

УДК 621.92

## Перспективы применения метода обработки потоком свободного абразива в машиностроении

Бабаян Валерия Вагановна(\*)

valeria.bbn1106@gmail.com

Акулиничев Павел Дмитриевич

apd@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена перспективам внедрения потоковой обработки свободным абразивом в современное машиностроение. Рассмотрены основные технологические аспекты метода. Проанализированы ключевые преимущества технологии: способность обеспечивать высокое качество поверхности в труднодоступных зонах, корректировать микрогеометрию и минимизировать ручной труд на финишных и отделочных операциях. Выявлены перспективные области применения, включая обработку лопаток ГТД, медицинских имплантатов и деталей аддитивного производства. Особое внимание уделено проблемам внедрения, связанным с недостаточной изученностью процесса, и путям их решения через цифровизацию и создание алгоритмов оптимизации. Обоснована необходимость дальнейшего изучения технологии.

**Ключевые слова:** потоковая обработка свободным абразивом, абразивная обработка, финишная обработка, отделочные методы, свободный абразив, сложнопрофильные поверхности

## Prospects for the application of the free abrasive stream machining in mechanical engineering

Babayan Valeria Vaganovna(\*)

valeria.bbn1106@gmail.com

Akulinichev Pavel Dmitrievich

apd@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** The paper explores the prospects of implementing free abrasive flow processing in modern mechanical engineering. It examines the technological aspects of the method. The key advantages of the technology are analyzed: its ability to ensure high surface quality in hard-to-reach areas, correct micro-geometry, and minimize manual labor in finishing operations. Promising application areas are identified, including the processing of gas turbine engine blades, medical implants, and additive manufacturing components. Particular attention is paid to implementation challenges related to the insufficient knowledge of the process and solutions through digitalization and the development of optimization algorithms. The necessity for further research into this technology is substantiated.

**Keywords:** stream finishing, abrasive machining, finishing, finishing methods, free abrasive, complex-shaped surfaces

**Введение.** С развитием машиностроения наблюдается устойчивая тенденция к усложнению конструкций машин и приборов. Это приводит к растущей необходимости производства деталей со сложной геометрией, а также делает

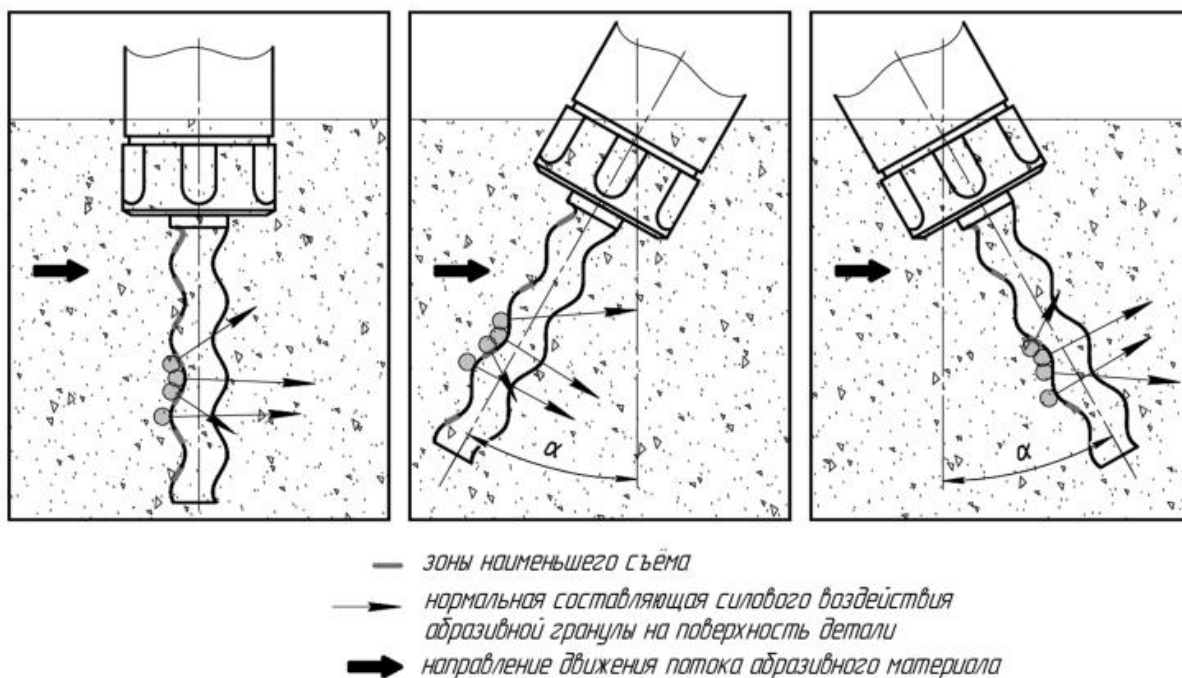
критически значимым влияние качества и точности обработки их поверхностей для обеспечения функциональных характеристик и долговечности изделий. Высокопроизводительная обработка деталей с труднодоступным расположением поверхностей является сложной технологической задачей [1–3]. Вместе с тем повышение качества поверхности (снижение шероховатости, скругление кромок, удаление заусенцев) на изделиях со сложным профилем сопряжено со значительными трудностями. К ним относятся большое разнообразие форм контуров, необходимость обработки материала в углублениях, карманах и других труднодоступных зонах. В связи с этим возникает потребность в разработке прогрессивных технологий обработки и создании специализированного оборудования.

При этом ключевыми задачами машиностроения остаются повышение производительности труда, снижение трудоемкости и себестоимости продукции при одновременном росте ее качества. Одним из перспективных направлений для решения указанных задач является интенсификация и расширение области применения существующих методов финишной обработки, в частности, абразивных.

**Материалы и методы.** Традиционные методы, такие как шлифование или хонингование, зачастую оказываются недостаточно эффективными и слабо адаптируемыми для обработки деталей со сложнопрофильными поверхностями. Перспективными в данном случае являются различные способы обработки свободным абразивом. Однако несмотря на то, что многие из этих методов демонстрируют высокую эффективность при удалении заусенцев, скруглении кромок и полировке, их применение для высокоточной отделки ограничено вследствие неравномерного съема материала и низкой управляемости процессом [3]. Особенно важно это в контексте небольших деталей с жесткими допусками.

Особый интерес представляет разновидность шпиндельной обработки, лишенная указанных недостатков, — потоковая обработка свободным абразивом. В основе метода лежит реализация комбинированного движения, при котором одновременно вращаются барабан с рабочей абразивной средой и шпиндель с закрепленной обрабатываемой деталью. Обработка происходит за счет столкновения движущейся системы абразивных частиц с поверхностью заготовки, в ходе которого возникает силовое воздействие, приводящее к микрорезанию и/или деформации микронеровностей.

Постоянное вращение обрабатываемой заготовки обеспечивает равномерное распределение съема со всех сторон заготовки, что положительно сказывается на сохранении формы сечения в направлении, перпендикулярном оси вращения. Существенное преимущество данного метода раскрывается при использовании прогрессивных установок с возможностью индексированного поворота шпинделя относительно его вертикальной оси. Это позволяет варьировать угол встречи участков поверхности детали с абразивными гранулами, благодаря чему снижается до минимума разница в интенсивности съема по выступам и впадинам. На рисунке показан пример использования данной особенности при обработке винтовой поверхности.



Изменение угла встречи потока абразива с обрабатываемой заготовкой

Изменение угла наклона шпинделя в процессе обработки позволяет добиваться впечатляющих показателей по сохранению постоянства формы, высокую степень обработки поверхности в мельчайших пазах, поднутрениях и переходных участках криволинейных поверхностей. С другой стороны, открываются возможности решения и обратной задачи при необходимости скорректировать профиль и снизить погрешность формы по выступам.

**Области применения.** Анализ существующих проблем в современной российской промышленности, а также изучение опыта внедрения обработки свободным абразивом в технологические процессы как отечественных производственных компаний, так и зарубежных, позволили выделить несколько перспективных направлений для внедрения рассматриваемого метода обработки:

1. Обработка изделий сложных аэродинамических профилей, таких как лопатки газотурбинных двигателей. Данное направление представляет особый интерес, поскольку позволит одновременно:

- повысить воспроизводимость и повторяемость деталей на выходе;
- повысить производительность и снизить трудоемкость отделочных этапов обработки (доля которых в среднем составляет 40 % от общего числа операций в ТП изготовления лопаток);
- минимизировать количество ручных операций в ТП изготовления лопаток;
- снизить общую себестоимость изготовления газотурбинных двигателей (поскольку изготовление лопаток составляет 20–30 % от всей трудоемкости изготовления ГТД).

2. Обработка винтовых поверхностей роторов. В данном случае использование потоковой обработки свободным абразивом на завершающих этапах изготовления позволит повысить качество поверхности вплоть до значений

Ra 0,08 без применения специальных инструментов и с сохранением широкой универсальности в контексте варьирующихся типоразмеров, и одновременно с этим нивелировать погрешности постоянства диаметра в продольном сечении, возникающие на предшествующих этапах формообразования.

3. Обработка и доводка изделий медицинского назначения, в том числе инструмента, приборов, имплантов. Использование рассматриваемой технологии позволит отойти от индивидуального подхода к отделочной обработке деталей, который связан с низким уровнем унифицированности конструкций.

4. Аддитивное производство — сглаживание поверхностей деталей после 3D-печати, включая внутренние полости. Существующие исследования подтверждают эффективность потоковой обработки свободным абразивом в данной области [4].

5. Прочие изделия машиностроительного производства, имеющие сложный профиль с высокими требованиями к качеству поверхности в своей конструкции, например, крыльчатки насосов и турбокомпрессоров, распределители и кулачки в автомобилестроении, шатуны и пр.

**Основные препятствия на пути использования метода.** Несмотря на широкий спектр возможностей и преимуществ метода потоковой обработки свободным абразивом, его широкое внедрение в производственные процессы на данный момент имеет ряд ограничений.

Главная проблема — недостаточная изученность и отсутствие алгоритмов для обработки отдельных типов деталей. Это обуславливается трудно описываемыми физико-механическими процессами, определяющими конечное состояние детали. Однако, на основе анализа существующих исследований можно выделить три ключевые группы факторов, описание и взаимная увязка которых позволит управлять процессом: режимы обработки (скорость потока, скорость вращения детали, время обработки, точки смены направлений, угол встречи потока), параметры абразивной среды (режущая способность, размер, форма, материал) и параметры детали (ее конфигурация и размеры, материал, состояние поверхности) [5, 6].

На основе вышеуказанных факторов, возможно говорить о наличии затруднений, связанных с необходимостью наработки большого объема практических данных в качестве подготовки производства перед внедрением метода в технологические процессы. Такой подход лишает гибкости при изменении номенклатуры, имеет ограниченную точность, повышает трудозатраты.

Ограниченный успех метода также обусловлен отсутствием открытых конкурирующих технологий и единичным числом производителей прогрессивного оборудования на рынке. Для вывода потоковую обработку свободным абразивом за рамки эмпирического подбора и справиться с возрастающей потребностью в высокопроизводительных финишных технологиях, необходим новый научно обоснованный и промышленно реализуемый подход, позволяющий автоматизировать выбор параметров по трем ключевым направлениям и сделать процесс действительно предсказуемым, воспроизводимым и высокопроизводительным.

**Закключение.** Проведенный анализ демонстрирует, что потоковая обработка свободным абразивом представляет собой высокоперспективную технологию для решения актуальных задач финишной обработки сложнопрофильных деталей. Несмотря на наличие ряда проблем, связанных с недостаточной формализацией процесса и необходимостью накопления эмпирических данных, потенциал технологии для индустриализации является значительным, в том числе и благодаря широким возможностям автоматизации.

Исследования, направленные на формализацию и получение математического описания процесса, также перспективны с точки зрения дальнейшей разработки алгоритмов оптимизации режимов обработки, а это является прямым путем к интеграции метода в концепцию Индустрии 4.0. Такой подход позволит создавать технологические ячейки с автоматической переналадкой, где параметры обработки в реальном времени адаптируются под конкретную деталь.

#### Список источников

- [1] Hashimoto F. et al. Abrasive fine-finishing technology. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 2016, vol. 65 (2), pp. 597–620. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.003>
- [2] Димов Ю.В. *Обработка деталей эластичным инструментом*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2007, 352 с.
- [3] Тамаркин М.А. *Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами*. Дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 1995.
- [4] Turangan C., Ming S., Itoh S., Ho J. Development of Rheology and Computational Flow Model for Robotized External Finishing on Additively Manufactured Components. *Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_24)
- [5] Itoh S., Ho J., Kasi S., Kum C. Influence of Component Toolpath on Material Removal Distribution in Stream Finishing. *The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT 2019)*. 2019.
- [6] Na W., Tingting Z., Sheng-Qiang Y. et al. Experiment and simulation analysis on the mechanism of the spindle barrel finishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, pp. 57–74. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05609-y>