. P. 531–538. doi: 10.1007/s12613-023-2729-z.
20. Rai V., Liu D., Xia D., Jayaraman Y., Gabriel J.-C. P. Electrochemical approaches for the recovery of metals from electronic waste: A critical review // *Recycling*, 2021. Vol. 6. No. 3. P. 53. doi: 10.3390/recycling6030053.
21. Dutta B., Babu S., Jared B. H. Science, technology and applications of metals in additive manufacturing. — Elsevier Science, 2019. 354 p.
22. Alagheband A., Brown C. Plasma atomization goes commercial // *Metal Powder Report*, 1998. Vol. 53. No. 11. P. 26–28.
23. Smagorinski M. E., Tsantrizos P. G. Production of spherical titanium powder by plasma atomization // *World Congress of PM and Particulate Materials Proceedings*. — Orlando, FL, USA: Metal Powder Industries Federation, 2002. Vol. 3. P. 248–260.
24. Chen G., Zhao S. Y., Tan P., Wang J., Xiang C. S., Tang H. P. A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization // *Powder Technol.*, 2018. Vol. 333. P. 38–46. doi: 10.1016/j.powtec.2018.04.013.
25. Teoh W. Y., Amal R., Madler L. Flame spray pyrolysis: An enabling technology for nanoparticles design and fabrication // *Nanoscale*, 2010. Vol. 2. No. 8. P. 1324–1347.
26. Cui C., Stern F., Ellendt N., Uhlenwinkel V., Steinbacher M., Tenkamp J., Walther F., Fichte-Heinen R. Gas atomization of duplex stainless steel powder for laser powder bed fusion // *Materials*, 2023. Vol. 16. P. 435. doi: 10.3390/ma16010435.
27. Mathias L. E. T., Andreoli A. F., Gargarella P. Gas atomization of A2 tool steel: Effect of process parameters on powders' physical properties // *J. Alloy. Compd.*, 2023. Vol. 960. P. 170696. doi: 10.1016/j.jallcom.2023.170696.
28. Cui C., Uhlenwinkel V., Schulz A., Zoch H.-W. Austenitic stainless steel powders with increased nitrogen content for laser additive manufacturing // *Metals — Basel*, 2020. Vol. 10. No. 1. P. 61.
29. Fritsching U. Spray simulation: Modeling and simulation of sprayforming metals. — Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 288 p.

30. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M., Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Materials for additive manufacturing // Additive manufacturing technologies. — Springer, Cham, 2021. Vol. 3. P. 379–428.
31. Ciftci N., Ellendt N., Soares Barreto E., Mädler L., Uhlenwinkel V. Increasing the amorphous yield of $\{(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{0.75}\text{B}_{0.2}\text{Si}_{0.05}\}_{96}\text{Nb}_4$ powders by hot gas atomization // Adv. Powder Technol., 2018. Vol. 29. P. 380–385.
32. Goudar D. M., Srivastava V., Rudrakshi G. Effect of atomization parameters on size and morphology of Al-17Si alloy powder produced by free fall atomizer // Eng. J., 2017. Vol. 21. P. 155–168.
33. See J. B., Johnston G. H. Interactions between nitrogen jets and liquid lead and tin streams // Powder Technol., 1978. Vol. 21. P. 119–125.
34. Haferkamp L., Haudenschild L., Spierings A., Wegener K., Riener K., Ziegelmeier S., Leichtfried G. J. The influence of particle shape, powder flowability, and powder layer density on part density in laser powder bed fusion // Metals — Basel, 2021. Vol. 11. P. 418.
35. Fereiduni E., Ghasemi A., Elbestawi M. Characterization of composite powder feedstock from powder bed fusion additive manufacturing perspective // Materials, 2019. Vol. 12. P. 3673.
36. Liu Y., Guo Sh., Huang B., Liu Z., Du Y. Densification behaviour of Al–Ni–Y powder containing amorphous and nanocrystalline phases // PM World Congress Proceedings. — Wien, Austria: European Powder Metallurgy Association, 2004. Vol. 1. P. 425–430.
37. Lubanska H. Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals // JOM — J. Min. Met. Mat. S., 1970. Vol. 22. No. 2. P. 45–49.
38. Gärtner E., Jung H. Y., Peter N. J., Dehm G., Jägle E. A., Uhlenwinkel V., Mädler L. Reducing cohesion of metal powders for additive manufacturing by nanoparticle dry-coating // Powder Technol., 2021. Vol. 379. P. 585–595.
39. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Набатников С. А., Моисеев А. В., Андриенко В. Г., Пилецкий В. Г. Способ сверхтонкого распыливания жидкого топлива и устройство для его осуществления. Патент Российской Федерации на изобретение № 2644422 от 12.02.2018. Приоритет от 12.04.2017.
40. Hsiang L.-P., Faeth G. M. Near-limit drop deformation and secondary breakup // In. J. Multiphas. Flow, 1992. Vol. 18. No. 5. P. 635–652. doi: 10.1016/0301-9322(92)90036-g.
41. Guildenbecher D. R., Gao J., Chen J., Sojka P. E. Characterization of drop aerodynamic fragmentation in the bag and sheet-thinning regimes by crossed-beam, two-view, digital in-line holography // Int. J. Multiphas. Flow, 2017. Vol. 94. P. 107–122.
42. Reuter C. B., Tuttle S. G. Interactions between liquid sprays and shock waves in underexpanded flows // P. Combust. Inst., 2024. Vol. 40. No. 1-4. P. 105244. doi: 10.1016/j.proci.2024.105244.
43. Chen Y., Wagner J. L., Farias P. A., DeMauro E. P., Guildenbecher D. R. Galinstan liquid metal breakup and droplet formation in a shock-induced cross-flow // Int. J. Multiphas. Flow, 2018. Vol. 106. P. 147–163. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.05.015.
44. SDToolBox — Numerical tools for shock and detonation wave modeling. <https://shepherd.caltech.edu/SDT>.
45. Goodwin D. G., Moffat H. K., Schoegl I., Speth R. L., Weber B. W. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Version 3.0.0, 2023. doi: 10.5281/zenodo.8137090.
46. Pilch M., Erdman C. Use of break-up time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration induced break-up of a liquid drop // Int. J. Multiphas. Flow, 1987. Vol. 13. P. 741–757.
47. Нугматулин П. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 р.
48. Ranger A. A., Nicholls J. A. Aerodynamic shattering of liquid drops // AIAA J., 1969. Vol. 7. No. 2. P. 285–290.
49. Chou W.-H., Faeth G. M. Temporal properties of secondary drop breakup in the bag breakup regime // Int. J. Multiphas. Flow, 1998. Vol. 4. P. 889–912.

Поступила в редакцию 07.11.2024

После доработки 16.01.2025

Принята к публикации 22.01.2025