

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-129-138

Асаев А.С.

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета

E-mail: asaev\_a\_s@mail.ru

## МЕТОДОЛОГИЯ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА КАВИТАЦИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД

**Аннотация.** В статье впервые систематизированы методы отделочной обработки деталей свободным абразивом с применением эффекта кавитации многокомпонентных сред. Описаны условия реализации данных методов и основные параметры качества обрабатываемых поверхностей. Эффект кавитации в зависимости от способа его образования используется как интенсифицирующее силовое воздействие для реализации процесса отделочной обработки деталей свободным абразивом в жидкой многокомпонентной среде. Такие среды способны эффективно обрабатывать детали, имеющие сложный профиль поверхности и выполненные из материалов с особыми физико-механическими свойствами. В статье представлена аналитическая экспериментальная информация о производительности отделочной обработки свободным абразивом для различных материалов на основе, которой возможно прогнозировать основное время отделочной обработки, а также изменение линейных размеров. Методы отделочной обработки могут быть эффективно применены в единичном производстве при обработке таких деталей как: лопатки двигателей, детали для суставного протезирования, детали топливной аппаратуры, инструменты для пластического деформирования, оптические изделия и другие. Использование интенсифицирующего кавитационного воздействия на жидкие несущие среды позволяет использовать уникальные абразивные свойства сверхтвёрдых порошков кубического нитрида бора и синтетических алмазов.

**Ключевые слова:** отделочная обработка, кавитация, свободный абразив, финишная обработка, вихревая кавитация

**Введение.** Достижение требуемого качества производства и эксплуатационной надежности машин и летательных аппаратов является неотъемлемым условием обеспечения технологического суверенитета России, импортоопережения и конкурентоспособности [1].

Отделочная обработка как заключительная стадия технологического процесса производства деталей машин оказывает существенное влияние на их эксплуатационные характеристики и занимает значимую часть в структуре трудоёмкости производства [2].

Анализ состояния производственной деятельности АО «ОДК-ПМ», АО «Московский инструментальный завод», АО «ЛЗОС», АО «ГРПЗ», АО «Моринсис-Агат-КИП», ООО ЗВК «Бервел», ООО «ЗИВ», ООО «ТФП ИМПУЛЬС» и других предприятий, а также технической и научной литературы показал, что в сфере обеспечения заданного качества при реализации технологических процессов отделочной обработки деталей, имеющих сложный профиль поверхности или выполненных из материалов с особыми физико-механическими свойствами (труднообрабатываемых), имеется широкий спектр актуальных технологических проблем, приводящих к значительному росту трудоемкости. К таким деталям следует отнести лопатки ТВД, детали для суставного протезирования, детали топливной аппара-

туры, инструменты для пластического деформирования, оптические изделия и другие. По отдельным группам деталей комплекс отделочных операций выполняется вручную и брак на заключительных стадиях технологического процесса составляет до 30 %.

Одним из возможных направлений повышения эффективности технологических процессов отделочной обработки является применение интенсифицирующего кавитационного воздействия на абразивные поликомпонентные среды (суспензии). А именно применение для изготовления деталей машин низкочастотной вибрационной, вихревой и присоединённой, ультразвуковой кавитации несущих сред или комбинированного способа активации с наложением ультразвукового или электроэрозионного воздействия [3].

Наличие эффекта кавитации в значительной степени увеличивает кинетическую энергию технологической среды, в которой он возникает. Что делает перспективным применение эффекта кавитации поликомпонентных сред в процессе отделочной обработки деталей машин свободным абразивом [4, 5].

**Методика.** Сущность рассматриваемых методов отделочной обработки заключается в применении свободного абразива, получающего энергию от кавитирующей технологической среды. Процесс абразивной обработки поверхно-

сти детали происходит за счет хаотичного высокоскоростного перемещения абразивных зерен. Продукты абразивного износа свободно отводятся интенсивными потоками технологической среды. [6]

Поликомпонентная среда содержит свободный абразив или их композицию, базовую жидкость с присадками, обеспечивающими ее необходимые физико-химические свойства. Абразивная обработка может быть комбинирована с электроэрозионной и ультразвуковой очисткой.

В зависимости от геометрических особенностей обрабатываемых деталей предложено четыре технологических схемы (метода) реализации отделочной обработки:

- **обработка внешней поверхности малогабаритных тел вращения свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации.** Ключевой особенностью такого метода обработки деталей машин свободным абразивом является использование обрабатываемой детали в качестве активатора поликомпонентной среды [7]. Технологическое устройство, квитирующая многокомпонентная технологическая среда и вращающаяся деталь образуют синергетическая систему. Процесс обработки представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Фото процесса обработки детали свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации

- **отработка сквозных и глухих отверстий в малогабаритных деталях с применением вибрационной низкочастотной кавитации.** Вибрационное воздействие обеспечивается использование электродинамических или вибраци-

онных стенов. Для реализации обработки необходима разработка специальных приспособлений, обеспечивающих заполнение обрабатываемого отверстия гетерогенной средой. Пример эскиза приспособления для обработки внутренней поверхности детали представлен на рисунке 2.

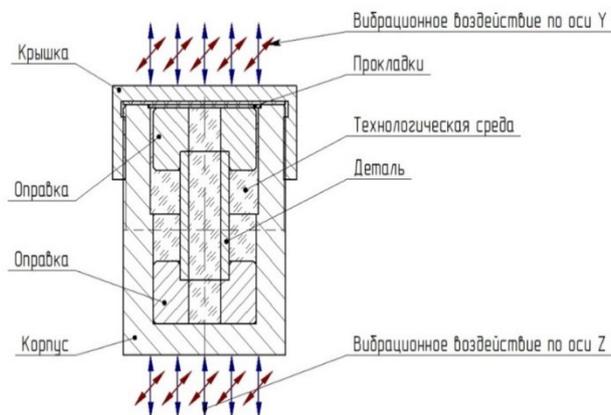


Рис. 2. Схема реализации механизма отделочной обработки детали свободным абразивом с применением эффекта вибрационной кавитации

- **обработка внешних и внутренних поверхностей деталей сложной формы с применение эффекта вихревой кавитации.** Обработка реализуется в специально разработанных устройствах, содержащих ротора для продуцирования кавитации и базовые поверхности для закрепления деталей. Данная система обработки является наиболее универсальной и может применяться для широкой номенклатуры деталей по форме, в том числе: лопатки ТВД, критические сопла, оптические изделия, инструмент для пластического деформирования. Процесс обработки оптических изделий в малогабаритном устройстве представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Оборудование для обработки оптических изделий свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации

Также разработано устройство для отделочной обработки различных габаритных размеров, которое имеет следующие отличительные характеристики и представлено на рисунке 4:

- устройство имеет группу роторов, что позволяет продуцировать эффект вихревой кавитации во всем объеме устройства;

- продуцирование эффекта вихревой кавитации позволяет обеспечить равномерное распределение абразивных частиц в жидкой несущей среде и позволяет использовать абразивный материал размером фракции до 1 мм [8];

- устройство снабжено съемным вращающимся столом для закрепления деталей, что позволяет повысить равномерность обработки деталей и обеспечить удобство реализации работ по установке и снятию деталей, выполняя их вне корпуса устройства;

- корпус устройства имеет отверстия для слива и наполнения, что позволяет удалить рабочую среду из устройства без съема деталей, тем самым обеспечивается возможность реализации многопериодных процессов, требующих последовательной смены размера абразивных частиц с предварительной промывкой рабочего объема корпуса устройства.

Детали по одной или группой улавливаются на вешающемся столе. Благодаря возможности удалить рабочую среду из устройства без съема деталей обеспечивается возможность реализации многопериодных процессов, требующих последовательной смены размера абразивных частиц с предварительной промывкой рабочего объема корпуса устройства.

Фото опытного образца устройства представлено на рисунке 4.



Рис. 4. Оборудование для реализации отделочной обработки с применением эффекта вихревой кавитации с наложением комбинированного ультразвукового или электроэрозионного воздействия

- **обработка внешних и доступных внутренних поверхностей деталей сложной формы с применением эффекта вихревой кавитации с наложением комбинированного ультразвукового или электроэрозионного воздействия.** Примером может служить способ изготовления рабочих валков прокатного стана холодной прокатки, который включает отжиг, редуцирование с двукратным обжатием, закалку, шлифование, совмещенную отделочную обработку свободным абразивом и катодную обработку.

После шлифования валок помещается в устройство для отделочной обработки, по конструкции соответствующее патенту RU 210921 U1. Шероховатость поверхности валка снижается с увеличением времени обработки, за 21 минуту работы достигается шероховатость поверхности Ra 0,1 мкм. Режимы отделочной обработки, совмещенной с анодной: частота вращения роторов  $n_r = 14\ 000$  мин.<sup>-1</sup>; зернистость абразива – менее 10 мкм; состав рабочей среды, г/дм<sup>3</sup>: азотнокислый хром Cr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – 100; стеариновая

кислота – 70; диметилполисилоксан – 30 (пеногаситель), полиэтиленгликоль-моноолеат – 30 (пеногаситель); плотность тока 40–70 а/дм<sup>2</sup>.

Совмещенная анодная и отделочная обработка свободным абразивом с применением эффекта кавитации поликомпонентных сред позволяет значительно сократить трудоемкость процессов полирования, а также снизить концентрацию химически активных веществ, в частности азотнокислого хрома.

#### Основная часть

Для **всех устройств** отделочной обработки с применением эффекта кавитации в качестве рабочей среды используется гетерогенная среда следующего состава:

- жидкая несущая среда представляет собой смазывающие охлаждающие технологические среды на водной основе (используемые для процесса резания), которая занимает 15...50 % от объема свободного пространства корпуса устройства;

- абразивные порошки в количестве 30...65 % от объема свободного пространства корпуса устройства.

Сочетание состава смеси абразивных частиц, время обработки, скорости вращения роторов и стола устройства предварительно подбирают для каждого типа деталей, в зависимости от ее формы и требуемых параметров шероховатости поверхности. [9]

В качестве жидкой (несущей) среды рекомендуется применять следующие композиции:

- для обработки цветных сплавов на основе алюминия и меди: вода с добавлением 3–5 % стеариновой кислоты, лимонной кислоты, ингибиторов коррозии, цитрата натрия, NH<sub>4</sub>ПАК или NH<sub>4</sub>ПМАК;



Рис. 5. Фото процесса подготовки рабочей поликомпонентной среды

- для обработки сталей и сверхтвердых материалов: вода с добавлением 5 % ингибиторов коррозии, ПАВ, пеногасителей и цитрат натрия;

- для обработки, совмещенной с анодной: вода, азотнокислый хром Cr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, стеариновая

кислота, диметилполисилоксан, полиэтиленгликоль, цитрат натрия, или NH<sub>4</sub>ПАК [10].

1 При проведении оптимизации технологических параметров обработки в качестве целевой функции чаще всего используют трудоемкость, что в свою очередь вызывает необходимость получения как можно более точной математической модели зависимости времени обработки от требуемых параметров качества обработки.

2 Представленные, в технической литературе по шлифованию и полированию инструментами на жесткой и гибкой связках, теоретические зависимости удаления металла и формирования профиля обработанной поверхности не могут без их оптимизации быть применены для определения времени обработки детали свободными абразивами в поликомпонентных средах, интенсифицируемых кавитационным воздействием. Применение поликомпонентных сред, находящихся в нестационарных условиях в свою очередь существенно усложняет вероятностную модель образования профиля поверхности как суперпозиции следов единичного режущего зерна с учетом упруго-напряженных состояний материала. Возникает необходимость провести расчеты по упрощенным зависимостям, дающим хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований [11].

3 Наиболее технологически значимым временем отделочной обработки является период по достижению установившейся шероховатости, с заданными значениями максимальной глубины профиля [12].

4 Учитывая результаты прогнозирования времени отделочной обработки, изложенные в работах М.А. Тамаркина, А.В. Сидиливой, А.П. Бабичева, основой его определения остается экспериментальное наблюдение и использование эмпирических зависимостей.

5 Полученная и представленная в таблице 1 зависимость не противоречит сложившимся представлениям об изменении шероховатости поверхности при обработке деталей свободными абразивами и факторах производительности, влияющих на этот процесс.

Выбор метода отделочной обработки и назначение основных его характеристик может быть реализован на основании следующей таблицы 2.

Одним из ключевых факторов, определяющих взаимодействие абразивной частицы и обрабатываемой поверхности, является определение вероятностной модели удаления материала в зоне обработки.

Зона обработки представляет собой область взаимного проникновения абразивных частиц в обрабатываемый материал.

Таблица 1

## Производительность отделочной обработки свободным абразивом

Группа по ISO	Подгруппа по ISO	Диапазон предела прочности на растяжение н/мм <sup>2</sup>	Диапазон твердости, НВ	Материал представитель	Величина съёма материала в единицу времени при обработке АСМ 60/40, мкм/мин
Р	низкоуглеродистая сталь	420	125	Ст 20	1,8
	средне и высокоуглеродистые стали	360–650	125–220	Ст 45	1,8
	легированные и инструментальные стали	650–1000	200–325	X12МФ	1,2
М	Аустенитная нержавеющая сталь	540–700	180	12X18Н10Т	0,85
N	Алюминиевые и магниевые сплавы	300	60–100	АМг6	2,75
	Стеклонаполненный полиамид	350	–	«Акулон»	1,9
	Углерод-углеродный композиционный материал	1200	400		0,2
S	Жаропрочные сплавы на основе никеля направленной кристаллизации	1450–1800	350–400	ЖС-36	0,25
	Титановые сплавы	265–490		BT-1	0,3
Н	Закаленная сталь	800	55 HRC	40X	0,45
-	Теплозащитные керамические и специальные покрытия	–	350–400	ПНХ20К20Ю13 + ZrO <sub>2</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18

К значимым параметрам состояния зоны обработки при отделочной обработке свободным абразивом относятся [13,14]:

- соотношение удаленной и не удаленной частей металла;
- динамические параметры несущей среды, подвергаемой воздействию эффекта кавитации;
- переходные гидродинамические процессы в граничных областях контакта многокомпонентной среды с заготовкой, оборудованием;
- процессы тепловыделения;
- процессы пластических деформаций обрабатываемого материала;
- процессы износа и разрушения абразивного материала;
- процессы физического и химического воздействия многокомпонентной среды с обрабатываемым материалом.

В основе подхода рассматривается гипотеза, что шероховатость при отделочной обработке формируется за несколько последовательных контактов поверхности с абразивной частицей. При Основные соотношение и эмпирические степенные коэффициенты определения шероховатости вышеизложенных положений определены и подробно проанализированы в работах Ю.К. Новоселова, Б.М. Малкина и А.Г. Суслова и других исследователей [5, 15].

Учитывая физические процессы обработки

свободным абразивом в жидкости, для определения шероховатости при реализации процесса отделочной обработки свободным абразивом в жидкости предложим эмпирическую зависимость, представленную формулой [1].

$$R_a = \frac{0,25H_{\phi}^{0,6}}{K_c^{0,4}V_{cp}^{0,4}n_3^{0,4}\rho^{0,2}} \quad (1)$$

$K_c$  – коэффициент стружкообразования (он показывает, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски навалы);  $n_3$  – концентрация абразива единиц/мкм<sup>2</sup>;  $H_{\phi}$  – значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, мкм;  $V_{cp}$  – средняя скорость несущей жидкости м/с;  $\rho$  – радиус при вершине абразивного зерна, мкм;

Для отделочной обработки свободным абразивом в жидкости примем  $K_c = 0,2$  [16].

Учитывая применение кавитационных гидродинамических процессов значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, определим экспериментально для различных диапазонов зернистости абразивного зерна. Исходя из того что, максимальную абразивную способность, из размариваемых далее материалов, имеют зерна АСМ и АС эксперименты по определению фактической

глубины слоя, в котором распределена шероховатость проведем для наиболее часто используемых абразивных материалов, часть из которых представлено в таблице 3.

Таблица 2

**Систематизация методов отделочной обработки и основные параметра качества при их реализации**

Метод	Характеристика поверхности	Рекомендуемый диапазон шероховатости поверхности	Отклонения формы поверхностей	Рекомендуемый диапазон значений точности линейных размеров
Метод финишной обработки внутренних поверхностей свободным абразивом с применением эффекта вибрационной кавитации	Внутренние поверхности с переменным радиусом, сквозные и глухие отверстия диаметром более 0,4 мм, без ограничения соотношения L/D.	Ra 0.8 – 0.16	Бочкообразность не более 0,05 мм  Выпуклость торца (дна) не более 0,05 мм	7 – 8
Метод финишной обработки зубчатых колес свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации	Зубчатое колесо, вал шестерня с модулями от 0,5 до 2	Ra 1.0 – 0.48	6 – 8 класс точности	
Метод финишной обработки оптических изделий свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации	Тела, имеющие возможность механического крепления за необрабатываемую поверхность, с габаритными размерами, не превышающими 200 мм.	Ra 0.1 – 0.016	Скругление острых кромок не более 0.05 мм Выпуклость не более 0.01 мм	
Метод отделочной обработки деталей свободным абразивом с применением вихревой кавитации	Внешняя и внутренняя поверхность с габаритными размерами пазов и глухих отверстий более 1,2 мм, а также соотношении L/D не более 2,5. Тела, имеющие сквозные отверстия диаметром более 1,2 мм при соотношении L/D не более 4.	Ra 1.6 – 0.1	Скругление острых кромок не более 0,05 мм  Выпуклость не более 0,01 мм	6 – 8
Метод обработки малогабаритных, осесимметричных деталей на основе активационного воздействия присоединенной кавитации	Может быть обработана внешняя поверхность осесимметричных деталей. Обработка пазов не предусмотрена	Ra 0.63 – 0.16	Конусообразность не более 0,05 мм	7 – 8
Метод отделочной обработки деталей свободным абразивом с применением вихревой и ультразвуковой кавитации	Внешняя и внутренняя поверхность с габаритными размерами пазов и глухих отверстий более 0,8 мм, а также соотношении L/D не более 2,5. Сквозные отверстия диаметром более 0,8 мм при соотношении L/D не более 4.	Ra 1.0 – 0.016	Скругление острых кромок не более 0.05 мм	5 – 8

Таблица 3

**Значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, в зависимости от размера абразивного зерна**

Значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, мкм	Марка и размер абразивного зерна, мкм
1,94	АСМ 40/60
3,02	АС-6 160/200
3,44	АС-32 315/250

Средняя скорость несущей жидкости может быть определена в результате моделирования кавитационных процессов и зависит от значитель-

ного количества переменных и находится в пределах от 80 до 300 м/с. Значения средней скорости воды как несущей среды, без учета ПАВ имеют следующие значения, представленные в таблице 4.

Таблица 4

**Значения средней скорости несущей жидкости, для развитой кавитации, в зависимости от способа ее образования**

Вср.– средняя скорость несущей жидкости м/с, для развитой кавитации	Способ образования кавитации, для устройств, описанных в главе 3
110	Вибрационная
85	Присоединенная
250	Вихревая

Таблица 5

**Расчётные значения степенного коэффициента показателя объемной концентрации абразива**

Расчётный степенной коэффициент показателя $n$ – объемная концентрация абразива в %	Марка и размер абразивного зерна, мкм	Фактическая установившаяся шероховатость, $R_a$	Время обработки, мин
0,24	АСМ 4/16	0,256	20
0,2	АСМ 40/60	0,617	20
0,18	АС-6 160/200	1,684	15
0,16	АС-32 315/250	2,451	15
Среднее арифметическое значение степенного коэффициент показателя $n$ – 0,2			

Для определения эмпирических коэффициентов проведена серия экспериментов по обработке деталей, выполненных из стали У8А, свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации, данные представлены в таблице 5. Степенные показатели других переменных, предложенные Ю.К. Новоселовым для определения шероховатости при шлифовании, используются без изменений.

**Выводы**

В статье впервые систематизирована связь режимов отделочной обработки свободным абразивом с применением эффекта кавитации с параметрами качества и конструктивными особенностями оборудования для реализации ее реализации. Определены рекомендации по выбору метода отделочной обработки свободным абразивом в зависимости от габаритных и конструктивных особенностей обрабатываемых деталей.

Технико-экономическая эффективность внедрения рассматриваемых методов отделочной обработки свободным абразивом с применением интенсифицирующего кавитационного воздействия на поликомпонентные среды обусловлена следующими факторами:

- оборудование для реализации кавитационной отделочной обработки имеет технологичную и простую конструкцию, а соответственно низкую стоимость производства и обслуживания по сравнению с классическим металлорежущим оборудованием;

- минимизация трудоемкости отделочной обработки деталей, имеющих сложный профиль поверхности и выполненных из материалов с особыми физико-механическими свойствами, по сравнению с широко применяемыми в промышленности методами;

- возможность регенерации абразивных материалов и технологических сред, позволяет обеспечить их многократное применение и высокий период стойкости.

Использование интенсифицирующего кавитационного воздействия на жидкие несущие среды позволяет использовать уникальные абразивные свойства сверхтвёрдых порошков кубического нитрида бора и синтетических алмазов. Таким образом, предлагаемая методология отделочной обработки может быть практически применена в единичном и серийном производстве при обработке, имеющих сложный профиль по-

верхности или выполненных из труднообрабатываемых материалов, в том числе: лопатки двигателей, детали для суставного протезирования, детали топливной аппаратуры, инструменты для пластического деформирования, оптические изделия и другие.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года, утверждена распоряжением Правительства РФ от 05.11.2020 № 2869-р.
2. Тихонов А.А., Тихонов А.А. Изменение шероховатости поверхности при гидроабразивной обработке // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию Липецкого государственного технического университета. 2016. С. 248–253
3. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Федоров А.В. Исследование процесса удаления заусенца при вибрационной обработке деталей радиоэлектронной аппаратуры // Вестник современных технологий. 2019. № 3 (15). С. 41–46.
4. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 343с.
5. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
6. Асаев А.С. Разработка метода финишной обработки деталей машин свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации : дис.... канд. тех, наук. М., 2016. С. 51–94.
7. Сидилева А.В. Оптимизация процесса многоступенчатой обработки свободными абразивами : дис.... канд. тех, наук. Ростов-на-Дону, 1998. С. 29–78.
8. Hong D.B., Yin Z.B., Guo F.Z. Improvement of cutting performance of high  $\chi$  value  $\alpha/\beta$ -Si-AlON ceramic cutting inserts via tailoring microstructure and oxidation behavior // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2023. 111(106087). 1247. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.106087
9. Hashish M. Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive Waterjets // Journ. of Engineering Materials and Technology. 2007. 199k - №3. Pp. 354–358. DOI: 10.1115/1.2903418
10. Haitao Liu, Fengtao Yan, Wenchuan Zhao. Fabrication of SiC of-axis aspheric mirror by using robot polishing. // The European Physical Journal Conferences. 2019. 215(9004). 193. DOI: 10.1051/epjconf/201921509004
11. Arinez J.F., Chang Q., Gao R.X. Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2020. Vol. 142. No. 11. Pp. 1–16. DOI: 10.1115/1.4047855
12. Dahat S., Hurtig K., Andersson J., Scotti A. A methodology to parameterize wire + arc additive manufacturing: a case study for wall quality analysis // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020. Vol. 4(1). 14. DOI: 10.3390/jmmp4010014
13. Matsunaga M., Hagiuda J. Vibratory Finishing-Fundamental Research (Institute of Industrial science. University of Tokyo) // Metal Finishing. 1965. Vol. 63(9). 10.
14. Wellman R. G., Deakin M. J., Nicholls J. R. The effect of TBC morphology on the erosion rate of EB PVDTBCs // Wear. 2005. Vol. 258. Pp. 349–356. DOI: 10.1016/j.wear.2004.04.011
15. Макаров А.В. Технология и оборудование для отделочно-зачистной обработки в свободных абразивных средах, уплотненных центробежными силами: дис.... канд. тех, наук. Старый Оскол, 2001. С. 93–106.
16. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Ягмуров М.А. Обоснование гранулометрических характеристик рабочей среды при вибрационной обработке деталей с малыми пазами и отверстиями // Advanced Engineering Research. 2020. № 4. С. 382–389. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-4-382-389

#### Информация об авторах

**Асаев Александр Семенович**, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетические системы и точное машиностроение. E-mail: asaev\_a\_s@maul.ru. Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета. Россия, 390000, Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53.

Поступила 11.04.2025 г.

© Асаев А.С., 2025

Asaev A.S.

Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University

E-mail: asaev\_a\_s@mail.ru

## METHODOLOGY OF FINISHING PROCESSING OF PARTS WITH FREE ABRASIVE USING THE CAVITATION EFFECT

**Abstract.** The article systematizes for the first time the methods of finishing processing of parts with a free abrasive using the effect of cavitation of multicomponent media. The conditions for the implementation of these methods and the main parameters of the quality of the treated surfaces are described. The cavitation effect, depending on the method of its formation, is used as an intensifying force action to implement the process of finishing parts with a free abrasive in a liquid multicomponent medium. Such media are capable of successfully processing parts with a complex surface profile and made of materials with special physical and mechanical properties. The article presents for the first time analytical experimental information on the productivity of finishing processing with a free abrasive for various materials based on which it is possible to predict the main time of finishing, as well as changes in linear dimensions. The methods of finishing can be effectively applied in single-piece production when processing such parts as: engine blades, parts for joint prosthetics, parts of fuel equipment, tools for plastic deformation, optical products and others. The use of intensifying cavitation action on liquid carrier media makes it possible to use the unique abrasive properties of superhard cubic boron nitride powders and synthetic diamonds.

**Keywords:** finishing, cavitation, loose abrasive, finishing, vortex cavitation

### REFERENCES

1. The strategy for the development of the machine tool industry for the period up to 2035 [Strategiya razvitiya stankoinstrumental'noy promyshlennosti na period do 2035 goda], approved by the order of the Government of the Russian Federation dated 05.11.2020 No. 2869-r.
2. Tikhonov A.A., Tikhonov A.A. Changes in surface roughness during waterjet machining [Izmeneniye sherokhovatosti poverkhnosti pri gidroabrazivnoy obrabotke]. Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of Lipetsk State Technical University. 2016. Pp. 248–253 (rus)
3. Tamarkin M.A., Kolganova Ye.N., Fedorov A.V. Study of the process of burr removal during vibration processing of parts of electronic equipment [Issledovaniye protsessy udaleniya zausentsy pri vibratsionnoy obrabotke detaley radioelektronnoy apparatury]. Bulletin of modern technologies. 2019. No. 3 (15). Pp. 41–46 (rus)
4. Khusu A.P., Vitenberg YU.R., Pal'mov V.A. Surface roughness. Probability-theoretical approach [Sherokhovatost' poverkhnostey. Teoretiko-veroyatnostnyy podkhod]. M.: Nauka, 1975. 343 p. (rus)
5. Suslov A.G. Technological support of the parameters of the state of the surface layer of parts [Tekhnologicheskoye obespecheniye parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detaley]. M.: Mashinostroyeniye, 1987. 208 p. (rus)
6. Asaev A.S. Development of a method for finishing machine parts with free abrasive using the effect of attached cavitation [Razrabotka metoda finishnoy obrabotki detaley mashin svobodnym abrazi- vom s primeneniye effekta prisoyedinennoy kavitatsii]: diss.... Cand. of Tech. Sciences. Moscow, 2016. Pp. 51–94. (rus)
7. Sidileva A.V. Optimization of the multi-stage machining process with loose abrasives [Optimizatsiya protsessy mnogostupenchatoy obrabotki svobodnymi abrazivami]: diss.... candidate of technical sciences. Rostov-on-Don, 1998. Pp. 29–78. (rus)
8. Hong D.B., Yin Z.B., Guo F.Z. Improvement of cutting performance of high x value  $\alpha/\beta$ -Si-AlON ceramic cutting inserts via tailoring microstructure and oxidation behavior. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2023. 111(106087). 1247. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.106087
9. Hashish M. Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive Waterjets. Journ. of Engineering Materials and Technology. 2007. 199k - №3. Pp. 354-358. DOI: 10.1115/1.2903418
10. Haitao Liu, Fengtao Yan, Wenchuan Zhao. Fabrication of SiC of-axis aspheric mirror by using robot polishing. The European Physical Journal Conferences. 2019. 215(9004). 193 DOI: 10.1051/epjconf/201921509004
11. Arinez J.F., Chang Q., Gao R.X. Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2020. Vol. 142. No. 11. Pp. 1–16. DOI: 10.1115/1.4047855
12. Dahat S., Hurtig K., Andersson J., Scotti A. A methodology to parameterize wire + arc additive manufacturing: a case study for wall quality analysis. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020. Vol. 4(1). 14. DOI: 10.3390/jmmp4010014

13. Matsunaga M., Hagiuda J. Vibratory Finishing-Fundamental Research (Institute of Industrial science. University of Tokyo). Metal Finishing. 1965. Vol. 63(9). 10.

14. Wellman R. G., Deakin M. J., Nicholls J. R. The effect of TBC morphology on the erosion rate of EB PVDTBCs. *Wear*. 2005. Vol. 258. Pp. 349–356. DOI: 10.1016/j.wear.2004.04.011

15. Makarov A.V. Technology and equipment for finishing and cleaning treatment in free abrasive environments compacted by centrifugal forces [Tekhnologiya i oborudovaniye dlya otdelochno-zachistnoy obrabotki v svobodnykh abrazivnykh

sredakh, uplotnennykh tsentrobezhnyimi salami] : diss.... Cand. of Engineering Sciences. Stary Oskol, 2001. Pp. 93–106. (rus)

16. Tamarkin M.A., Kolganova Ye.N., Yagmurov M.A. Justification of granulometric characteristics of the working environment during vibration processing of parts with small grooves and holes [Obosnovaniye granulometricheskikh kharakteristik rabochey sredy pri vibratsionnoy obrabotke detaley s malymi pazami i otverstiyami]. *Advanced Engineering Research*. 2020. No. 4. Pp. 382–389. (rus)

#### *Information about the authors*

**Asaev, Alexandr S.** PhD. E-mail: asaev\_a\_s@mail.ru. Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University. Russia, 390000, Ryazan, Pravo-Lybidskaya st., 26/53.

---

*Received 11.04.2025*

#### **Для цитирования:**

Асаев А.С. Методология отделочной обработки деталей свободным абразивом с использованием эффекта кавитации поликомпонентных сред // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-129-138

#### **For citation:**

Asaev A.S. Methodology of finishing processing of parts with free abrasive using the cavitation effect. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 6. Pp. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-129-138