

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №8 (170). С.11-20.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №8 (170). P.11-20.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-11-20

Повышение эффективности технологических процессов обработки деталей свободными абразивами

Михаил Аркадьевич Тамаркин¹, д.т.н.

Элина Эдуардовна Тищенко², к.т.н.

^{1,2} *Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия*

¹ *tehn_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>*

² *lina_tishenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>*

***Аннотация.** В современном машиностроении значительно возрастает роль финишной обработки деталей, которая обеспечивает формирование параметров поверхностного слоя с учетом их влияния на эксплуатационные свойства. Оптимизация технологических расчетов позволяет значительно увеличить длительность жизненного цикла обработанных деталей. Статья посвящена использованию обобщенной теории обработки деталей свободными абразивами при технологической подготовке производства в различных отраслях машиностроения. На основе обобщения опыта многолетних исследований разработана методика уточненных расчетов оптимальных технологических параметров обработки с использованием пакета прикладных программ Roski DEM. С использованием компьютерного моделирования процесса обработки свободными абразивами разработаны модели, описывающие динамику движения рабочей среды, съем металла с поверхности детали при обработке свободными абразивами и формирование шероховатости обрабатываемой поверхности, позволяющие учесть основные характеристики абразивных гранул, в том числе их форму, массу загрузки и расположение деталей в камере. На основании результатов комплексных экспериментальных исследований получены зависимости для расчета эксплуатационных характеристик рабочих сред, позволяющие осуществлять их рациональный выбор. Разработаны алгоритм и методика оптимизации технологических операций виброабразивной обработки, которые позволяют повысить эффективность ее применения при решении различных технологических задач.*

Ключевые слова: обработка в гранулированных абразивных средах, качество поверхностного слоя, оптимизация технологических процессов

Благодарности: авторы благодарят издателей журнала за внимательное отношение к публикации.

Для цитирования: Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Повышение эффективности технологических процессов обработки деталей свободными абразивами // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 8 (170). С. 11–20. doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-11-20

Improving parts processing procedure efficiency through loose abrasive working

Mikhail A. Tamarkin¹, D. Eng.

Elina E. Tishchenko², Ph.D Eng.

^{1,2} *Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

¹ *tehn_rostov@mail.ru*

² *lina_tishenko@mail.ru*

Abstract. In modern mechanical engineering, the significance of parts fine finish parts is gaining an importance, providing patterns for surface layer parameters, taking into account their influence on operational properties. Optimization of technological calculations makes it possible to increase the life cycle of worked parts. The article is devoted to the use of the unified theory for finishing parts through loose abrasive working in the technological preparation of production in various branches of mechanical engineering. Based on the generalization of the experience of many years of research, a methodology with revised calculations of optimal process-dependent parameters using the Rocki DEM application software package has been developed. Using computer modeling of finishing with loose abrasive working, models have been developed that describe the dynamics of the movement of the working medium, the removal of metal from the surface of the part under finish with loose abrasive working and the formation of roughness of the treated surface, taking into account the main characteristics of abrasive granules, including their shape, loading weight and the location of parts in the chamber. Based on the results of complex experimental studies, dependences have been obtained for calculating the operational characteristics of working environments, allowing for their rational choice. An algorithm and methodology for optimizing the technological operations of vibration-abrasive treatment have been developed, which make it possible to increase the efficiency of its use in solving various technological problems.

Keywords: treatment in granular abrasive media, surface layer quality, optimization of technological processes

Acknowledgments: The authors thank the publishers of the journal for their attentive attitude towards the publication

For citation: Tamarin M.A., Tishchenko E.E. Improving parts processing procedure efficiency through loose abrasive working / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 8 (170). P. 11–20. doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-11-20

Введение

Обработка деталей свободными абразивами применяется на машиностроительных предприятиях с середины XX в. в основном на финишных операциях получения изделий. Активное изучение процессов обработки в свободных абразивах в научных учреждениях страны началось в середине 60-х гг., когда профессором Бабичевым А.П. была создана научная школа вибрационных технологий на базе кафедры «Технология машиностроения» Ростовского института сельхозмашиностроения (ныне Донской ГТУ). Постепенно область научных исследований этой школы расширялась, к ней присоединялись другие научные школы, и к 1990-м гг. исследователи охватили значительную долю методов обработки свободными абразивами, таких как вибрационная абразивная обработка (ВиАО), центробежно-ротационная обработка (ЦРО), струйно-абразивная обработка (САО), турбоабразивная обработка (ТАО), магнитно-абразивная обработка (МАО), обработка свободным абразивом, уплотненным инерционными силами (ОСАУИС), гидроабразивная обработка (ГАО) и другие [1 – 15].

Несмотря на очевидные различия методов обработки деталей свободными абразивами процессы разрушения поверхностного слоя и формирования основных показателей

его качества подчиняются совокупности общих закономерностей влияния режимов обработки, характеристик абразивной среды и физико-механических свойств материала обрабатываемых деталей на скорость удаления металла и изменения шероховатости обрабатываемой поверхности, что позволяет высказать предположение о выводе общих закономерностей для расчета производительности и качества обработки.

Отсутствие жесткой кинематической связи между частицами абразивной рабочей среды и поверхностью обрабатываемой детали, позволяет вести обработку деталей сложной конфигурации и одновременно обеспечивать отсутствие прижогов и других дефектов поверхностного слоя характерных для процессов обработки связанным абразивом. Большим преимуществом использования методов обработки свободными абразивами является, во многих случаях, простота используемого оборудования и отсутствие необходимости создания промышленного оборудования соизмеримого по размерам с обрабатываемой деталью. Очевидным преимуществом является также возможность использования такого оборудования при различных типах производства машиностроительной продукции, а также отсутствие ограничений по его отраслям. Обработка свободными абразивами широко используется в различных отраслях промышленности при

обработке деталей из материалов разной обрабатываемости с целью получения оптимальных параметров поверхностного слоя детали, что в свою очередь позволяет значительно увеличить продолжительность их жизненного цикла.

Материалы и методы

Современное цифровое производство вызывает необходимость создания системы автоматизированного проектирования технологических процессов при использовании наукоемких методов обработки детали, обеспечивающих надежность формирования заданного качества обработанных деталей. К сожалению, во многих случаях большие затруднения вызывают отсутствие адекватных теоретических моделей процессов удаления металла и формирования параметров качества обработанной детали при обработке свободными абразивами. В значительной мере это связано с большим количеством технологических параметров, влияющих на результаты такой обработки.

Анализ работ в области использования методов обработки свободными абразивами [1 – 15] позволяет сделать вывод о возможности создания обобщенной теории методов обработки деталей свободными абразивами, так

как в основе происходящих процессов лежат динамическое взаимодействие абразивных частиц (гранул) с обрабатываемой поверхностью, наличие влияния соседних гранул на процесс единичного ударного взаимодействия, влияния формы, размеров гранул, их зернистости и структуры, а также совокупности свойств материалов обрабатываемых деталей.

Создание теории, позволяющей использовать общие закономерности единичного взаимодействия абразивных гранул с обрабатываемой поверхностью на основе многолетнего опыта научных исследований и практики, позволило получить положительные результаты, представленные в данной статье [1 – 3, 6 – 15].

Большое количество работ, в области обработки деталей свободными абразивами посвящена моделированию процесса ударного взаимодействия частиц рабочей среды с обрабатываемой поверхностью. К сожалению, в теории удара не получены зависимости для описания взаимодействия сферического индентора с деформируемым полупространством. При проведении теоретических исследований на кафедре «Технология машиностроения» ДГТУ получена зависимость для расчета съема металла, удаляемого при единичном соударении q [7 – 15]:

$$q = 15,5k_c k_3 R^3 \left(k_m^{0,5} v_0 \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3c\sigma_s}} \right)^2 (\text{ctg}\beta - f) \rho_{\text{д}}. \quad (1)$$

где k_c – коэффициент стружкообразования; k_3 – коэффициент влияния зернистости, R – радиус частицы; k_m – коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке; v_0 – скорость внедрения абразивной частицы; β – угол соударения абразивной частицы; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы; $\rho_{\text{д}}$ – плотность материала детали, σ_s – предел текучести материала детали, c – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности, f – коэффициент трения абразивного зерна по металлу.

Для вывода зависимости позволяющей производить расчет съема металла при обработке свободными абразивами использована методика вероятностного анализа. В основу создания обобщенной теории удаления металла

при обработке свободными абразивами заложены гипотезы о вероятности покрытия пятном контакта абразивной частицы любой точки квадрата упаковки частиц (при упаковке сферических частиц на поверхности детали по квадрату) и вероятность события, заключающегося в том, что соударение абразивной частицы с поверхностью детали приводит к микрорезанию, а не к пластическому, либо упругому деформированию локального объема металла (рассматривается случай косоугольного удара). Полученные зависимости имеют вид [8 – 9]:

$$Q = k_{\phi} k_{\text{т.ж}} P_1 P_2 f_{\text{в}} t q \frac{S_{\text{дет}}}{4R^2} \text{ при } S_{\text{дет}} > 4R^2 \quad (2)$$

$$Q = k_{\phi} k_{\text{т.ж}} P_1' P_2' f_{\text{в}} t q \text{ при } S_{\text{дет}} < 4R^2 \quad (3)$$

где P_1 – геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия массы абразивных частиц; P_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию; f_b – частота циклов воздействия массы абразивных частиц на поверхность детали; t – время обработки; q – съём металла при единичном взаимодействии k_ϕ – коэффициент учитывающий форму детали; $k_{т.ж.}$ – коэффициент учитывающий влияние технологической жидкости; $S_{дет}$ – площадь обрабатываемой детали.

Среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости обработанной поверхности при обработке в гранулированных абразивных средах можно определить по формуле:

$$Ra_{уст} = K \sqrt{\frac{h_{max} \cdot l_{ед}}{z_0}}, \quad (4)$$

где h_{max} – максимальная глубина внедрения частицы среды, $l_{ед}$ – единичная длина; z_0 – номинальное число вершин зерен над единицей поверхности связки, K – эмпирический коэффициент (определен для различных методов обработки в гранулированных абразивных средах).

Результаты исследований

Представленные теоретические зависимости прошли комплексную экспериментальную проверку. При проведении экспериментальных исследований на опытно-промышленном оборудовании для различных методов обработки свободными абразивами изменялся состав рабочих сред, их зернистость и грануляция, варьировались режимы обработки, обрабатывались детали из различных материалов. Сравнения теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований представлены на рис. 1 – 4. При этом результаты теоретических расчетов представлены сплошными кривыми, а результаты экспериментальных исследований – точками и величиной 95 % доверительных интервалов.

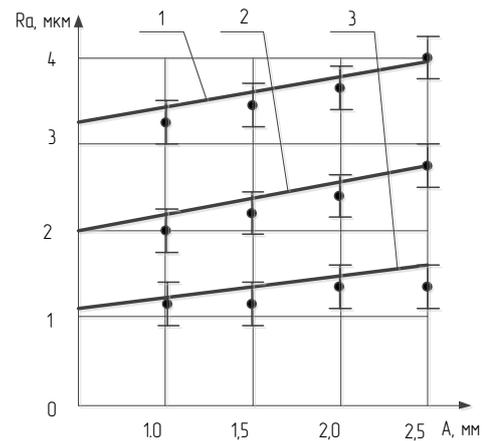


Рис. 1. Результаты исследования качества обработанной поверхности при виброабразивной обработке. Обрабатываемый материал – сталь 45, частота абразивного воздействия – 26 Гц. Абразивные гранулы: 1 – призма ПТ 25×25 (зернистость 25), 2 – конус (зернистость 16), 3 – призма ПТ 15×15 (зернистость 12)

Fig. 1. The results of a study of the treated surface quality during vibration-abrasive treatment. The treated material is 45 steel, the frequency of abrasive action is 26 Hz. Abrasive granules: 1 – PT prism 25×25 (grain size 25), 2 – cone (grain size 16), 3 – PT prism 15×15 (grain size 12)

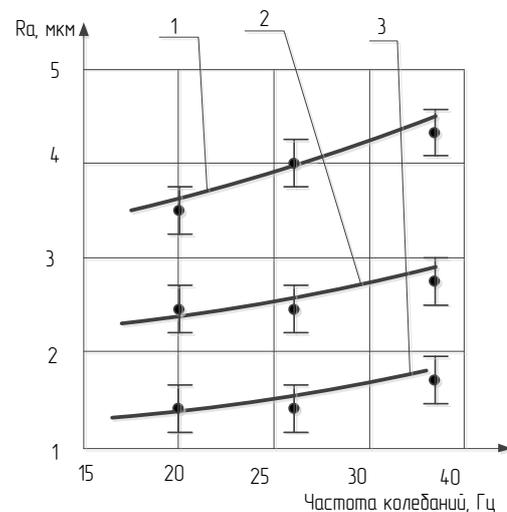


Рис. 2. Результаты исследования качества обработанной поверхности при вибрационной обработке. Обрабатываемый материал – сплав АВТ. Амплитуда абразивного воздействия – 2,5 мм. Абразивные гранулы: 1 – призма ПТ 25×25 (зернистость 25), 2 – конус (зернистость 16), 3 – призма ПТ 15×15 (зернистость 12)

Fig. 2. The results of the study of the quality of the treated surface during vibration treatment. The treated material is AWT alloy. The amplitude of the abrasive action is 2,5 mm. Abrasive granules: 1 – PT 25×25 prism (grain size 25), 2 – cone (grain size 16), 3 – PT 15×15 prism (grain size 12)

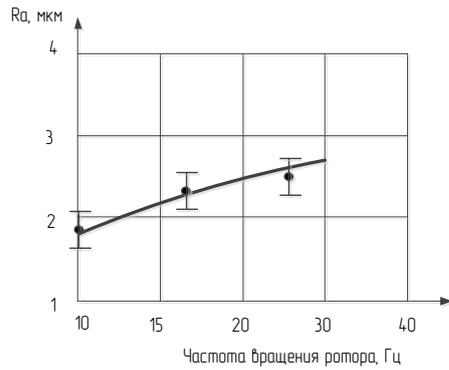


Рис. 3. Результаты исследования качества обработанной поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива. Обрабатываемый материал – сталь 45. Среда – фарфоровые шары

Fig. 3. Results of a study of the quality of the treated surface during centrifugal-rotational treatment in an abrasive medium. The treated material is 45 steel. Porcelain balls medium

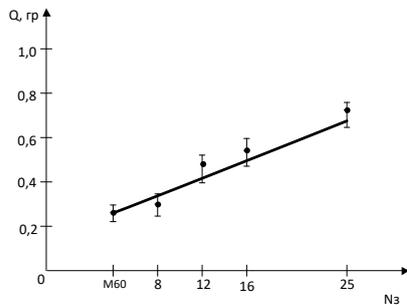


Рис. 4. Результаты исследования съема металла при вибрационной обработке. Обрабатываемый материал – алюминиевый сплав Д16. Режимы обработки: частота колебаний камеры – 26 Гц, амплитуда колебаний – 2,5 мм

Fig. 4. Results of a study of metal removal during vibroacoustic treatment. The treated material is aluminum alloy D16. Processing modes: the oscillation frequency of the camera is 26 Hz, the oscillation amplitude is 2,5 mm

Следующим этапом оптимизации технологических процессов обработки деталей свободными абразивами является обоснование выбора рабочих сред на основании учета их эксплуатационных характеристик, что позволяет обеспечить их минимальный износ при решении различных технологических задач, что положительно скажется на уменьшении себестоимости обработки. Предложена система эксплуатационных характеристик различных абразивных сред, аналогичная системе эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов, которая содержит следующие параметры: режущая способность, расход абразивной среды, удельный расход абразивной среды, процентный износ смеси абразива, коэффициент обработки, период стойкости абразивной среды [9, 10].

Определение величины эксплуатационных показателей требует проведения значительного количества экспериментальных исследований при обработке деталей из различных материалов в каждой рабочей среде. Для того, чтобы уменьшить объем экспериментальных исследований при технологическом проектировании процессов обработки свободными абразивами на основании опыта многолетних исследований разработан банк данных, позволяющих осуществлять рациональный выбор параметров абразивной среды. Элементы такого банка представлены в таблицах 1 и 2.

1. Эксплуатационные характеристики абразивных гранул из различных материалов при ВиАО образцов из стали 45.

1. Performance characteristics of abrasive granules made of various materials and samples made of 45 steel under VAT.

Технологические параметры / Вид связи	Единицы измерения	Керамическая	ЭД 16	Фарфоровые шары
Режущая способность, R	г/час·см ²	10,37	11,75	4,2
Расход абразивных гранул, I	г/час	0,092	0,374	0,124
Процентный износ, U	%/час	0,48	0,98	0,35
Коэффициент обработки, K	л/см ²	18,01	4,99	6,59
Установившаяся шероховатость, Ra	мкм	0,53	0,56	0,34

2. Эксплуатационные характеристики абразивных гранул из различных материалов при
ВиАО образцов из алюминия D16.

2. Performance characteristics of abrasive granules made of various materials and samples made of
aluminum D16 under VAT.

Технологические параметры / Вид связки	Единицы измерения	Керамическая	ЭД 16	Фарфоровые шары
Режущая способность, R	г/час·см ²	9,64	10,26	4,17
Расход абразивных гранул, I	г/час	0,113	0,397	0,149
Процентный износ, U	%/час	0,59	1,04	0,42
Коэффициент обработки, K	1/см ²	13,62	4,11	4,45
Установившаяся шероховатость, Ra	мкм	1,09	1,11	0,82

После создания обобщенных теоретических зависимостей, позволяющих прогнозировать производительность процессов обработки деталей свободными абразивами и параметры шероховатости обработанной поверхности, на кафедре «Технология машиностроения» ДГТУ проведены исследования интенсификации рассмотренных процессов путем введения в зону обработки дополнительной энергии. Например, в работе Санамяна В.Г. [9] рассмотрена новая разновидность процесса виброабразивной обработки, отличающаяся уплотнением массы загрузки рабочей камеры за счет установки подвижной крышки рабочей камеры с возможностью её вертикального перемещения. Установлено, что зависимость производительности обработки от давления рабочей среды имеет экстремум, объясняемый снижением подвижности элементов массы загрузки при превышении оптимального значения силы давления. Это позволяет повысить производительность виброабразивной обработки, в первую очередь, на черновых и получистовых операциях.

Установлено также, что при увеличении давления в технологической системе устраняются зоны, расположения которых в обычной камере создают недостаточную интенсивность ударного воздействия абразивных гранул. На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проектирования технологических процессов, обеспечивающих производительность обработки путем наложения дополнительного давления на массу загрузки вибрационной камеры.

В работе Вяликова И.Л. [12] исследована возможность повышения производительности и качества виброабразивной обработки путем наложения ультразвуковых колебаний на массу загрузки рабочей камеры вибрационных станков. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при такой схеме обработки имеет место кавитационное разрушение поверхностных слоев обрабатываемых деталей, которое приводит к более интенсивному удалению выступов исходной шероховатости. Установлены рациональные параметры режимов низкочастотных и ультразвуковых колебаний, обеспечивающих экономический эффект путем снижения себестоимости обработки. Разработаны схемы передачи энергии ультразвуковых колебаний от ультразвукового генератора массе загрузки рабочей камеры вибрационного станка. Разработана методика оптимизации этой разновидности комбинированной виброабразивной обработки деталей.

В работе Калмыковой Н.А. [3] интенсификация процесса обработки в абразивных гранулированных средах выполнена за счет комбинирования механической, тепловой и химической энергии. Установлено, что при таком виде комбинированного воздействия возможна интенсификация процесса нанесения покрытий за счет увеличения скорости диффузионных процессов в зоне контакта порошков из мягких металлов с обрабатываемой поверхностью. При ударе абразивной гранулы возможно образование ювенильных поверхностей, которое обеспечивает повышенное адгезионное взаимодействие порошков из

металлонаносимых покрытий с поверхностью детали. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проектирования рациональных технологических процессов представленного вида комбинированной виброабразивной обработки.

При анализе путей дальнейшего развития методов обработки свободными абразивами отмечено, что при проведении теоретических расчетов не удается адекватно учесть такие важные технологические параметры, как форма абразивных гранул, соотношение объема загрузки деталей и рабочей среды, хотя при проведении экспериментальных исследований установлено влияние этих параметров на производительность и качество обработки. Кроме того, следует учитывать, что конфигурация обрабатываемых деталей часто требует применения гранул, значительно отличающихся от типовой формы (шары, трехгранные призмы и цилиндры). Невозможность учета вышеуказанных характеристик на современном этапе теоретических исследований вызвала необходимость использования компьютерных моделей виброабразивной обработки при помощи применения современных пакетов прикладных программ. На основании анализа известных работ в области трения и износа установлено, что съем металла с поверхности обрабатываемых деталей при ВиАО можно эквивалентно описывать с использованием механизма абразивного изнашивания. Сотрудниками кафедры «Технология машиностроения» ДГТУ выбран пакет прикладных программ Rocky DEM, который, во первых, позволяет описывать динамику процессов абразивного воздействия в рабочих камерах вибрационных станков, во вторых, учитывать влияние формы абразивных гранул и режимов колебаний, и, в третьих, физико-механических свойств обрабатываемого материала, на производительность и качество обработки [8, 10].

При компьютерном моделировании с применением пакета Rocky DEM используется закон Арчарда, позволяющий дать оценку износа поверхности детали при ударном взаимодействии с гранулами абразива.

Поверхностный слой обрабатываемых деталей в пакете Rocky DEM разбивается на

множество треугольных участков, размеры которых определяются требуемой точностью расчетов. При косом ударе абразивной гранулы происходит изменение локального объема поверхностного слоя, при котором вершины этих участков сдвигаются внутрь. Для каждого участка вычисляется работа трения, выполняемая при соударении частицы с обрабатываемой поверхностью. Расчет работы трения для локального объема выполняется путем суммирования такой работы, производимой при всех столкновениях, происходящих внутри этого участка в течении одного временного шага.

Использование метода дискретных элементов, положенного в основу программ пакета Rocky DEM позволяет осуществить компьютерное моделирование поведения сыпучих материалов и частиц в зависимости от основных технологических факторов. Однако, для получения адекватных моделей необходимо провести значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, чтобы описать влияние основных технологических параметров на результаты обработки. В их число входят: параметр, учитывающий массу и форму обрабатываемых деталей, параметр, учитывающий материал обрабатываемых деталей, параметр соотношения массы деталей к массе среды, параметр, учитывающий твердость деталей, параметр, учитывающий размеры гранул среды, параметр, учитывающий форму гранул среды, параметр, учитывающий коэффициент трения гранул среды в зависимости от зернистости абразива, параметр, учитывающий расположение детали в камере, параметр, учитывающий амплитуду колебаний, параметр, учитывающий частоту колебаний. Идентификация коэффициентов компьютерной модели осуществлялась с использованием проведенных исследований, а также результатов исследований виброабразивной обработки, представленных в работах Бабичева А.П. [1, 2] и Тамаркина М.А. [7 – 15]. Результатами промежуточных расчетов являются траектории движения абразивных гранул и обрабатываемых деталей, изменение формы и размеров обрабатываемой детали, а также её массы, совокупная удельная мощность воздействия абразивной среды.

Использование модели Арчарда позволило получить адекватные модели ВиАО, максимально приближенные к реальности, что подтверждено результатами сравнения

теоретических расчетов и экспериментальных данных. Результаты этого сравнения представлены на рис 5 – 7.

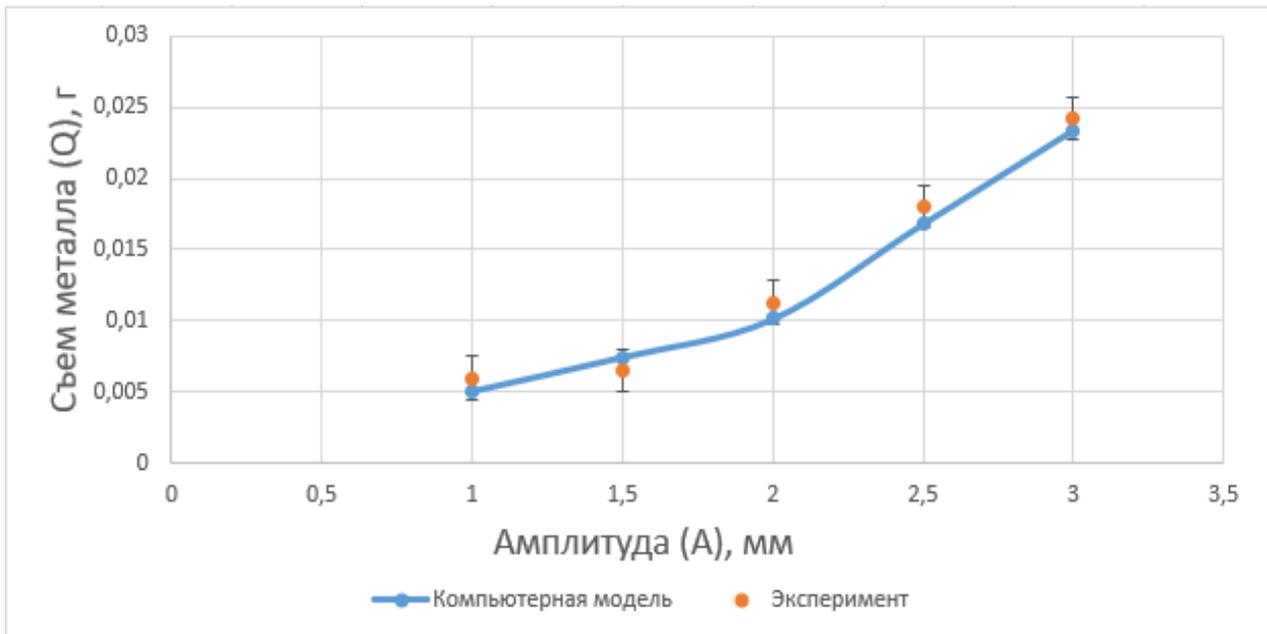


Рис. 5. Результаты исследования съема металла при вибрационной обработке. Материал детали – Алюминиевый сплав Д16, форма абразивной частицы – конус

Fig. 5. The results of the study of metal removal during vibroacoustic treatment. The material of the part is Aluminum alloy D16, the shape of the abrasive particle is a cone

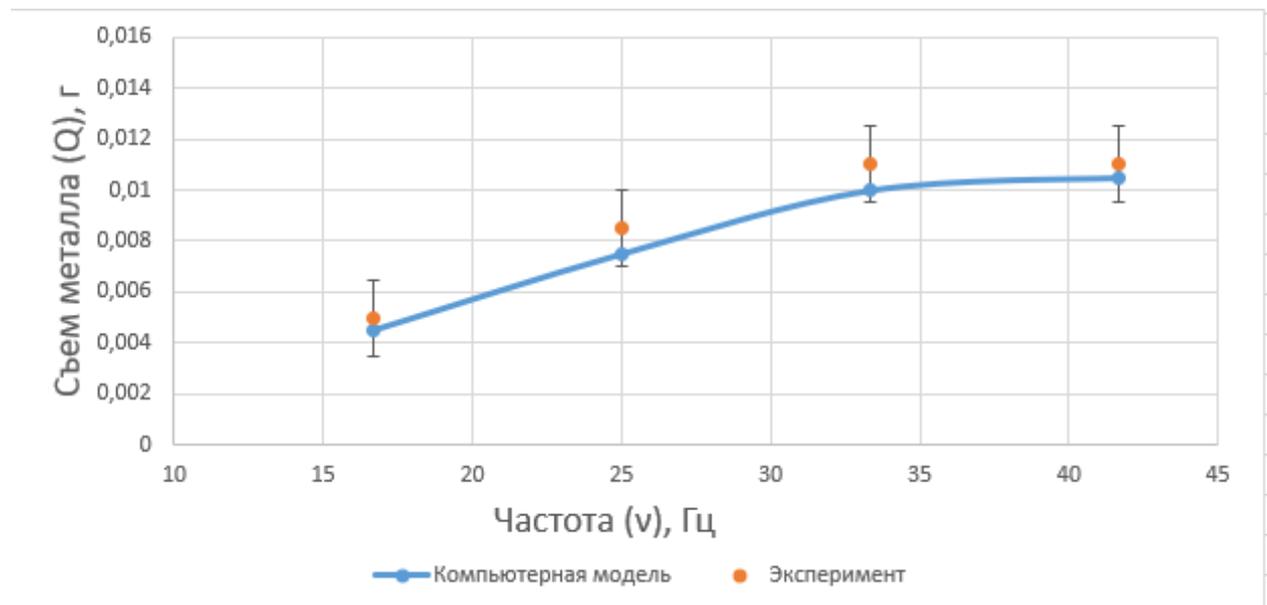


Рис. 6. Результаты исследования съема металла при вибрационной обработке. Материал детали – Сталь 45, форма абразивной частицы – шар

Fig. 6. The results of the study of metal removal during vibroacoustic treatment. The material of the part is 45 steel, the shape of the abrasive particle is a ball

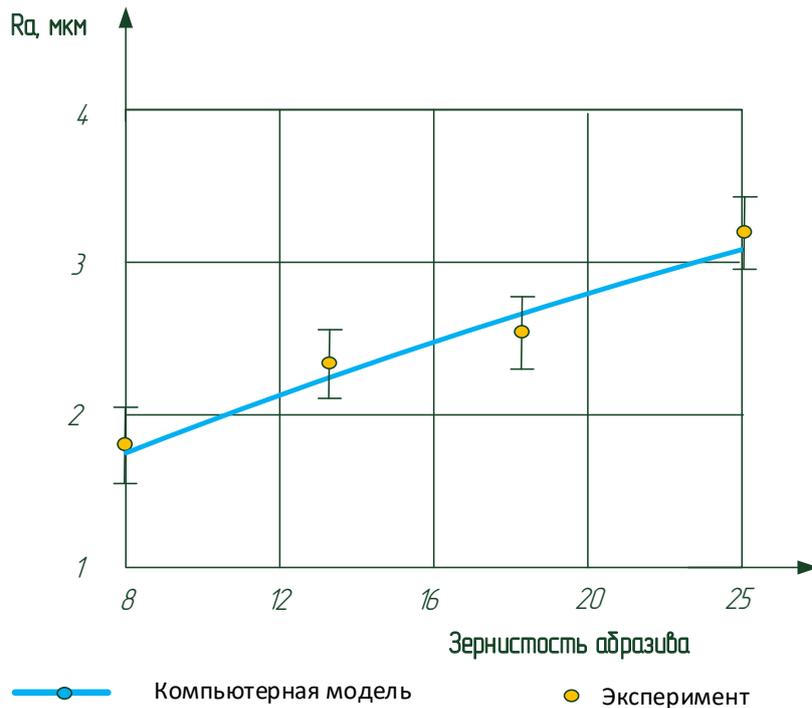


Рис. 7. Результаты исследования качества обработанной поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива. Обрабатываемый материал – ХВГ. Частота вращения ротора – 10Гц.

Fig. 7. Results of a study of the quality of the treated surface during centrifugal-rotational treatment in an abrasive medium. The treated material is CrWMn. The rotor speed is 10 Hz.

Заключение

На основании результатов проведенных исследований разработаны уточненные алгоритм и методика оптимизации технологических процессов виброабразивной обработки и дополнены исследования с целью описания других видов обработки деталей свободными абразивами для создания системы автоматизированного проектирования основных методов обработки свободными абразивами на операциях шлифования, полирования, скругления острых кромок при обработке деталей из различных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабичев А.П., Мотренко П.Д. Вибрационные технологии в машиностроении: опыт применения и перспективы развития. Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 8 (128). С. 3–5.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд. ДГТУ, Ростов н/Д, 2008.
3. Калмыкова Н.А. Экспериментальные исследования вибрационной механо-химико-термической обработки. Вестник ДГТУ, 2004. № 3. С. 296–301.

4. Королёв А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: из-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.
5. Крагельский И.В. и др. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. 526 с.
6. Санамян В.Г. Повышение интенсивности процесса вибрационной обработки деталей за счет увеличения давления в рабочей камере. Дис. ... канд техн. наук: 05.02.08. Ростов н/Д, 1997
7. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Корольков Ю.В., Троицкий В.М. Повышение эффективности вибрационной обработки путем комбинирования обрабатывающих сред / Научные технологии в машиностроении. 2021. № 6 (120). С. 12–17.
8. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Троицкий В.М., Мордовцев А.А. Подготовка деталей под покрытие обработкой в гранулированных абразивных средах / Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 9 (189). С. 416–419.
9. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом/ Saarbroniken/Jermamy: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015
10. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Троицкий В.М., Тищенко Р.Г. Компьютерное моделирование динамики движения среды при обработке свободными абразивами/ Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2024. № 4 (71).

11. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Tishchenko R.G.** Exploring workpiece surface quality formation with abrasive dynamics in centrifugal-rotary processes/ E3S Web of Conferences 592, 05018 (2024)

12. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Vyalikov I.L.** Increased efficiency of vibroabrasive machining in the presence of ultrasound. Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, Is. 10. P. 740–744

13. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Kazakov D.V., Isaev A.G.** Reliability of centrifugal–rotational finishing by steel shot/ Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, Is. 4. P. 326–329

14. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V.** Design of high precision machining part processes in free abrasives / Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. T. 247. C. 157–164

15. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V.** Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery/E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. p. 07032.

REFERENCES

1. Babichev A.P., Motrenko P.D. Vibrational Technologies in Mechanical Engineering: Application Experience and Development Prospects. Strengthening Technologies and Coatings. 2015. No. 8 (128). pp. 3–5.

2. Babichev A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology. DSTU Publishing House, Rostov-on-Don, 2008.

3. Kalmykova N.A. Experimental studies of vibration mechanical-chemical-thermal treatment. Vestnik DGTU, 2004. No. 3. Pp. 296–301.

4. Korolev A.V. Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts during abrasive processing. Saratov: publishing house of Saratov University, 1975. 191 p.

5. Kragelsky I.V. et al. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie. 1977, 526 p.

6. Sanamyan V.G. Increasing of details vibrating processing process intensity at the expense of pressure increase in the working chamber. Dis. ... Candidate of Technical Sciences: 02/05/08. Rostov-on-Don, 1997

7. Tamarkin M.A., Kolganova E.N., Korolkov Yu.V., Troitskiy V.M. Improving the efficiency of vibration treatment by combining processing media / Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2021, no. 6(120), pp. 12–17.

8. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Troitskiy V.M., Mordovtsev A.A. Preparation of parts for coating by granular abrasive media treatment / Hardening technologies and coatings. 2020, vol. 16, no. 9 (189). pp. 416–419.

9. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E. Fundamentals of optimizing the processes of machining parts with a free abrasive/ Saarbrücken/Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015

10. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Troitskiy V.M., Tishchenko R.G. Computer simulation of the dynamics of medium motion under free abrasive treatment/ Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov (RSATU), 2024, no. 4 (71).

11. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Tishchenko R.G. Exploring workpiece surface quality formation with abrasive dynamics in centrifugal-rotary processes/ E3S Web of Conferences 592, 05018 (2024)

12. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Vyalikov I.L. Increased efficiency of vibroabrasive machining in the presence of ultrasound. Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, Is. 10, pp. 740–744

13. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Kazakov D.V., Isaev A.G. Reliability of centrifugal–rotational finishing by steel shot/ Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, Is. 4, pp. 326–329

14. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V. Design of high precision machining part processes in free abrasives / Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022, vol. 247, pp. 157–164

15. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery/E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021, p. 7032.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 03.06.2025.

The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 27.05.2025; accepted for publication 03.06.2025.