

УДК 621.923

## Анализ влияния динамического воздействия абразивного материала на заготовку при обработке сложнопрофильных поверхностей потоковой галтовкой

П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов, А.А. Гончаров

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Analysis of the abrasive material dynamic action on a workpiece in machining the complex-profile surfaces with the flow tumbling

P.D. Akulinichev, M.A. Albov, A.A. Goncharov

Bauman Moscow State Technical University

■ Финишная обработка миниатюрных сложнопрофильных поверхностей, позволяющая нивелировать погрешности формы, является актуальной технологической проблемой. Миниатюрные сложнопрофильные поверхности, как правило, обрабатывают свободным абразивом, в частности потоковой галтовкой. Однако в научной литературе отсутствуют сведения об обоснованной методике выбора режимов обработки, позволяющих достичь требований, предъявляемых к качеству и геометрической форме поверхности изделия. В связи с этим существует необходимость в разработке математической модели обработки свободным абразивом методом потоковой галтовки, которая позволит управлять съемом материала в зависимости от глубины погружения заготовки в абразивный материал и скорости его потока. Разработана математическая модель динамического воздействия абразивного материала на заготовку. Выявлена зависимость статического давления на заготовку от глубины ее погружения в абразивный материал. Установлена зависимость динамического давления на заготовку от скорости потока абразивного материала. Определена возможность равномерного и неравномерного съема материала с заготовки.

**EDN:** BXXVQU

**Ключевые слова:** финишная обработка, качество поверхности, обработка свободным абразивом, потоковая галтовка, неравномерность съема материала

■ Miniature complex-profile surfaces final machining makes it possible to level out the shape errors and appears to be an urgent technological problem. Miniature complex-profile surfaces are usually machined with a free abrasive, in particular with the flow tumbling. However, scientific literature is missing any information on substantiated methodology in selecting the machining modes that would allow achieving the specified requirements to surface quality and its geometric shape. In this regard, there appears a need to develop a mathematical model of the free abrasive machining with the flow tumbling method, which would make it possible to control the material removal depending on the workpiece immersion depth in the abrasive material and on the flow rate. Theoretical research resulted in developing a mathematical model of the abrasive material dynamic action on the workpiece. Dependence of the workpiece static pressure on its immersion depth was revealed, as well as dependence of the workpiece dynamic pressure on the abra-

sive material flow rate. Possibility of the uniform and non-uniform material removal from the workpiece was determined.

EDN: BXXBQU

**Keywords:** final machining, surface quality, free abrasive machining, flow tumbling, non-uniform material removal

Одним из важных направлений развития технологической науки является выявление закономерностей взаимодействия параметров технологической системы оборудование — оснастка — рабочий инструмент — заготовка, позволяющих повысить качество изготавливаемых деталей путем управления режимами обработки [1–5].

К областям, интересующим ученых-технологов, относится обработка сложнопрофильных поверхностей [6–10]. В частности, актуальным является изучение особенностей процесса обработки миниатюрных сложнопрофильных поверхностей свободным абразивом [11–18].

К устройствам с миниатюрными сложнопрофильными поверхностями принадлежат и одновинтовые дозаторы, рабочий орган которых — героторная пара — имеет циклоидальные винтовые поверхности с диаметром сечения 3...10 мм [19]. К роторам рабочего органа предъявляются высокие требования по точности и качеству поверхности, в частности по параметру шероховатости поверхности  $Ra$ , который должен находиться в пределах 0,04...0,06 мкм. Для достижения такого качества поверхности целесообразно использовать обработку свободным абразивом [9, 14, 20–23].

Кроме того, сложность финишной обработки миниатюрного ротора одновинтового дозатора заключается в отклонении формы поверхности от заданной, которое заготовка приобретает на этапе формообразования лезвийными методами. Отклонение формы рабочей поверхности миниатюрного ротора является недопустимым, так как это вызывает пульсации потока абразивного материала (АМ) и снижает давление в героторной паре.

В связи с этим становится важной научной задачей разработка технологических подходов, позволяющих на этапе финишной обработки нивелировать погрешности формы миниатюрного ротора одновинтового насоса, возникающие на этапе формообразования рабочей поверхности.

Цель исследования — разработка математической модели обработки детали свободным абразивом методом потоковой галтовки, поз-

воляющей управлять съемом АМ в зависимости от глубины погружения заготовки в АМ и скорости его потока.

**Теоретическая часть.** Анализ математических моделей обработки свободным абразивом выявил необходимость создания математической модели для обработки потоковой галтовкой, которая позволит определять величину снимаемого АМ с заготовки за определенное время обработки [24].

Для построения математической модели обработки заготовки методом потоковой галтовки рассмотрим кинематические особенности движения заготовки и АМ в процессе обработки (рис. 1).

Основным движением при обработке заготовки является вращение барабана, в котором находится АМ в свободном виде. Вращение барабана позволяет создать непрерывный поток АМ и определяет скорость потока АМ относительно заготовки

$$v_{\text{п}} = \frac{\pi n_6 D_{6-3}}{1000}, \text{ м/мин,}$$

где  $n_6$  — частота вращения барабана,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $D_{6-3}$  — диаметр, на котором установлена заготовка относительно оси вращения барабана, мм.

Вспомогательным движением служит вращение заготовки вокруг оси, которое необходимо для равномерной обработки всей ее поверхности.

В процессе обработки заготовка погружается в АМ на определенную глубину, поэтому необходимо рассмотреть взаимодействие гранул АМ

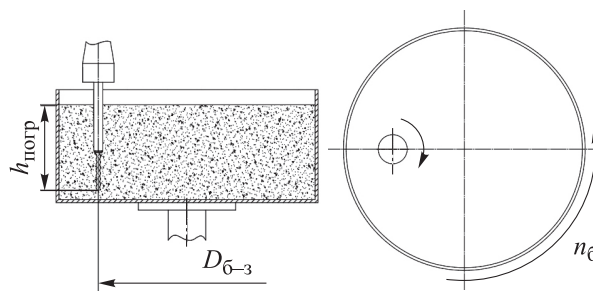


Рис. 1. Кинематическая схема обработки заготовки потоковой галтовкой

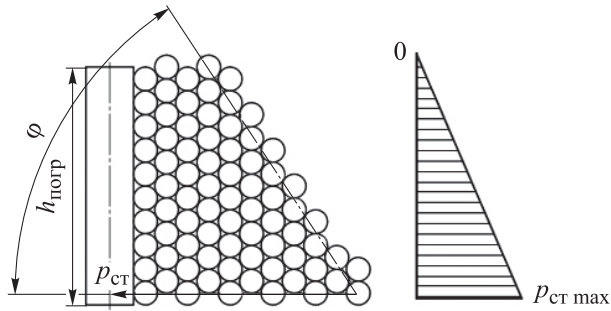


Рис. 2. Схема распределения статического давления АМ по глубине погружения заготовки в АМ

и заготовки в плоскости, совпадающей с ее осью. Давление, оказываемое абразивом, на заготовку следует подразделить на статическое (обусловленное собственным весом АМ) и динамическое (вызванное движением потока АМ).

*Статическое давление АМ на заготовку.* Так как АМ, по сути, является сыпучей средой, его динамику движения можно рассматривать с точки зрения сыпучих тел. В этом случае давление АМ на заготовку будет распределяться прямо пропорционально высоте его засыпки (рис. 2).

Согласно схеме, приведенной на рис. 2, и теории движения сыпучих тел, статическое давление АМ на заготовку определяется выражением [25, 26]

$$p_{ст} = \gamma h_{погр} K, \text{ Па}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — удельный вес АМ, Н/м<sup>3</sup>;  $h_{погр}$  — глубина погружения заготовки в АМ, мм;  $K$  — коэффициент бокового давления АМ.

Удельный вес АМ при обработке свободным абразивом зависит от размера гранул АМ, который варьируется, вследствие чего происходит неизбежное образование пустот между гранулами АМ. Поэтому удельный вес АМ можно рассчитать по формуле

$$\gamma = \frac{m_{гр} g}{V_{гр}}, \quad (2)$$

где  $m_{гр}$  — масса гранул АМ, г;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $V_{гр}$  — объем гранул АМ, м<sup>3</sup>.

Коэффициент бокового давления сыпучего материала [25, 26]

$$K = \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения или угол естественного откоса.

После подстановки соотношений (2) и (3) в формулу (1) получаем выражение для статического давления АМ

$$p_{ст} = \frac{m_{гр} g h_{погр} \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{V_{гр}}, \text{ Па}. \quad (4)$$

*Динамическое давление АМ на заготовку.* Согласно, закону Паскаля, давление определяют как отношение прилагаемой силы к площади поверхности. Указанную силу находят по второму закону Ньютона как произведение массы тела на ускорение, которое оно приобретает под действием силы.

В рассматриваемом случае масса тела, в качестве которого выступает АМ, представляет собой сумму масс гранул АМ, находящихся в контакте с заготовкой за определенный промежуток времени, так как АМ контактирует с заготовкой непрерывным потоком (рис. 3).

Количество гранул, находящихся в контакте с заготовкой, имеет вид

$$N = \frac{H_{заг} d_{заг} v_{п} t}{D_{шар}^3 2}, \text{ шт/мин},$$

где  $H_{заг}$  и  $d_{заг}$  — длина и диаметр заготовки, мм;  $t$  — время обработки, мин;  $D_{шар}$  — диаметр гранулы АМ, мм.

Исходя из этого, динамическое давление АМ на заготовку, вычисляется как

$$p_{дин} = \frac{m_{гр} v_{п}^2}{D_{шар}^3}, \text{ Па}. \quad (5)$$

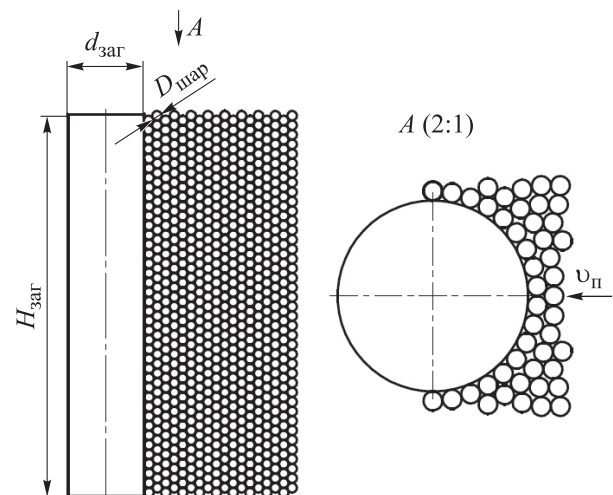


Рис. 3. Схема распределения гранул, находящихся в контакте с заготовкой

С учетом выражений (4) и (5) формула для расчета полного давления АМ, действующего на заготовку при обработке, приобретает вид

$$p = p_{ст} + p_{дин} = \frac{m_{гр} g h_{погр} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{V_{гр}} + \frac{m_{гр} v_{п}^2}{D_{шар}^3}, \text{ Па.} \quad (6)$$

Анализ выражения (6) позволяет заключить, что изменение скорости потока АМ влияет на оказываемое на заготовку давление в большей степени, чем глубина погружения заготовки в АМ. Также справедливо утверждать, что посредством скорости потока АМ можно управлять неравномерностью съема материала.

С помощью формулы (6) можно спрогнозировать возникающую в процессе потоковой обработки неравномерность съема материала и использовать это для управления отклонениями формы от заданной, полученными на предыдущих этапах обработки.

**Результаты.** Анализ полученных выражений позволяет сделать вывод о зависимости статического и динамического давлений от параметров АМ, среди которых основным является давление АМ на обрабатываемую поверхность. При этом статическое давление АМ  $p_{ст}$  прямо пропорционально глубине погружения заготовки в АМ  $h_{погр}$  (рис. 4), а на динамическое давление АМ  $p_{дин}$  влияет скорость потока АМ  $v_{п}$  (рис. 5).

Как видно из рис. 4 и 5, статическое и динамическое давления АМ, оказываемые на заготовку при ее обработке, при небольшой скорости потока (до 100 м/мин) имеют соизмеримые значения, а, значит, соотношение этих

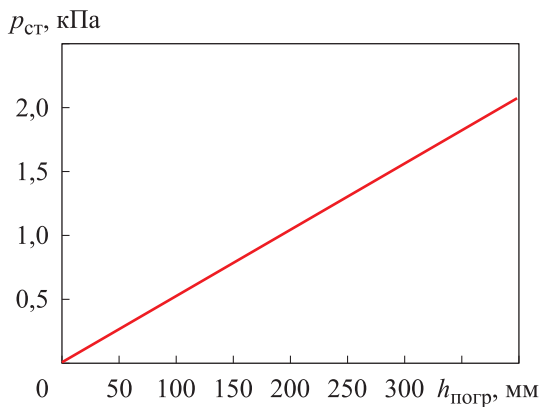


Рис. 4. Зависимость статического давления АМ  $p_{ст}$  от глубины погружения заготовки  $h_{погр}$

величин определяет зависимость неоднородности съема припуска от глубины погружения заготовки.

Зависимость полного давления АМ  $p$  от глубины погружения заготовки в АМ  $h_{погр}$  и скорости потока АМ  $v_{п}$  показана на рис. 6. Видно, что неравномерностью съема материала по длине заготовки можно управлять путем изменения глубины погружения заготовки в АМ и скорости потока АМ. Например, при скорости потока АМ более 175 м/мин полное давление АМ на заготовку стабильно инвариантно рассматриваемой глубине  $h_{погр}$ .

Возможность прогнозирования соотношения статического и динамического давлений позволяет получить заданную форму поверхности заготовки на этапе финишной обработки, либо нивелировать ее отклонения, возникшие на предыдущих операциях технологического процесса.

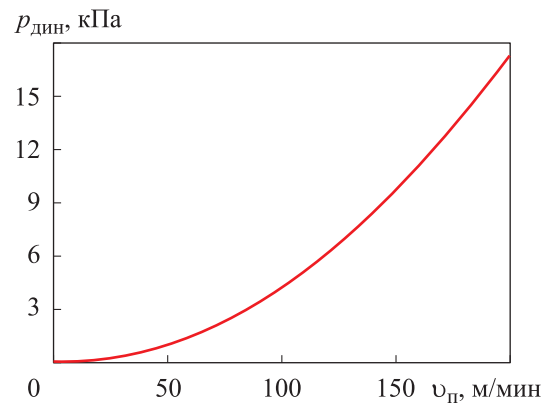


Рис. 5. Зависимость динамического давления АМ  $p_{дин}$  от скорости потока АМ  $v_{п}$

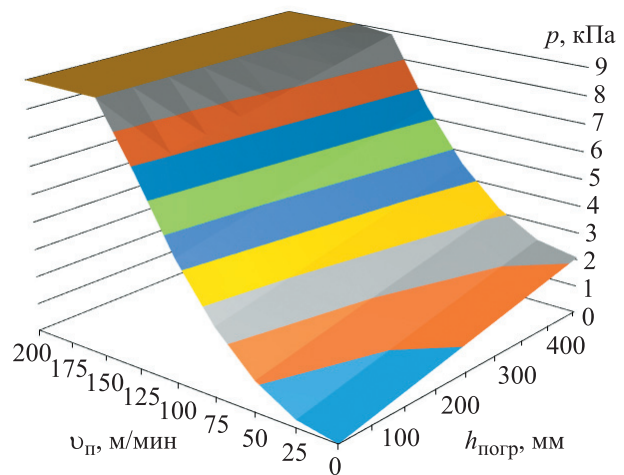


Рис. 6. Зависимость полного давления АМ  $p$  от глубины погружения заготовки в АМ  $h_{погр}$  и скорости потока АМ  $v_{п}$

## Выводы

1. С помощью свободного абразива можно обрабатывать сложнопрофильные детали, что находит все большее применение в промышленности. Такой метод обработки позволяет достичь очень низкой шероховатости поверхности. Кроме того, методы потоковой и буксирной галтовки достаточно легко поддаются автоматизации.

2. Предложена математическая модель обработки заготовки свободным абразивом методом потоковой галтовки, которая дает возможность управлять величиной съема материала по длине

заготовки путем изменения скорости потока АМ и глубины погружения заготовки в АМ. Это позволяет получить заданную неоднородность распределения припуска после обработки, либо исправить отклонения, возникшие на предыдущих этапах технологического процесса.

3. Дальнейшие исследования предполагают проведение экспериментального подтверждения выдвинутой гипотезы и разработку формализованного подхода, который позволит определять не только форму распределения съема материала с поверхности заготовки, но и абсолютную величину съема за единицу времени.

## Литература

- [1] Chikhacheva N.Y., Shchedrin A.V., Bekaev A.A. et al. Influence of the tool's surface microgeometry and the lubricant composition on hole precision in hybrid burnishing. *Russ. Engin. Res.*, 2022, vol. 42, no. 8, pp. 781–786, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2208010X>
- [2] Fanidi O., Kostryukov A., Shchedrin A. Predicting the burnishing force for cylindrical workpieces with a modified surface layer. *Strojnicky Casopis*, 2022, vol. 72, no. 1, pp. 35–48, doi: <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0004>
- [3] Kovalev A.A., Krasko A.S., Rogov N.V. Evaluation of the surface roughness of machine parts with wear-resistant gas thermal coatings during turning. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 6, pp. 540–547, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822050089>
- [4] Magomedov M.K., Gromov A.E., Yakovlev A.V. Adjustment of impact and laser systems when engraving materials with indeterminate characteristics. *Russ. Engin. Res.*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X22010130>
- [5] Yakovleva A., Isaenkova M., Minushkin R. The effect of combined processing on residual stresses in the surface layer of power plant parts. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 2, art. 420, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15020420>
- [6] Akulinichev P., Zenin I., Goncharov A. Choice of finishing and strengthening treatment method for cycloidal screw surfaces for multi-product production conditions. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 963, art. 012013, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012013>
- [7] Васильев А.С., Гончаров А.А. Специальная стратегия обработки сложнопрофильных конических винтовых поверхностей рабочих органов одновинтовых компрессоров. *Записки Горного института*, 2019, т. 235, с. 60–64, doi: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.60>
- [8] Vasiliev A.S., Goncharov A.A. Some aspects of problematics in designing technological complexes. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2018, vol. 184, art. 062033, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062033>
- [9] Гончаров А.А. *Технологическое обеспечение качества формообразования циклоидальных винтовых поверхностей при обработке непрофилированным инструментом на многоцелевых станках*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 107 с.
- [10] Гончаров А.А., Васильев А.С., Гемба И.Н. Современные методы обработки винтовых поверхностей роторов винтовых насосов. *Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева*, 2017, № 1, с. 202–208.
- [11] Gao Y., Zhao Y., Zhang G. et al. Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder. *Int. J. Mech. Sci.*, 2020, vol. 177, art. 105601, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105601>

- [12] Kacaras A., Gibmeier J., Zanger F. et al. Influence of rotational speed on surface states after stream finishing. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 71, pp. 221–226, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.067>
- [13] Mirsa A., Pandey P., Dixit U.S. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.*, 2017, vol. 131–132, pp. 853–867, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.023>
- [14] Акулиничев П.Д., Альбов М.А., Зенин И.О. и др. Современные методы финишной обработки циклоидальных винтовых поверхностей. *Справочник. Инженерный журнал*, 2021, № 9, с. 3–11, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2021.09.pp.003-011>
- [15] Семенов А. *Исследование применения промышленных роботов для центробежно-ротационной обработки в свободном абразиве*. Дисс. магистра. Томск, ТПУ, 2019. 135 с.
- [16] Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Ягмуров М.А. и др. Финишная обработка деталей в среде свободных абразивов. Анализ современного состояния. *Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий*, 2019, с. 154–157.
- [17] Trifanov V.I., Sukhanova O.A., Shcherbakova A.V. et al. Anodic process in magnetic-abrasion vibrational polishing of nonmagnetic materials. *Russ. Engin. Res.*, 2022, vol. 42, no. S1, pp. S96–S98, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X23010306>
- [18] Yamaguchi H., Srivastava A.K., Tan M. Magnetic Abrasive Finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 299–304, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.08.002>
- [19] Sacher C., Pössnicker D. Low-shear dosing of micro-encapsulated adhesives. *Adhes. Adhes. Sealants*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 21–23, doi: <https://doi.org/10.1365/s35784-013-0158-5>
- [20] Caitano T.L., Silva L.R., Machado A.R. et al. Influence of finishing post-treatment on drill rake and margin surfaces in the drilling of SAE 4144M steel. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2022, vol. 37, pp. 81–91, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.009>
- [21] Sakar M., Jain V.K., Sidpara A. On the flexible abrasive tool for nanofinishing of complex surfaces. *J. Adv. Manuf. Syst.*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 157–166, doi: <https://doi.org/10.1142/S0219686719500082>
- [22] Бабаев А.С., Чарторийский В.П. Технологии инновационной буксирной и потоковой финишной абразивной обработки изделий машиностроения, медицины и режущих инструментов. *Современный тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий*, 2017, с. 96–102.
- [23] Лаптев Н.В. *Исследование технологических возможностей буксирного полирования при обработке режущих инструментов*. Дисс. магистра. Томск, ТПУ, 2018. 133 с.
- [24] Акулиничев П.Д., Альбов М.А., Гончаров А.А. Современные математические модели обработки свободным абразивом. *Справочник. Инженерный журнал*, 2023, № 8, с. 11–16.
- [25] Федосеев В.Б., Гордеева А.Б., Зацаринная И.А. Теоретический расчет давления в емкостях, заполненных дискретной средой. *Вестник ДГТУ*, 2011, т. 11, № 2, с. 163–168.
- [26] Голынский М.Ю., Сиваков В.П. Определение давления технологической щепы на днище и стенки бункера. *Вестник Казанского технологического университета*, 2013, т. 16, № 15, с. 42–43.

## References

- [1] Chikhacheva N.Y., Shchedrin A.V., Bekeev A.A. et al. Influence of the tool's surface microgeometry and the lubricant composition on hole precision in hybrid burnishing. *Russ. Engin. Res.*, 2022, vol. 42, no. 8, pp. 781–786, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2208010X>
- [2] Fanidi O., Kostyukov A., Shchedrin A. Predicting the burnishing force for cylindrical workpieces with a modified surface layer. *Strojnický Casopis*, 2022, vol. 72, no. 1, pp. 35–48, doi: <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0004>
- [3] Kovalev A.A., Krasko A.S., Rogov N.V. Evaluation of the surface roughness of machine parts with wear-resistant gas thermal coatings during turning. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 6, pp. 540–547, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822050089>

- [4] Magomedov M.K., Gromov A.E., Yakovlev A.V. Adjustment of impact and laser systems when engraving materials with indeterminate characteristics. *Russ. Engin. Res.*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X22010130>
- [5] Yakovleva A., Isaenkova M., Minushkin R. The effect of combined processing on residual stresses in the surface layer of power plant parts. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 2, art. 420, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15020420>
- [6] Akulinichev P., Zenin I., Goncharov A. Choice of finishing and strengthening treatment method for cycloidal screw surfaces for multi-product production conditions. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 963, art. 012013, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012013>
- [7] Vasilyev A.S., Goncharov A.A. Special strategy of treatment of difficulty-profile conical screw surfaces of single-screw compressors working bodies. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2019, vol. 235, pp. 60–64, doi: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.60> (in Russ.).
- [8] Vasiliev A.S., Goncharov A.A. Some aspects of problematics in designing technological complexes. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2018, vol. 184, art. 062033, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062033>
- [9] Goncharov A.A. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva formoobrazovaniya tsikloidalnykh vintovykh poverkhnostey pri obrabotke neprofilirovannym instrumentom na mnogotselyvykh stankakh*. Diss. kand. tekh. nauk [Technological quality assurance of cycloidal helical surfaces shaping during machining with non-profile tools on multipurpose machine tools. Kand. tech. sci. diss.]. Moskva, Bauman MSTU Publ., 2020. 107 p. (In Russ.).
- [10] Goncharov A.A., Vasilyev A.S., Gemba I.N. Modern methods of screw-type pumps rotors helical surfaces processing. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva* [Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University], 2017, no. 1, pp. 202–208. (In Russ.).
- [11] Gao Y., Zhao Y., Zhang G. et al. Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder. *Int. J. Mech. Sci.*, 2020, vol. 177, art. 105601, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105601>
- [12] Kacaras A., Gibmeier J., Zanger F. et al. Influence of rotational speed on surface states after stream finishing. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 71, pp. 221–226, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.067>
- [13] Mirsa A., Pandey P., Dixit U.S. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.*, 2017, vol. 131–132, pp. 853–867, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.023>
- [14] Akulinichev P.D., Albov M.A., Zenin I.O. et al. Modern methods for finishing cycloidal screw surfaces. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal with Appendix], 2021, no. 9, pp. 3–11, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2021.09.pp.003-011> (in Russ.).
- [15] Semenov A. *Issledovanie primeneniya promyshlennykh robotov dlya tsentrobezhno-rotatsionnoy obrabotki v svobodnom abrazive*. Diss. magistra [Investigation of industrial robots application for centrifugal-rotary machining in free abrasive. Master's thesis.]. Tomsk, TPU Publ., 2019. 135 p. (In Russ.).
- [16] Tamarkin M.A., Kolganova E.N., Yagmurov M.A. et al. [Finishing machining of parts in the environment of free abrasives]. *Analiz sovremennogo sostoyaniya. Perspektivnye napravleniya razvitiya otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki i vibrovolnovykh tekhnologiy* [Analysis of a Modern State. Perspective Directions of Development of Finishing and Strengthening Machining and Vibro-Wave Technologies], 2019, pp. 154–157. (In Russ.).
- [17] Trifanov V.I., Sukhanova O.A., Shcherbakova A.V. et al. Anodic process in magnetic–abrasion vibrational polishing of nonmagnetic materials. *Russ. Engin. Res.*, 2022, vol. 42, no. S1, pp. S96–S98, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X23010306>
- [18] Yamaguchi H., Srivastava A.K., Tan M. Magnetic Abrasive Finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 299–304, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.08.002>
- [19] Sacher S., Pössnicker D. Low-shear dosing of micro-encapsulated adhesives. *Adhes. Adhes. Sealants*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 21–23, doi: <https://doi.org/10.1365/s35784-013-0158-5>
- [20] Caitano T.L., Silva L.R., Machado A.R. et al. Influence of finishing post-treatment on drill rake and margin surfaces in the drilling of SAE 4144M steel. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2022, vol. 37, pp. 81–91, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.009>

- [21] Sakar M., Jain V.K., Sidpara A. On the flexible abrasive tool for nanofinishing of complex surfaces. *J. Adv. Manuf. Syst.*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 157–166, doi: <https://doi.org/10.1142/S0219686719500082>
- [22] Babaev A.S., Chartoriyskiy V.P. [Innovative technologies of tow and streaming finish abrasive processing of mechanical engineering, medicine and cutting tools products]. *Sovremennyye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruktivnykh metalloobrabatyvayushchikh mashin i komplektuyushchikh izdeliy* [Modern Trends in Metalworking Technologies and Designs of Metalworking Machines and Components], 2017, pp. 96–102. (In Russ.).
- [23] Laptev N.V. *Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostey buksirnogo polirovaniya pri obrabotke rezhushchikh instrumentov*. Diss. magistra [Research of technological possibilities of tow polishing at machining of cutting tools. Master's thesis]. Tomsk, TPU Publ., 2018. 133 p. (In Russ.).
- [24] Akulinichev P.D., Albov M.A., Goncharov A.A. Modern mathematical models of processing with a free abrasive. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal with Appendix], 2023, no. 8, pp. 11–16. (In Russ.).
- [25] Fedoseev V.B., Gordeeva A.B., Zatsarinnaya I.A. Impact of defects on multilayer artificial feedforward neural network operability. *Vestnik DGTU* [Vestnik of Don State Technical University], 2011, vol. 11, no. 2, pp. 163–168. (In Russ.).
- [26] Golynskiy M.Yu., Sivakov V.P. Determination of process chips impressure on the hopper bottom and walls. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 15, pp. 42–43. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.08.2023

## Информация об авторах

**АКУЛИНИЧЕВ Павел Дмитриевич** — аспирант кафедры «Технологии машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [aka111996@mail.ru](mailto:aka111996@mail.ru)).

**АЛЬБОВ Максим Александрович** — аспирант кафедры «Технологии машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [maxim.albov@yandex.ru](mailto:maxim.albov@yandex.ru)).

**ГОНЧАРОВ Александр Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [al.goncharov@yandex.ru](mailto:al.goncharov@yandex.ru)).

## Information about the authors

**AKULINICHEV Pavel Dmitrievich** — Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [aka111996@mail.ru](mailto:aka111996@mail.ru)).

**ALBOV Maksim Aleksandrovich** — Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [maxim.albov@yandex.ru](mailto:maxim.albov@yandex.ru)).

**GONCHAROV Alexander Alexandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [al.goncharov@yandex.ru](mailto:al.goncharov@yandex.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Акулиничев П.Д., Альбов М.А., Гончаров А.А. Анализ влияния динамического воздействия абразивного материала на заготовку при обработке сложнопольных поверхностей потоковой галтовкой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 2, с. 44–51.

### Please cite this article in English as:

Akulinichev P.D., Albov M.A., Goncharov A.A. Analysis of the abrasive material dynamic action on a workpiece in machining the complex-profile surfaces with the flow tumbling. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 2, pp. 44–51.