

УДК 621.793

DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-16-25

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ АБРАЗИВА НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

В. Ю. ПРОЦКО, Д. Л. СТАСЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Рассмотрена проблема управляемости струйно-абразивной обработки для получения требуемой шероховатости после обработки. Представлена методика определения воздействия частиц абразива, разгоняемых потоком воздуха, на обрабатываемую поверхность. Показаны результаты изменения шероховатости обработанной поверхности от фракционного размера абразива и твердости обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: абразив, газовый поток, шероховатость, деформация, обработка.

Для цитирования. Процко, В. Ю. Воздействие частиц абразива на обрабатываемую поверхность при струйно-абразивной обработке / В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 16–25. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-16-25

THE IMPACT OF ABRASIVE PARTICLES ON THE MACHINED SURFACE DURING ABRASIVE JET MACHINING

V. YU. PROTSKO, D. L. STASENKO

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

The article examines the problem of controllability of abrasive jet machining to achieve the desired roughness after machining. A methodology for determining the impact of abrasive particles accelerated by an air flow on the machined surface is presented. The results of changes in the machined surface roughness depending on the abrasive particle size and the hardness of the machined surface are shown.

Keywords: abrasive, gas flow, roughness, deformation, machining.

For citation. Protsko V. Yu., Stasenko D. L. The impact of abrasive particles on the machined surface during abrasive jet machining. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 16–25 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-16-25

Введение

Окончательная или финишная обработка ответственных деталей и деталей для нанесения покрытий выполняется с помощью абразивных инструментов и сред. Наиболее перспективным методом такой обработки является струйно-абразивная. Сущность этого метода заключается в использовании эффекта удара частиц абразива об обрабатываемую поверхность. В работах [2, 4, 5] рассматривают обработку, при которой абразивно-воздушная смесь под давлением подается на обрабатываемую поверхность.

При струйно-абразивной обработке используется свободный абразив, что полностью исключает прижиги, температурные и силовые деформации обрабатываемой поверхности детали.

В качестве абразивных материалов для струйно-абразивной обработки используют чугунную и стальную колотую дробь (для толстостенных деталей), корунд (электрокорунд) – плавленый оксид алюминия, карборунд (карбид кремния), чугунный и стальной песок. Материалы должны быть сухими и чистыми, чтобы не загрязнить подготовленную поверхность. Сжатый воздух должен быть хорошо очищен от влаги и масла (ГОСТ 9010-80). Давление воздуха – 0,4–0,7 МПа; дистанция обработки – 0,08–0,15 м; угол встречи – 60–90°; расход абразива – 300–500 кг/ч [4].

Основными достоинствами струйно-абразивной обработки по сравнению с другими видами финишных технологических операций обработки поверхностей деталей являются высокая производительность, управляемость процессом и простота технологического оборудования [1–5]. Для ее повсеместного внедрения в производство необходимо всестороннее исследование физических явлений и закономерностей газоабразивной струи как высокоточного технологического инструмента для формирования микрорельефа на обрабатываемой поверхности.

Рельеф поверхности при струйно-абразивной обработке представлен совокупностью неориентированных в пространстве зубчатых выступов. При струйно-абразивной обработке кроме шероховатости на прочность сцепления с наносимым покрытием оказывает влияние повышение общей потенциальной энергии поверхности (наклеп).

Несмотря на большой опыт практического применения данного метода в области поверхностного пластического деформирования, до сих пор не сложилось научно-обоснованных методик оценки эффективности упрочнения, выбора оптимального метода и режима обработки.

Управляемая концентрация абразивных частиц в несущей и газовой среде позволяет получить в плоскости их контакта с обрабатываемой поверхностью требуемый шаг и площадь, занятую элементами частично регулируемого микрорельефа [4, 5]. Управление скоростью удара абразивных частиц по обрабатываемой поверхности дает возможность получения микрорельефа заданной глубины.

Целью представленной работы является определение энергии воздействия единичной частицы на подготовленную поверхность при струйно-абразивной обработке.

Основная часть

К преимуществам пневматических дробеметов следует отнести то, что они дают концентрированный поток дроби для обрабатывания труднодоступных участков изделия. Недостатками их являются пониженная экономичность процесса и нестабильность режима наклепа по сравнению с механическими дробеметами. Колебания в давлении воздуха и размере дробинок, износ отдельных элементов дробемета, особенно его сопла, отражаются на скорости дроби и плотности, с которой дробь покрывает обрабатываемое изделие. Широкое распространение установки (рис. 1) объясняется простотой конструкции, наличием на многих предприятиях централизованной системы подачи сжатого воздуха, а также накопленным большим опытом эксплуатации аналогичных установок для очистки деталей.

Эжекторная система (рис. 1, а) работает по принципу смешения воздушного потока, находящегося под давлением, и абразивного материала, подхватываемого за счет разряжения и уносимого на обрабатываемую поверхность. Напорная система (рис. 1, б) работает за счет давления воздуха на материал, находящийся в герметичной емкости. Формирование абразивно-воздушного потока происходит на выходе дозатора абразива, после чего выносится через рукав и сопло на обрабатываемую поверхность.

Процесс струйно-абразивной обработки зависит от фракционного состава абразива, его физических свойств и энергетических параметров доставки абразива к обрабатываемой поверхности газовым потоком.

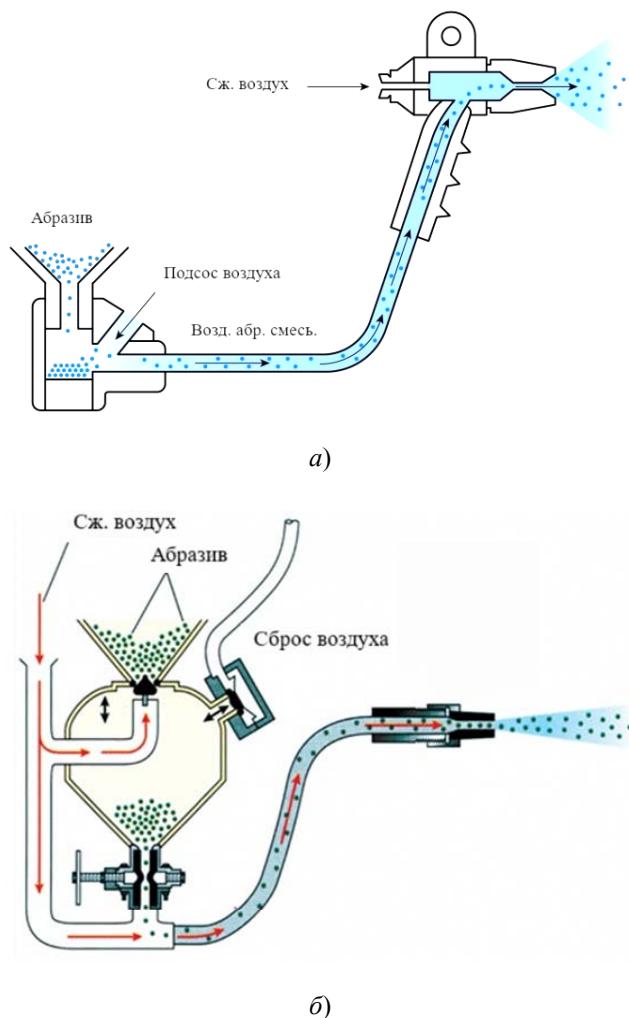


Рис. 1. Струйно-абразивная пневматическая установка:
а – эжекторная система; б – напорная система

Рассмотрим одномерное неустановившееся течение газа в цилиндрической трубе переменного сечения (рис. 2). Выделим объем газа между двумя близкими сечениями, которые находятся на расстоянии dx . Действие на этот объем стенок трубы и газа слева и справа заменим поверхностными силами, где P – давление газа, Па; S – площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

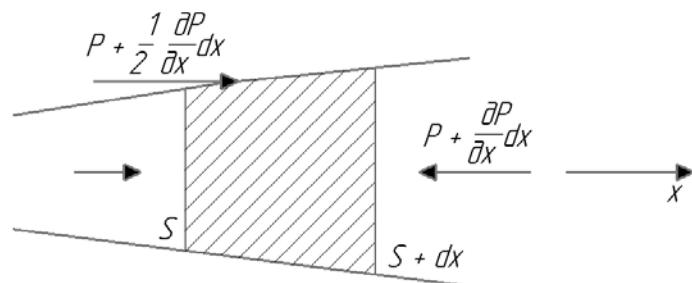


Рис. 2. Схема неустановившееся течение газа
в цилиндрической трубе переменного сечения

Допустим, что выделенная частица газа объемом Sdx движется вправо под действием поверхностных сил. Далее, используя второй закон Ньютона, после несложных преобразований получим [6]:

$$\rho S \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} dS - \frac{\partial P}{\partial x} S - \frac{\partial P}{\partial x} dS,$$

где ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; v – скорость газа, $\text{м}/\text{с}$.

Отбросив в правой части члены второго порядка малости и сократив площадь S , имеем уравнение, в котором давление P , плотность ρ и скорость газа v являются функциями двух переменных: координаты x и времени t . Заменив в этом уравнении полную производную скорости по времени и разделив левую и правую части на ρ , получим уравнение движения, или уравнение Эйлера [6]:

$$\frac{dv}{dt} + v \frac{dv}{dx} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}.$$

Если движение установившееся, то это уравнение значительно упрощается и принимает вид:

$$v \frac{dv}{dx} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}.$$

Сокращая dx , получим:

$$vdv + \frac{\partial P}{\rho} = 0.$$

Скорость истечения газа через сопло определяется при адиабатном процессе [6–8]:

$$\frac{v^2 - v_1^2}{2} + \int_{\rho_1}^{\rho} \frac{dP}{\rho(P)} = 0,$$

где v , P и v_1 , P_1 – значения скорости и давления, соответствующие двум различным сечениям трубы.

Согласно уравнению неразрывности потока массовый расход газа G [$\text{кг}/\text{с}$] в любом сечении трубы постоянен и равен [8]:

$$G = \rho v S = \text{const.}$$

В случае постоянной плотности (несжимаемый поток) объемный расход q [$\text{м}^2/\text{с}$], также постоянен: $q = vS = \text{const.}$

Из этого следует, что с увеличением площади поперечного сечения S скорость v потока убывает, и наоборот. В сжимаемом потоке газа связь между скоростью потока и площадью поперечного сечения гораздо сложнее.

Продифференцировав уравнение неразрывности и разделив каждый член на $\rho v S$, получим:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dv}{v} + \frac{dS}{S} = 0, \text{ или } \frac{dS}{dv} = -S \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dv} \right).$$

Преобразуем уравнение к следующему виду:

$$\rho dv = -\frac{dP}{v}.$$

Скорость газового потока [5]:

$$v_{\text{г.п.}} = \sqrt{\frac{2kp_1 \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{(k-1)\rho_r}},$$

где k – показатель адиабаты ($k = 1,4$); p_1 – давление; ρ_r – плотность.

Исходя из известной величины концентрации воздушной смеси с порошком и заданной производительности Q_m , скорость газового потока определяется:

$$v_{\text{газа}} = \frac{Q_m}{S_{\text{сопла}}} = \frac{\pi}{6} d^3 \frac{\rho_n n}{S_{\text{сопла}} \rho_r},$$

где $S_{\text{сопла}}$ – площадь сопла; d – диаметр частицы порошка; ρ_n – плотность частицы порошка; n – концентрация порошка; ρ_r – плотность газового потока.

Тогда давление газовой струи может быть определено:

$$p_1 = v^2 \rho_r \frac{k-1}{2k},$$

где p_1 – давление; ρ_r – плотность.

Надежное транспортирование частиц потоком воздуха возможно при следующей его скорости [8–10]:

$$v = \text{Re} \frac{v}{d},$$

где Re – критерий Рейнольдса; d – эквивалентный диаметр частицы порошка, м; v – кинематическая вязкость газа при температуре транспортирования, $\text{м}^2/\text{с}$;

$$\text{Re} = \frac{Ar(1-\beta)^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar(1-\beta)^{4,75}}},$$

где β – объемная доля порошка;

$$\beta = \frac{V_T}{V_r} = \frac{V_T}{V_r + V_T} = \frac{\frac{p_T}{\rho_T}}{\frac{p_T}{\rho_T} + \frac{p_r}{\rho_r}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_T}{\mu \rho_r}},$$

где ρ_r – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ – динамическая вязкость газа при температуре транспортирования;

$$\mu = \frac{v}{\rho};$$

$$Ar = \frac{d^3 g (\rho_n - \rho)}{\rho v^2},$$

где Ar – критерий Архимеда; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ρ_n – плотность частицы порошка; ρ – плотность газа при температуре транспортирования, кг/м^3 .

Рассмотрим взаимодействие потока абразива (рис. 3) с обрабатываемой поверхностью и воздействие единичной частицы на нее (рис. 4).

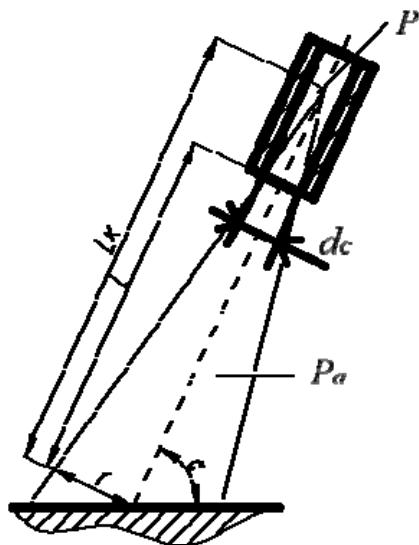


Рис. 3. Схема взаимодействия потока абразива с обрабатываемой поверхностью

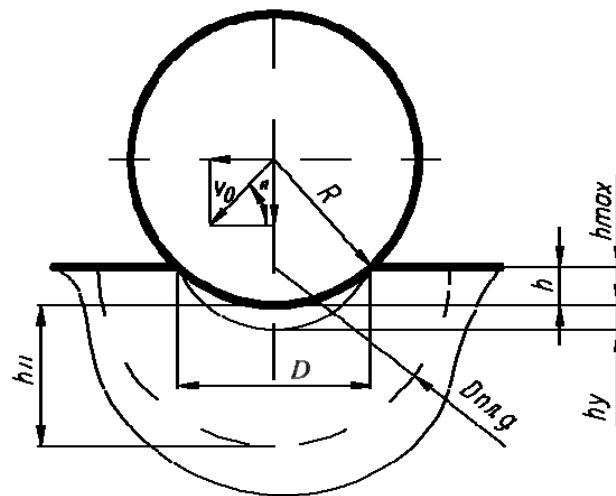


Рис. 4. Схема воздействия частицы абразива на обрабатываемую поверхность

Из соотношения между силой, действующей на поверхность, и диаметром получаемого отпечатка (рис. 4) можно найти величину работы, совершающей единичной частицей при статической деформации [2, 11–13]:

$$A = \int_0^\lambda PD\lambda.$$

Тогда глубина отпечатка приближенно может быть определена:

$$\lambda \approx \frac{D^2}{4d}.$$

После интегрирования получим уравнение для определения работы, совершающей единичной частицей при деформации поверхности:

$$A_{дин} = \frac{\pi}{32} \frac{H_{м.дин} D^4}{d}.$$

Исходя из данного уравнения можно найти диаметр отпечатка d и глубину отпечатка λ :

$$D = 2\sqrt[4]{\frac{2A_{дин}d}{\pi H_{м.дин}}};$$

$$\lambda = \frac{D^2}{4d} = \sqrt{\frac{2A_{дин}}{\pi H_{м.дин} d}}.$$

Для отдельной частицы ударная энергия определяется величиной ее кинетической энергии:

$$A_{дин} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\pi\gamma}{12g} d^3 v^2,$$

где v – скорость дробинки; γ – удельный вес; g – ускорение силы тяжести.

Для анализа полученных зависимостей представим процесс дробеструйной обработки сталей различной твердости: сталь 10(НВ 143); сталь 45 незакаленная (HRC 28); сталь 45 закаленная (HRC 46); Р6М5 закаленная (HRC 66).

Обработка проводилась на струйно-абразивной установке эжекторного типа порошками различного фракционного состава (50–200 мкм) при давлении воздуха 0,4 МПа. Результаты измерения шероховатости выполнялись на профилометре (рис. 5).

Анализ зависимости конечных размеров шероховатости поверхности заготовки из сталей различной твердости после струйно-абразивной обработки от размера абразива (рис. 5) показал, что с увеличением размера частиц происходит увеличение величины шероховатости по линейной зависимости: $Ra = k_1 d + k_2$, а с увеличением твердости поверхности заготовки шероховатость уменьшается (здесь k_1 , k_2 – коэффициенты, учитывающие твердость обрабатываемой поверхности; d – приведенный диаметр фракционного состава абразива).

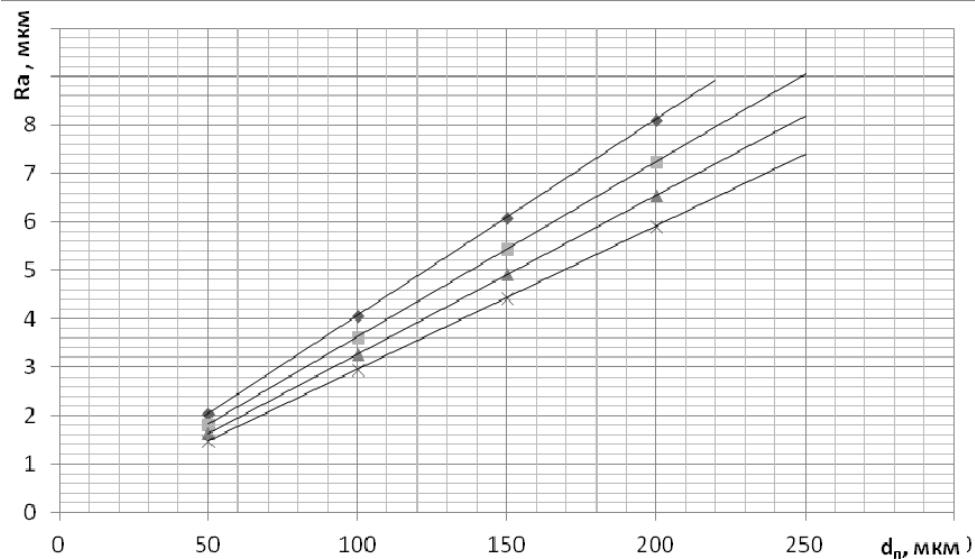


Рис. 5. Результаты измерения шероховатости

Заключение

Установлена взаимосвязь геометрического размера абразива и его физических свойств на величину шероховатости обработанной поверхности, получаемой после струйно-абразивной обработки. На основании этого можно сделать вывод о том, что для формирования необходимой шероховатости нужно обеспечить требуемый размер частиц абразива с учетом твердости подвергаемой обработке поверхности. Таким образом, при подготовке поверхности основы для газотермического напыления с целью создания прочного соединения основы с покрытием следует учитывать перечисленные закономерности.

Литература

1. Процко, В. Ю. Особенности высокоскоростного газопламенного напыления поверхности / В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 66–69.
2. Струйно-абразивная обработка крупногабаритных деталей / О. В. Захаров, Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов [и др.] // Вестник машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 79–81.
3. Стасенко, Д. Л. Процесс получения сферических порошков и дискретных волокон методом высокоскоростной закалки расплава / Д. Л. Стасенко, М. Н. Верещагин // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2003. – № 10. – С. 1–63.
4. Веткасов, Н. И. Повышение эффективности струйно-абразивной обработки на основе двухкритериальной оптимизации параметров процесса / Н. И. Веткасов, И. А. Скляров, О. В. Захаров // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2017. – С. 59–60.
5. Проволоцкий, А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А. Е. Проволоцкий. – Киев : Наукова думка, 1989. – 279 с.
6. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука, 1976. – 888 с.
7. Паничкин, И. А. Теория одномерного течения газа и ее применение для расчета сверхзвуковых аэродинамических труб / И. А. Паничкин, А. Б. Ляхов. – М. : ОНТИ, 1957. – 118 с.

8. Ивандаев, А. И. Численное исследование метания слоя порошка сжатым газом / А. И. Ивандаев, А. Г. Кутушев, Д. А. Рудаков // Физика горения и взрыва. – 1995. – № 4. – С. 63–70.
9. Иванов, А. С. Нестационарное истечение двухфазной дисперсной среды из цилиндрического канала конечных размеров в атмосферу / А. С. Иванов, В. В. Козлов, Д. В. Садин // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1996. – № 3. – С. 60–66.
10. Садин, Д. В. Приложение гибридного метода крупных частиц к расчету взаимодействия ударной волны со слоем газовзвеси / Д. В. Садин // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т. 12, № 6. – С. 1323–1338.
11. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред : в 2 ч. / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с. ; Ч. 2. – 360 с.
12. Кутушев, А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах / А. Г. Кутушев. – СПб. : Недра, 2003. – 284 с.
13. Дисперсия облака частиц в ударной волне. Влияние формы, угла поворота и геометрических параметров облака на динамику потока и дисперсию / С. Л. Дэвис, Т. Б. Диттман, Дж. Б. Якобс, В. С. Дон // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54, № 6. – С. 45–59.

References

1. Protsko V. Yu., Stasenko D. L. Features of high-velocity flame spraying of surfaces. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroenija, jenergetiki i upravlenija: materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Gomel'*, 27–28 apr. 2023 g. [Research and development in mechanical engineering, energy and management: Proc. of the XXIII International scientific and technical conf. of students, postgraduates and young scientists, Gomel, April 27–28, 2023]. Gomel, Gomel'skij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet imeni P. O. Suhogo, 2023, part 1, pp. 66–69 (in Russian).
2. Zakharov O. V., Khudobin L. V., Vetkasov N. I., Sklyarov A. I., Kochetkov A. V. Abrasive blasting of large-sized parts. *Vestnik mashinostroenija*, 2016, no. 3, pp. 79–81 (in Russian).
3. Stasenko D. L., Vereshchagin M. N. The process of producing spherical powders and discrete fibers by high-speed melt quenching. *Izvestija NAN Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2003, no. 10, pp. 1–63 (in Russian).
4. Vetkasov N. I., Sklyarov I. A., Zakharov O. V. Improving the efficiency of abrasive-jet machining based on two-criteria optimization of process parameters. *Perspektivy razvitiya tehnologij obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: collection of articles. Int. scientific and practical conf.]. Kursk, 2017, pp. 59–60 (in Russian).
5. Provolotsky A. E. *Abrasive blasting of machine parts*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989. 279 p. (in Russian).
6. Abramovich G. N. *Applied gas dynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 888 p. (in Russian).
7. Panichkin I. A., Lyakhov A. B. Theory of one-dimensional gas flow and its application to the calculation of supersonic wind tunnels. Moscow, ONTI, 1957, 118 p. (in Russian).
8. Ivandaev A. I., Kutushev A. G., Rudakov D. A. Numerical study of the throwing of a powder layer by compressed gas. *Fizika gorenija i vzryva = Scientific Journals*, 1995, no. 4, pp. 63–70 (in Russian).
9. Ivanov A. S., Kozlov V. V., Sadin D. V. Unsteady flow of a two-phase dispersed medium from a cylindrical channel of finite dimensions into the atmosphere. *Izvestija RAN. Mehanika zhidkosti i gaza*, 1996, no. 3, pp. 60–66 (in Russian).
10. Sadin D. V. Application of the hybrid method of large particles to the calculation of the interaction of a shock wave with a gas suspension layer. *Komp'juternye issledovaniya i modelirovaniye = Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1323–1338 (in Russian).

11. Nigmatulin R. I. *Dynamics of multiphase media*. Moscow, Nauka Publ., 1987, part 1. 360 p. (in Russian).
12. Kutushev A. G. *Mathematical modeling of wave processes in aerodispersed and powdery media*. Saint Petersburg, Nedra Publ., 2003, 284 p. (in Russian).
13. Davis S. L., Dittman T. B., Jacobs J. B., Don V. S. Dispersion of a particle cloud in a shock wave. the influence of the shape, rotation angle, and geometric parameters of the cloud on the flow dynamics and dispersion. *Prikladnaja mehanika i tehnicheskaja fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 45–59 (in Russian).

Поступила 17.09.2025 г.