

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.9

Создание компьютерной модели динамики движения абразивной среды при вибрационной обработке деталей

М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, В.М. Троицкий, И.Д. Узденов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

В статье представлены результаты исследований процесса вибрационной обработки деталей. Проведен обзор работ в данной области. Установлено, что процессы обработки в среде свободного абразива требуют доработки, особенно в аспекте исследования динамики движения среды. Выявлены факторы, которые влияют на динамику процесса обработки. Осуществлено компьютерное моделирование с использованием программного пакета Rocky DEM. Проведен комплекс теоретических расчетов по съему металла с поверхности образца. Адекватность полученных данных подтверждена результатами экспериментальных исследований, что позволяет впервые учесть влияние формы, размеров и вида связки абразивных частиц — соотношения объемов рабочей среды и деталей — на производительность и качество обработки.

Ключевые слова: вибрационная обработка, динамика движения среды

Для цитирования: Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Троицкий В.М., Узденов И.Д. Создание компьютерной модели динамики движения абразивной среды при вибрационной обработке деталей. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(5):14–18.

Creating a Computer Model of Abrasive Medium Motion Dynamics during Vibro-Abrasive Machining of Parts

Mikhail A. Tamarkin, Elina E. Tishchenko, Victor M. Troitsky, Ibrahim D. Uzdenov

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of a study on the process of vibro-abrasive machining of the parts. A review of publications in this field was carried out. It was acknowledged that processes of machining in a free-flowing abrasive medium require further elaboration, particularly with regard to studying the medium motion dynamics. Factors that influence machining process dynamics were identified. Computer modeling was performed using the Rocky DEM software package. A set of theoretical calculations for removal of metal from the sample surface were made. The relevance of the obtained data was confirmed by the results of the experiments that for the first time made it possible to take into account the influence of the shape, size and bond type of abrasive particles (a correlation of working medium volumes to the parts) on productivity and quality of machining.

Keywords: vibro-abrasive machining, medium motion dynamics

For Citation: Tamarkin MA, Tishchenko EE, Troitsky VM, Uzdenov ID. Creating a Computer Model of Abrasive Medium Motion Dynamics during Vibro-Abrasive Machining of Parts. *Young Researcher of Don*. 2025;10(5):14–18.

Введение. В современном машиностроении операции финишной обработки деталей играют важную роль, так как именно на этих этапах формируются параметры качества поверхностного слоя, оказывающие значительное влияние на эксплуатационные свойства машин и продолжительность их жизненного цикла. При обработке деталей сложной конфигурации активно применяются методы работы со свободными абразивами, позволяющие в большинстве случаев обрабатывать множество деталей одновременно без их базирования и закрепления. Процессы обработки свободными абразивами были предметом глубокого изучения как российскими, так и зарубеж-

ными специалистами. К числу авторов, чьи работы заслуживают внимания, можно отнести Бабичева А.П., Тамаркина М.А., Шевцова С.Н., Димова Ю.В., Литовку Г.В., Мартынова А.Н., Барона Ю.Н., Кремня З.И., Зверовщикова А.Е. и многих других [1–6]. Анализ указанных работ показывает, что технологии обработки свободными абразивами имеют много общего, включая закономерности взаимодействия гранул с обрабатываемой поверхностью, а также методы оценки качества обрабатываемой поверхности и скорости съема металла. В своих исследованиях многие авторы разработали теоретические модели, описывающие механику и статистику контактных взаимодействий, что позволяет оценивать параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Эти модели были проверены экспериментально, что подтвердило их адекватность. Однако многие исследователи процессов обработки в гранулированных средах не учитывают особенности динамики взаимодействия частиц среды с поверхностью детали, что снижает точность технологических расчетов и усложняет внедрение этих процессов в современные технологии производства деталей машин. В связи с этим исследования динамики контактных взаимодействий становятся особенно актуальными.

Основная часть. Для моделирования движения массива гранул внутри рабочих камер при обработке в гранулированных средах можно использовать современные системы компьютерного моделирования технологических процессов. Эти системы позволяют, фиксируя движения рабочей камеры, свойства частиц и параметры взаимодействия в среде, получить описание движения гранулярного массива во времени. Далее появляется возможность расчета характеристик взаимодействия среды, стенок рабочей камеры с поверхностью обрабатываемой детали, что, в свою очередь, позволяет обосновать обратное воздействие массы загрузки на систему вибровозбуждения и сделать адекватные прогнозы относительно характера обработки изделия. Одну из таких систем использовал в своих исследованиях профессор Шевцов С.Н. [3]. Он применил метод компьютерного имитационного моделирования для описания динамики движения среды в рабочих камерах различной конфигурации в условиях вибрационной абразивной обработки. В его работах учитывалось вибратранспортирование среды стенками рабочих камер различной формы, однако полученные модели описывали лишь движение абразивных частиц, имеющих форму шара, что не позволило выявить особенности движения деталей и характер взаимодействия абразивных частиц с их поверхностью.

Для уточнения расчетов возникла необходимость в разработке моделей динамики движения абразивной среды в рабочей камере станков, осуществляющих обработку свободными абразивами. Это позволит значительно точнее моделировать статистику контактных взаимодействий, что, в свою очередь, повысит точность инженерных расчетов при технологическом проектировании. Реализовать это возможно, используя программный пакет Rocky DEM, который является одним из наиболее подходящих для компьютерного моделирования, включая технологические процессы.

Как и в работах многих авторов, рассмотрим процессы, происходящие при обработке деталей свободными абразивами, на примере виброабразивной обработки, так как она представляет собой типичный метод этой группы и наиболее распространена в различных отраслях промышленности. В процессе виброабразивной обработки удаление материала с поверхности детали осуществляется за счет нескольких важных механизмов: микрорезание — при котором частицы металла отслаиваются от поверхности, выкрашивание — возникающее в результате многократного деформирования и усталостного разрушения элементов поверхности; формирование, разрушение и удаление вторичных структур и адгезионные явления, при которых частицы металла прочно прилипают к абразивным гранулам и затем удаляются.

Экспериментальные исследования показали, что при виброабразивной обработке разрушение металла может происходить двумя основными способами [3, 6]. В определенных условиях разрушение начинается сразу после воздействия абразивных зерен на поверхность детали, в то время как в других случаях перед фактическим разрушением проходит период подготовительных процессов, таких как появление следов обработки, образование микротрещин, наклеп поверхности и другие явления. Продолжительность этого периода зависит от множества факторов, включая свойства материала, режимы обработки и характеристики абразивной среды.

На начальном этапе обработки, при определенных условиях эксперимента, вероятность микрорезания довольно высока, так как абразивные гранулы активно удаляют мелкие выступы исходной шероховатости поверхности. С течением времени вероятность пластического деформирования несколько возрастает. Зерна гранул многократно и активно деформируют поверхность при повторных ударах, что приводит к увеличению количества навалов, готовых отделиться. В этом процессе вероятность микрорезания сначала уменьшается, а затем начинает монотонно расти. Этот рост вероятности разрушения может быть связан с образованием наклепа, который увеличивает предел прочности и снижает способность металла к пластической деформации. В результате происходит срезание объемов металла с поверхности образца.

Технологическими параметрами виброабразивной обработки являются: режимы обработки, условия проведения процесса, соотношение между объемом абразивной среды и обрабатываемыми деталями, степень заполнения рабочей камеры и другие параметры.

Кроме того, существенное влияние оказывают свойства обрабатываемого материала, включая: твердость, предел текучести, склонность к схватыванию, способность к окислению, износостойкость, форму гранул и другие характеристики.

Также важными факторами являются форма, размеры и физико-механические характеристики абразивных гранул, такие как: вид связки, твердость, зернистость.

Эти элементы совместно влияют на процессы, происходящие в момент виброабразивной обработки, и формируют ее конечные результаты.

Для компьютерного моделирования применяется закон Арчарда [3], который позволяет оценивать степень изнашивания поверхности детали с учетом ударного воздействия абразивных гранул и определять ее по зависимости:

$$V = k \cdot \frac{F_t \cdot S_t}{H}, \quad (1)$$

где V — общий объем материала, изношенного с поверхности, F_t — тангенциальная сила, действующая на поверхность, S_t — расстояние скольжения по поверхности, H — твердость материала, подверженного износу, k — безразмерная эмпирическая постоянная.

Рассмотрение закона Арчарда в программном пакете Rocky DEM возможно в инкрементной форме:

$$dV = C \cdot dW_t, \quad (2)$$

где dV — объем материала, подвергаемого износу за время шага моделирования, dW_t — тангенциальная или сдвиговая работа, выполненная частицами среды при столкновении с поверхностью в течение одного временного шага, $C = k/H$ — константа, которую задает пользователь. Значения этой константы разнятся в зависимости от характеристик изнашиваемой поверхности.

При моделировании с использованием пакета программ Rocky DEM задание всех твердых поверхностей осуществляется разбиением их на элементарные участки треугольной формы. Эффект удаления объема dV достигается смещением вершин этих участков внутрь. Рассчитывается расстояние, на которое будет перемещаться каждая вершина. Это необходимо для того, чтобы изменение объема соответствовало значению dV и было определено по формуле (2).

Пакет прикладных программ Rocky DEM предоставляет возможность задания формы рабочей камеры (U — образная, toroidal, цилиндрическая и др.), кинематических параметров процесса обработки (амплитуды и частоты колебаний, частоты вращения днища и т.п.), количества частиц в рабочей камере по массе, форме и размерам, а также массы и формы обрабатываемой детали, её расположения в рабочей камере, материала детали, соотношения массы детали и массы абразивной среды, физико-механических свойств обрабатываемого материала (твердость, предел текучести, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) и абразивных гранул (форма, размеры, твердость, зернистость, плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона), коэффициента трения абразивной среды о поверхность детали, свойств COTC.

В качестве промежуточных результатов работы с пакетом программ можно представить траектории движения абразивных гранул и обрабатываемых деталей, изменения формы и размеров последних, а также их массы загрузки, совокупную удельную мощность воздействия абразивной среды на поверхность детали.

Для проверки адекватности зависимостей, полученных при компьютерном моделировании, был проведен комплекс теоретических расчетов съема металла с цилиндрических образцов из различных материалов. Определена взаимосвязь между технологическими характеристиками абразивных гранул в качестве первичных параметров (структура, материал зерна и его зернистость, размеры и форма гранул, вид связки, твердость) и производительностью виброабразивной обработки в качестве вторичных параметров (режущая способность, износостойкость гранул, коэффициент обработки, формирование микрорельефа поверхности детали).

Описаны следующие эксплуатационные показатели абразивных гранул: режущая способность, расход абразивной среды, удельный расход абразивной среды, процентный износ абразивной среды, период стойкости абразивной среды, коэффициент обработки. Приведен анализ влияния технологии изготовления абразивных гранул на формирование их технологических характеристик. На основании результатов анализа определены пути повышения этих характеристик.

Для проверки адекватности проведенных исследований выполнена комплексная экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования. Определено значение эксплуатационных показателей абразивных гранул при обработке деталей из различных материалов. Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований представлено на рис. 1 и 2.

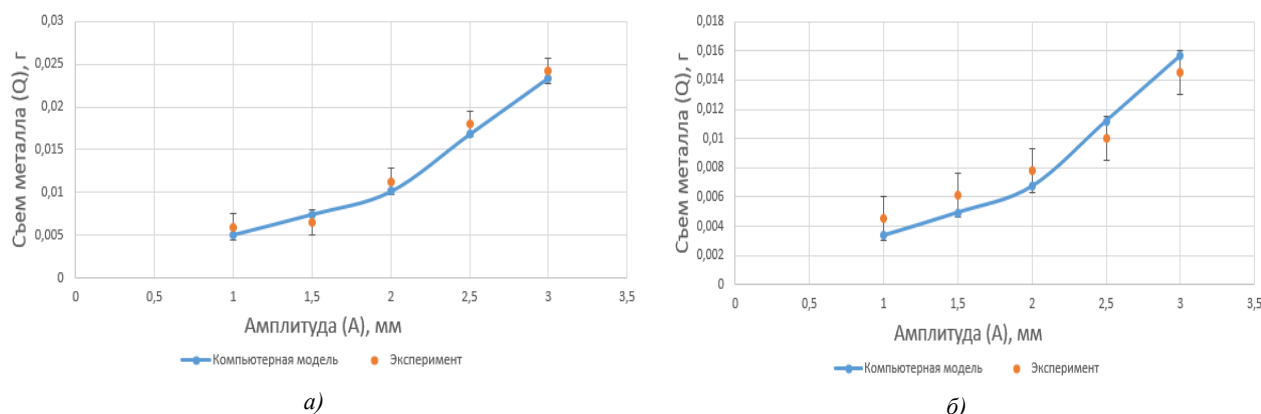


Рис. 1. Зависимость съема металла от амплитуды колебаний:
 а — материал детали — алюминиевый сплав Д16, форма — конус;
 б — материал детали — сталь 45, форма — конус

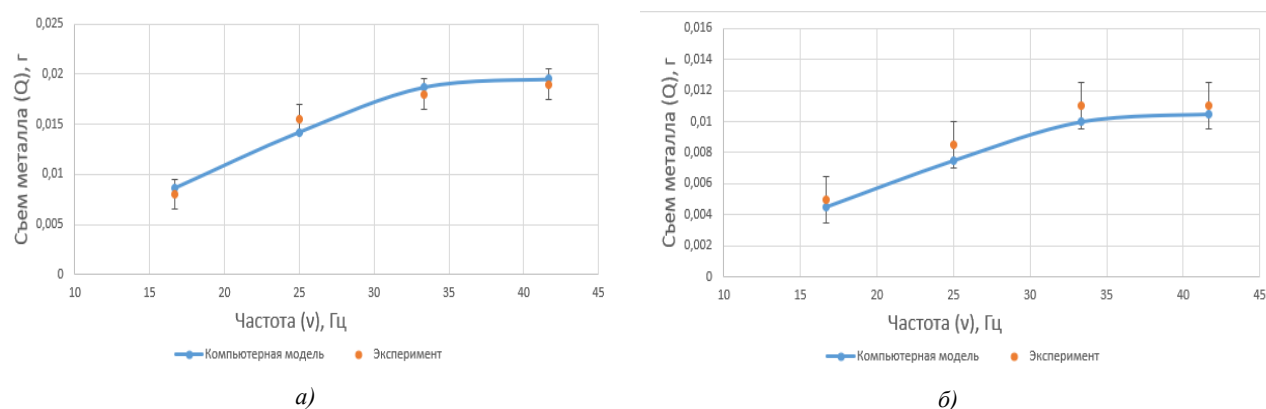


Рис. 2. Зависимость съема металла от частоты колебаний:
 а — материал детали — алюминиевый сплав Д16, форма — шар;
 б — материал детали — сталь 45, форма — шар

Заключение. На основании анализа теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- разработана методика повышения эффективности процессов обработки деталей свободными абразивами с использованием компьютерного моделирования, основанная на оптимизации технологических параметров с целью максимальной производительности;
- использование полученных моделей позволяет точно рассчитать съем металла с поверхности деталей. Расхождение между результатами теоретических расчетов и данными экспериментальных исследований не превышает 20 %;
- разработанный комплекс компьютерных моделей впервые учитывает влияние формы, размеров и вида связки абразивных частиц, а также соотношение объемов рабочей среды и деталей на производительность и качество обработки.

Список литературы

1. Баби́чев А.П., Мотренко П.Д., Гиллеспы Л.К. и др. *Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей*. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ; 2010. 289 с.
2. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. *Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом*. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2015.
3. Шевцов С.Н. *Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных машинах*. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ; 2001. 193с.
4. Tamarkin MA, Tishchenko EE, Murugova EV. Technological Design Processes of Vibration Processing of Particularly Accurate Parts of Agricultural Machinery. In: *Proceedings of 14th International Scientific and Practical Conference "State and Prospects for the Development of Agribusiness — INTERAGROMASH 2021". E3S Web of Conferences. Vol. 273*. Rostov-on-Don: E3S Sciences; 2021. P. 07032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127307032>

5. Tamarkin MA, Tishchenko EE, Murugova EV. Design of High Precision Machining Part Processes in Free Abrasives. In: Shamtsyan M, Pasetti M, Beskopylny A (Eds.). *Proceedings of the Conference “Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture”*. Smart Innovation, Systems and Technologies. Vol 247. Singapore: Springer; 2022. P. 157–164. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_17

6. 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;16(9(189)):416–419.

Об авторах:

Михаил Аркадьевич Тамаркин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), tehn_rostov@mail.ru

Элина Эдуардовна Тищенко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), lina_tishenko@mail.ru

Виктор Михайлович Троицкий, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), mihailevich2313@mail.ru

Ибрагим Дахирович Узденов, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ibragim.uzdenov@internet.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Mikhail A. Tamarkin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), tehn_rostov@mail.ru

Elina E. Tishchenko, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), lina_tishenko@mail.ru

Victor M. Troitsky, Postgraduate Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), mihailevich2313@mail.ru

Ibrahim D. Uzdenov, Postgraduate Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ibragim.uzdenov@internet.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.