

На правах рукописи

Ачкасов Виталий Александрович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВИБРОАБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КУРСК – 2013

Работа выполнена в Старооскольском технологическом институте им. А.А. Угарова (филиале) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и Юго-Западном государственном университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Копылов Юрий Романович

Официальные оппоненты: Козлов Александр Михайлович
доктор технических наук, профессор,
Липецкий государственный техниче-
ский университет, заведующий кафед-
рой «Технология машиностроения»

Василенко Юрий Валерьевич
кандидат технических наук, доцент,
Госуниверситет-УНПК,
директор Технологического института
им. Н.Н. Поликарпова

Ведущая организация: Донской государственный техниче-
ский университет

Защита диссертации состоится 14 ноября 2013 г. в 16-00 ча-
сов на заседании диссертационного совета Д 212.105.09 при Юго-
Западном государственном университете по адресу: 305040, г.
Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-
Западного государственного университета по адресу: 305040,
г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Автореферат разослан «12» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.В. Куц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из направлений применения вибрационных технологий в машиностроении и приборостроении является виброабразивная обработка деталей без закрепления. Достоинством метода является его универсальность, возможность обработки деталей сложной формы, имеющих труднодоступные для закрепленного инструмента участки. Определяющим фактором интенсивности процесса виброабразивной обработки при постоянных параметрах гранул, свойствах технологической жидкости и характеристиках деталей является энергия соударений частиц с деталями. Основным путем повышения производительности обработки является интенсификация режимов, которая, однако, может привести как к повышению, так и снижению технологических показателей обработки. Это обусловлено тем, что обрабатываемые свойства инструментальной среды нелинейно зависят от режимов обработки. Оптимизация энергетического состояния инструментальной среды экспериментальным методом затруднительна в силу сложности измерения энергии соударений частиц, большого количества факторов, влияющих на нее, и частным характером получаемых результатов. Аналитическое решение этой задачи затруднено в силу сложности математического описания динамики соударений инструментальной среды с деталями.

Поэтому интенсификация процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления путем оптимизации энергетического состояния инструментальной среды методом компьютерного моделирования является актуальной задачей.

Объектом исследования является процесс виброабразивной обработки без закрепления деталей, инструментальные среды и оборудование для его реализации.

Предметом исследования являются закономерности динамики процесса виброабразивной обработки, протекающего в технологической системе «Рабочая камера-инструментальная среда-детали».

Целью диссертационной работы является интенсификация съема металла и снижения шероховатости на различных участках поверхностей деталей в процессе виброабразивной обработки без закрепления деталей за счет оптимизации энергетического состояния инструментальной среды на основе критерия удельной плотности полной кинетической энергии посредством компьютерного моделирования с последующей экспериментальной проверкой.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обоснование критерия оптимизации процесса виброабразивной обработки по параметру удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды и экспериментальная проверка его адекватности.

2. Исследование закономерностей влияния амплитуды, частоты, формы траектории колебаний, ширины рабочей камеры, степени ее заполнения и размера частиц инструментальной среды на удельную плотность ее полной кинетической энергии.

3. Разработка математической модели формирования съема металла и шероховатости при виброабразивной обработке деталей без закрепления с учетом их формы и взаимного расположения поверхностей.

4. Исследование влияния удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды на интенсивность съема металла и снижения шероховатости поверхностей деталей в процессе виброабразивной обработки деталей без закрепления.

5. Разработка методики проектирования технологии виброабразивной обработки деталей без закрепления на основе критерия удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды.

6. Разработка динамической схемы вибростанка с активизатором инструментальной среды, системой контроля и управления режимами виброабразивной обработки деталей без закрепления, позволяющей интенсифицировать процесс обработки.

Методы исследования. Использовались теоретические основы виброабразивной обработки, методы компьютерного моделирования динамики гранулированных сред и сплайнового моделирования. Проводилась экспериментальная проверка результатов моделирования на виброустановке с U-образной рабочей камерой. Обработка результатов исследований выполнялась в программном комплексе Microsoft Excel.

Достоверность научных положений и результатов обеспечена корректностью постановки задачи, обоснованностью использованных теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов; подтверждается сравнительным анализом результатов, полученных теоретически, и результатов экспериментальных исследований.

Научная новизна работы.

1. Разработан метод интенсификации процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления, отличающийся тем, что повышение интенсивности съема металла и снижения шероховато-

сти поверхностей деталей достигается за счет оптимизации энергетического состояния инструментальной среды на основе критерия удельной плотности ее полной кинетической энергии, позволяющий повысить интенсивность обработки на 30-50% и более по сравнению с традиционной схемой виброабразивной обработки.

2. Установлены закономерности влияния режимов обработки (амплитуды, частоты и формы траектории колебаний), ширины рабочей камеры и степени ее заполнения, размеров частиц инструментальной среды на удельную плотность полной кинетической энергии (E_n), которые состоят в следующем:

- повышение амплитуды с 3 до 6 мм экстремально увеличивает E_n в 3,5-4 раза, а при дальнейшем ее увеличении с 6 до 7 мм E_n снижается на 20-25%;

- увеличение частоты колебаний с 75 до 125 рад/с повышает E_n в 1,5-1,7 раза, при дальнейшем увеличении частоты до 165 рад/с происходит монотонное снижение E_n на 10-15%;

- увеличение ширины рабочей камеры с 250 до 350 мм приводит к снижению E_n на 40-50%;

- возрастание степени заполнения рабочей камеры инструментальной средой с 50 % до 80% монотонно снижает E_n на 40-60%;

- увеличение размера частиц с 3 до 11 мм изменяет E_n в 4-5 раз по полиэкстремальной зависимости: с максимумом при 6-7 мм, и двумя минимумами при 3-4 мм и 9-10 мм;

- изменение формы траектории колебаний рабочей камеры с круговой на вертикальный и горизонтальный эллипс вызывает изменение E_n , соответственно, на 20-25% и 35-40%.

3. Установлены закономерности влияния удельной плотности полной кинетической энергии (E_n) на интенсивность съема металла и снижения шероховатости при виброабразивной обработке деталей без закрепления с учетом их формы и взаимного расположения поверхностей, которые состоят в следующем:

- увеличение E_n в 1,4-1,5 раза приводит к монотонному увеличению интенсивности съема металла в 1,8-2 раза;

- для достижения минимального значения параметра шероховатости R_z необходимо обеспечить оптимальное значение $E_n = E_{n\text{opt}}$, при котором R_z снижается на 40-45%;

4. Разработана динамическая схема вибростанка, отличающаяся введением в технологическую систему активизатора инструментальной среды, системы контроля и управления режимами обработки, позволяющая интенсифицировать процесс обработки в

2-2,5 раза по сравнению с традиционной схемой виброабразивной обработки.

Практическая ценность настоящей работы заключается в разработке методики проектирования технологии виброабразивной обработки деталей без закрепления с учетом их формы и расположения поверхностей на основе критерия удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды и программного обеспечения для моделирования процесса, что позволяет повысить интенсивность обработки, сократить время поиска рациональных режимов обработки и затраты на экспериментальную отработку технологии.

Реализация результатов работы. Результаты исследований используются при проектировании технологии виброабразивной обработки деталей на ЗАО «Старооскольский завод автотракторного электрооборудования им. А.М. Мамонова» (г. Старый Оскол); в учебном процессе Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) НИТУ МИСиС по курсу «Технология машиностроения».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях «Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» (г. Ростов-на-Дону, 2013), «Управляемые вибрационные технологии и машины» (г. Курск, 2008 и 2012), Всероссийской научно-технической конференции «Авиакосмические технологии» (г. Воронеж, 2013), Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Образование, наука, производство и управление» (г. Старый Оскол, 2004-2012 гг.); региональных научно-практических конференциях «Молодые ученые – производству» (г. Старый Оскол, 2005-2007г.); на научно-методических семинарах кафедры «Технологии и оборудования в металлургии и машиностроении» СТИ НИТУ МИСиС (г. Старый Оскол, 2004-2013 гг.).

На защиту выносятся:

1. Метод интенсификации процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления на основе обеспечения оптимального энергетического состояния инструментальной среды.
2. Закономерности влияния конструктивных параметров рабочей камеры, инструментальной среды и режимов обработки на удельную плотность полной кинетической энергии.
3. Закономерности влияния удельной плотности полной кинетической энергии на интенсивность съема материала и снижения

шероховатости при виброабразивной обработке деталей без закрепления с учетом их формы и взаимного расположения поверхностей.

4. Методика проектирования процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления на основе критерия удельной плотности полной кинетической энергии.

5. Динамическая схема вибростанка с активизатором инструментальной среды, системой контроля и управления режимами обработки.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ: в том числе 3 в рецензируемых научных журналах и изданиях; 10 - в других изданиях; 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателем выполнено следующее: в [1] установлен критерий оптимизации вибростанков, связанный с энергией инструментальной среды; [2,8,9] разработана методика расчета упругих элементов виброустановок, обеспечивающая заданную амплитуду и форму траектории колебаний; в [3,14] исследовано влияние переменного силового поля инструментальной среды на процесс удаления заусенцев; в [4,5] разработана динамическая модель и выполнены численные эксперименты по исследованию влияния энергии соударения на процесс обработки с учетом формы и расположения поверхностей деталей; в [6,7,11] выполнены экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров и режимов работы вибростанка на производительность обработки; в [10,12,13] установлено отрицательное влияние гироскопического момента на динамику вибромашины и предложена новая динамическая схема виброустановки, устраняющая его.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и 1 приложения. Основная часть диссертации содержит 175 страниц машинописного текста, включая 72 рисунка и 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость; определены способы решения сформулированных задач; приведены сведения об апробации результатов работы.

В первой главе приводится анализ состояния исследований по повышению интенсивности обработки, оптимизации и методам проектирования технологии виброабразивной обработки, приводится анализ физических процессов в инструментальной среде под

действием вибрации и методов ее моделирования, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе обоснован метод интенсификации процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления путем оптимизации энергетического состояния инструментальной среды по критерию удельной плотности полной кинетической энергии, разработаны методики теоретических и экспериментальных исследований процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления.

В работах С.Н. Шевцова методом компьютерного моделирования динамики гранулированных сред, доказана пропорциональная зависимость между съемом металла и плотностью кинетической энергии инструментальной среды. В настоящей работе задача интенсификации съема металла и снижения шероховатости для различных участков поверхностей деталей решается за счет выявления зависимостей энергетического состояния инструментальной среды от амплитуды, частоты, формы траектории колебаний, ширины рабочей камеры, степени ее заполнения гранулами и их размеров. В качестве критерия оптимизации энергетического состояния инструментальной среды принята величина удельной плотности ее полной кинетической энергии, которая определяется следующим соотношением:

$$E_n = \frac{\sum_{k=1}^p E_k^n}{M}, \quad (1)$$

где E_n - удельная плотность полной кинетической энергии инструментальной среды по сечению рабочей камеры; E_k^n - плотность полной кинетической энергии инструментальной среды в k -й ячейке рабочей камеры; p - число ячеек, на которые разбивается площадь загруженной части рабочей камеры; M - общая масса инструментальной среды.

$$E_k^n = \frac{2}{(t_e - t_b) \cdot d \cdot l^2} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

где t_b - время начала наблюдения, t_e - время окончания наблюдения, d - диаметр частицы; l - длина стороны k -й ячейки, m - масса частицы; v - скорость частицы; N - число частиц, оказавшихся в k -й ячейке за время $t_b \dots t_e$.

Плотность кинетической энергии направленного движения частиц в k -й ячейке:

$$E_k^n = \frac{1}{(t_e - t_b) \cdot d \cdot l^2} \cdot \langle v \rangle_i^2 \sum_{i=1}^N m \quad (3)$$

где $\langle v \rangle_i$ - средняя скорость частиц в k -й ячейке за время $t_b \dots t_e$.

Плотность средней кинетической энергии хаотического («теплого») движения частиц в k -й ячейке:

$$E_k^x = E_k^n - E_k^h \quad (4)$$

В качестве основных методов теоретических исследований процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления приняты метод прямого компьютерного моделирования динамики гранулированных сред, посредством которого находится распределение плотности кинетической энергии инструментальной среды по сечению рабочей камеры, и метод сплайнового моделирования, посредством которого определяются закономерности формирования съема металла и шероховатости поверхности на различных участках деталей.

Основным методом экспериментальных исследований являлся однофакторный эксперимент, в котором устанавливался характер влияния исследуемого фактора на интенсивность съема металла и снижения шероховатости обрабатываемой поверхности детали. В ходе опыта исследуемый параметр изменялся, остальные параметры обработки поддерживались постоянными. Для оценки влияния исследуемого фактора использовалась среднеарифметическая величина выходного параметра (интенсивности съема металла и снижения шероховатости).

В третьей главе установлены закономерности влияния амплитуды, частоты, формы траектории колебаний, ширины рабочей камеры, степени ее заполнения гранулами и их размеров на удельную плотность кинетической энергии инструментальной среды на базе дискретно-множественной модели технологической системы «Рабочая камера – инструментальная среда». Границы рабочей камеры произвольной формы разбиваются на сплайны, которые в двухмерном случае представляют собой отрезки прямых одинаковой длины, равных диаметру частиц, которые совершают поступательное движение в соответствии с задаваемым рабочей камере кинематическим законом движения. Инструментальная среда моделируется набором сферических частиц, положение которых в рабочей камере характеризуется координатами, радиусом r , массой m , свойствами материала.

Математическое описание динамики взаимодействия частиц инструментальной среды друг с другом и с поверхностью рабочей

камеры базируется на методе прямого компьютерного моделирования динамического состояния гранулированной инструментальной среды в вибрирующей рабочей камере. Решение задач соударения частиц инструментальной среды между собой и со сплайнами поверхности рабочей камеры производится на основе классической теории удара. Контактное взаимодействие частиц друг с другом и поверхностью рабочей камеры описывается на основе теории Герца. Решение проводится в программном комплексе «Vibrogals». Результатом работы программы моделирования являются фазы перемещений и траектории частиц, скорости циркуляции, перемещений и соударений, плотность кинетической энергии, по которым в дальнейшем вычисляются значения интенсивности съема металла и снижения параметра шероховатости Rz.

Экспериментальная проверка моделирования системы «Рабочая камера – инструментальная среда» показала ее адекватность.

Теоретически установлено, что удельная плотность кинетической энергии хаотических перемещений E_x в сотни раз больше энергии направленного движения E_n (рис.1). Удельная плотность полной кинетической энергии E_n неравномерно распределяется по сечению рабочей камеры: наибольшие значения располагаются вблизи ее поверхности и составляют 20-25% сечения рабочей камеры. Наибольшее значение удельной плотности кинетической энергии направленного движения E_n наблюдается на верхней границе инструментальной среды, где скорость циркуляции максимальна.

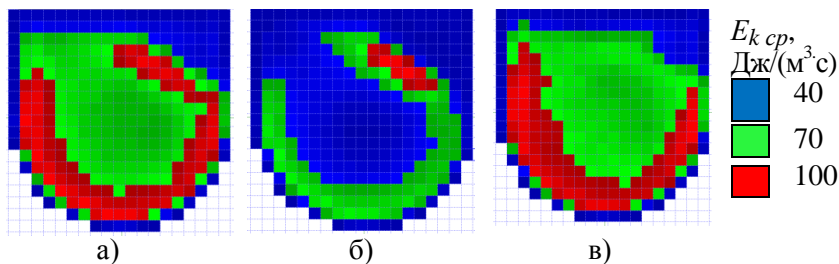


Рис. 1. Поля удельной плотности кинетической энергии (амплитуда $A=4$ мм, частота $\omega=105$ рад/с, круговая траектория, ширина камеры 250 мм, степень заполнения $\delta=67\%$): а) полной; б) направленного движения; в) хаотического движения инструментальной среды ($E_{k\text{ cp}}$ – среднее значение удельной плотности кинетической энергии в отдельной ячейке)

Результаты исследования влияния конструктивных параметров рабочей камеры, инструментальной среды и режимов виброабразивной обработки деталей без закрепления на величину удельной плотности полной кинетической энергии приведены на рис. 2 и 3.

Повышение амплитуды колебаний с 3 до 6 мм экстремально увеличивает среднюю удельную плотность полной кинетической энергии инструментальной среды (E_n) в 3,5-4 раза, дальнейшее увеличение амплитуды с 6 до 7 мм снижает E_n на 25% (рис. 2). Это происходит вследствие изменения степени разрыхления инструментальной среды, что приводит к изменению величины энергии, передающейся от частицы к частице.

Увеличение частоты колебаний ω с 75 до 125 рад/с повышает E_n в 1,5-1,7 раза, при дальнейшем увеличении ω со 145 до 165 рад/с происходит монотонное снижение E_n на 10-15% в результате изменения сил трения и квазиупругих свойств инструментальной среды (рис. 2).

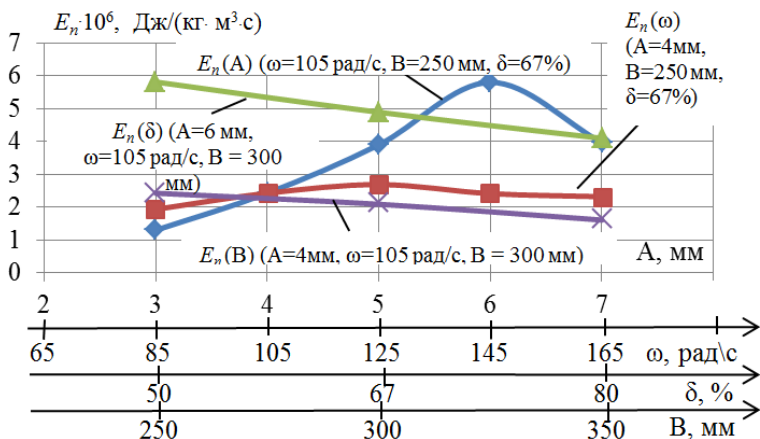


Рис. 2. Зависимость средней удельной плотности полной кинетической энергии от амплитуды E_n (A), частоты E_n (ω) колебаний, ширины рабочей камеры E_n (B) и степени ее заполнения инструментальной средой E_n (δ)

Увеличение ширины рабочей камеры с 250 до 350 мм приводит к снижению E_n на 40-50% в результате уменьшения глубины проникновения колебаний в слои инструментальной среды.

Повышение степени заполнения рабочей камеры инструментальной средой с 50 % до 80% монотонно снижает E_n на 40-60%,

что обусловлено снижением циркуляционной подвижности частиц в инструментальной среде.

Увеличение размера частиц с 3 до 11 мм изменяет E_n в 4-5 раз по полиэкстремальной зависимости: с максимумом при 6-7 мм, и двумя минимумами при 3-4 мм и 9-10 мм. Это объясняется сложным характером распространения силовых импульсов перемещения частиц в инструментальной среде.

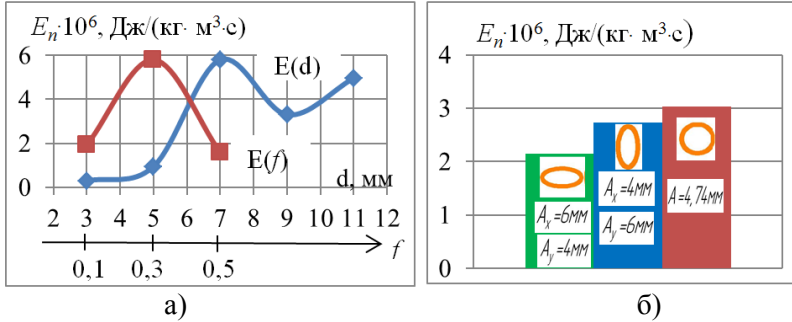


Рис. 3. Зависимость удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды от: а) диаметра ее частиц и их коэффициента вязкого трения ($A=4$ мм, $\omega=105$ рад/с, $B=250$ мм, $\delta=67\%$); б) формы траектории колебаний ($\omega=105$ рад/с, $B=250$ мм, $\delta=67\%$)

Изменение формы траектории колебаний рабочей камеры с круговой на вертикальный и горизонтальный эллипс вызывает изменение E_n , соответственно, на 20-25% и 35-40%. Это вызвано изменением влияния вертикальной и горизонтальной скоростей движения рабочей камеры на динамику частиц инструментальной среды.

В четвертой главе разработаны математические модели взаимодействия частиц инструментальной среды, формирования сбега металла и шероховатости поверхности на различных сплавах деталей посредством компьютерного моделирования.

Динамика движения детали без закрепления в вибрирующей инструментальной среде описывается с помощью основного уравнения динамики поступательного движения и основного уравнения динамики вращательного движения:

$$\begin{cases} m_o \cdot \ddot{\vec{r}}_C = \left(\sum_j \left(\vec{F}_{ij}^n(\Delta_{ij}) \cdot \vec{n} \right) \cdot \vec{n} + \sum_j \left(\vec{F}_{ij}^\tau(\Delta_{ij}) \cdot \vec{\tau} \right) \cdot \vec{\tau} \right) \\ I_o \cdot \ddot{\vec{\varphi}}_i = \sum_j \left(\vec{F}_{ij}^\tau(\Delta_{ij}) \cdot \frac{u_{ij\tau}}{|u_{ij\tau}|} \vec{\tau} \cdot \vec{r}_{Cj} \right) + \sum_j \left(\vec{F}_{ij}^n(\Delta_{ij}) \cdot \frac{u_{ijn}}{|u_{ijn}|} \vec{n} \cdot \vec{r}_{Cj} \right) \cdot \vec{n} \end{cases} \quad (5)$$

где m_∂ - масса детали; \ddot{r}_C - ускорение ее центра масс; $\bar{F}_{ij}^n, \bar{F}_{ij}^\tau$ - нормальная и касательная контактные силы соударения i -й частицы с j -м сплайном; Δ_{ij} - величина контактной деформации; $\bar{n}, \bar{\tau}$ - единичные нормальные и тангенциальные векторы в точках контакта частиц друг с другом и сплайнами границ; I_∂ - момент инерции детали; $\ddot{\phi}_i$ - угловое ускорение детали; \bar{r}_{cj} - плечо силы, действующей со стороны частицы на деталь, относительно ее центра масс; $u_{ijn}, u_{ij\tau}$ - нормальная и касательная компонента скорости сближения частиц и сплайнов.

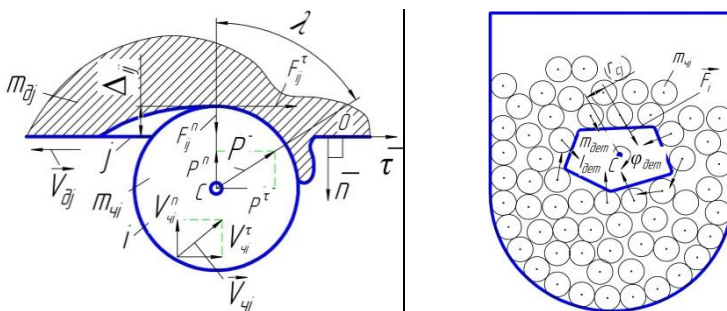


Рис. 4. Схема взаимодействия частиц: а) со сплайном детали; б) с деталью: C - центр масс детали; $m_{\chi i}$ - масса i -й частицы; $\phi_{\text{дет}}$ - угол поворота детали; λ - угол соударения частицы со сплайном

Сумма сил в уравнениях (5) определяется векторным суммированием элементарных сил на сплайнах, посредством усреднения сил в каждом шаге интегрирования, равного 2-10 мсек.

Интенсивность съема металла и снижения шероховатости определяется по энергии соударений частиц со сплайнами детали и отличается от ранее разработанных моделей тем, что для их определения используются точные значения скорости, угла и количества соударений частиц инструментальной среды, а не вероятностные. При этом учитывается условие возникновения микрорезания и усталостного разрушения, критерием действия которых является угол соударения и отношение глубины внедрения h_{mij} зерна частицы к его радиусу h_{mij}/R , где

$$h_{mij} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta T_{ij}}{\pi \cdot HM_\partial \cdot d_\chi}}, \quad (6)$$

ΔT_{ij} - энергия соударения; HM_∂ - динамическая твердость по-

верхности детали; d_u - диаметр частицы инструментальной среды.

Съем металла с j -го сплайна рассчитывается по формуле:

$$Q_j = (q_{jмр} \cdot N_{мр} + q_{jнл} \cdot N_{нл}) \cdot T_0 \quad (7)$$

$q_{jмр}$ и $q_{jнл}$ - соответственно, единичный съем металла с j -го сплайна посредством микрорезания и посредством усталостного разрушения; $N_{jмр}$ и $N_{jнл}$ - количество соударений частиц с j -м сплайном, вызывающих микрорезание и усталостное разрушение; T_0 - время обработки.

Для расчета величин $q_{jмр}$ и $q_{jнл}$ используются зависимости:

$$q_{jмр} = 15,5 \cdot k_c \cdot \frac{(d_u / 2)^3}{k_R^{3/4}} \cdot \left(V_i \cdot \sin \beta_i \cdot \sqrt{\frac{\rho_u}{3c \cdot \sigma_s}} \right)^{5/2} \cdot (ctg \beta_i - f) \cdot \rho_d \quad (8)$$

$$q_{jнл} = \frac{3600}{S_d} \cdot \omega \cdot k_R \cdot \left(\frac{(1 - R^2) \cdot m_u \cdot m_d \cdot V_i^2 \cdot \rho_d \cdot \sin \beta_i}{(m_u + m_d) \cdot 5,714 \cdot \sigma_{60}} \cdot \sqrt{1 + \frac{V_i^2 \cdot \tau_{ск}^2}{4 \cdot h_{mij} \cdot d_u}} \right) \quad (9)$$

где k_c , k_R - коэффициенты стружкообразования и зернистости; d_u - диаметр частицы; V_i и β_i - скорость и угол соударения; ρ_u , ρ_d - плотность материала частицы и детали; m_u , m_d - масса частицы и масса детали; c - коэффициент несущей способности контактной поверхности; σ_s , σ_{60} - предел текучести и предел прочности материала детали; f - коэффициент трения; S_d - площадь поверхности детали; ω - частота колебаний; R - коэффициент восстановления скорости при соударении. Индексы i, j, d - соответствуют частице, сплайну и детали.

Формула (8) является усовершенствованной моделью единичного съема металла посредством микрорезания, а формула (9) - усовершенствованной моделью съема металла от усталостного разрушения. В диссертации в формулах (8) и (9) используются точные расчетные значения скорости и угла соударений. Если угол соударения частицы инструментальной среды со сплайном лежит в интервале $20^\circ - 70^\circ$ и отношение $h / R \geq 0,15$, то используется формула (8). В остальных случаях применяется формула (9).

Аналогично вычисляется шероховатость:

$$Rz_j = Rz_{исх} - k_R \cdot \frac{Rz_u \cdot \sigma_{6ч} \cdot \sin \beta_i}{Rz_{исх} \cdot \sigma_{60}} \cdot \sqrt{\frac{(1 - R^2) \cdot m_u \cdot m_d \cdot V_i^2}{(m_u + m_d) \cdot \pi \cdot d_u \cdot \sigma_{60}}}, \quad (10)$$

где $Rz_{исх}$, Rz_u - исходная высота микронеровностей детали и частицы; $\sigma_{6ч}$ - предел прочности материала частицы.

Адекватность моделей съема металла и параметра шероховатости Rz подтверждается результатами экспериментальных исследований (рис. 5). Погрешность не превышает 20%.

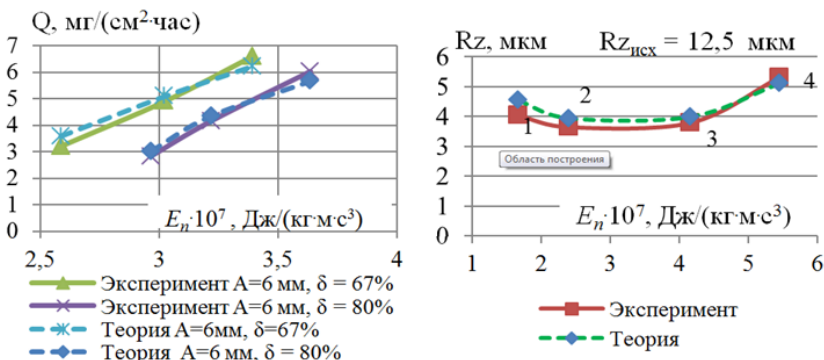


Рис. 5. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей интенсивности съема металла Q (а) и шероховатости Rz (б) от удельной плотности полной кинетической энергии E_n ($B=350$ мм, $\delta = 67\%$): 1 - $A=4$ мм, $\omega=85$ рад/с; 2 - $A=4$ мм, $\omega=125$ рад/с; 3 - $A=6$ мм, $\omega=85$ рад/с; 4 - $A=6$ мм, $\omega=125$ рад/с

Увеличение E_n в 1,4-1,5 раза пропорционально повышает интенсивность съема металла в 1,8-2 раза (рис. 5). Для достижения минимального значения Rz необходимо обеспечить оптимальное значение $E_n = E_{n\text{opt}}$, при котором Rz снижается на 40-45%. При $E_n > E_{n\text{opt}}$ величина Rz увеличивается из-за увеличения глубины внедрения зерен. При $E_n < E_{n\text{opt}}$ величина Rz увеличивается из-за недостатка энергии у частиц для смятия заданной высоты микронеровностей (рис. 5). Интенсивность снижения Rz на исследуемых режимах обратно пропорциональна E_n (рис. 6). Таким образом, для достижения минимальной Rz при высокой интенсивности съема металла необходимо обеспечить компромиссное оптимальное значение $E_{n\text{opt}}^*$.

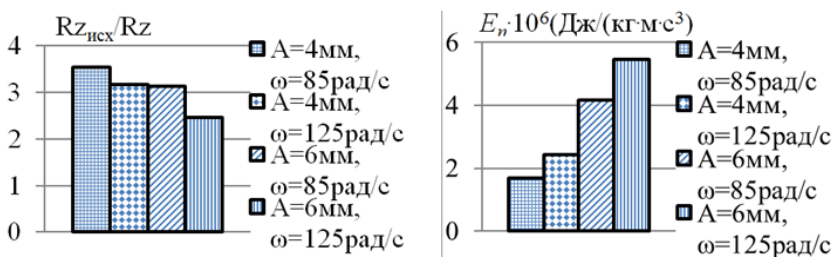


Рис. 6. Сравнение интенсивности снижения шероховатости со значениями удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды при аналогичных режимах ($Rz_{исх}=12,5$ мкм)

В пятой главе разработана методика проектирования технологии виброабразивной обработки на основе критерия удельной плотности полной кинетической энергии (E_n) и новая динамическая схема вибростанка с активизатором инструментальной среды, системой контроля и управления режимами обработки (рис.7).

Особенностью методики является определение режимов посредством компьютерного моделирования процесса обработки с использованием установленных закономерностей их влияния (а также ширины рабочей камеры, степени ее заполнения, размеров частиц) на E_n и обеспечивающих ее оптимальное значение.

При использовании новой динамической схемы вибростанка удельная плотность полной кинетической энергии повышается в 2-2,5 раза (рис.8, а). При изменении степени заполнения рабочей камеры с экраном среднее давление в ней пропорционально повышается, а импульсное давление растет по экстремальной зависимости с максимумом при степени заполнения 50-60% (рис. 8,б).

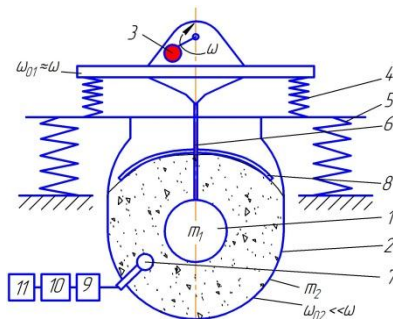


Рис. 7. Новая динамическая схема вибростанка: 1 – активизатор; 2 – рабочая камера; 3 – вибратор; 4 – упругие элементы активизатора; 5 – упругие элементы рабочей камеры; 6 – крепление активизатора к вибратору; 7 – датчик; 8 - экран; 9 - виброизмерительный прибор ВИ-6-5М12; 10 – контроллер; 11 – персональный компьютер

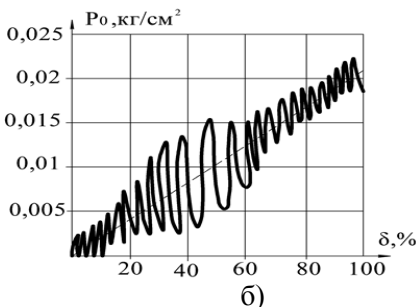
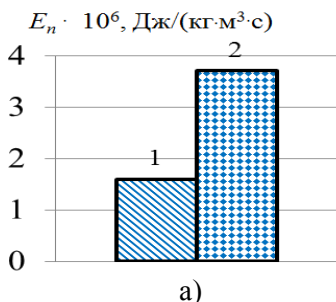


Рис. 8. Значения E_n для традиционной (1) и новой (2) динамической схемы (а) вибростанка (при $A=4$ мм, $\omega=105$ рад/с; $\delta=67\%$); экспериментальная зависимость давления в вибрирующей инструментальной среде от заполнения камеры замкнутой формы (б)

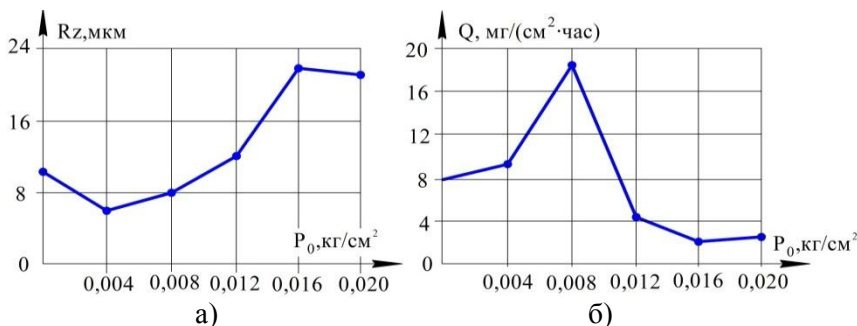


Рис. 9. Зависимость шероховатости Rz от давления (а) P_0 в инструментальной среде ($Rz_{исх}=30-35$ мкм); зависимость интенсивности съема металла (б) от давления P_0

При изменении давления в инструментальной среде за счет «ручной» настройки технологической системы в новой динамической схеме вибростанка представляется возможным достижение оптимальных значений интенсивности съема металла и шероховатости (рис. 9).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

В работе решена актуальная задача интенсификации съема металла и снижения шероховатости поверхности при виброабразивной обработке деталей без закрепления, которая осуществляется за счет оптимизации удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды посредством управления амплитудой, частотой, формой траектории колебаний, шириной рабочей камеры, степенью ее заполнения, размерами частиц инструментальной среды.

В ходе решения этой задачи получены следующие основные результаты.

1. Разработан метод интенсификации процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления, отличающийся тем, что повышение интенсивности съема материала и снижения шероховатости поверхности деталей достигается за счет оптимизации энергетического состояния инструментальной среды на основе критерия удельной плотности полной кинетической энергии, позволяющий повысить интенсивность обработки на 30-50% и более по сравнению с традиционной схемой виброабразивной обработки.

2. Установлены закономерности влияния режимов обработки (амплитуды, частоты и формы траектории колебаний), ширины рабочей камеры и степени ее заполнения, размеров частиц инструментальной

ной среды на удельную плотность полной кинетической энергии (E_n), которые состоят в следующем. Повышение амплитуды с 3 до 6 мм экстремально увеличивает E_n в 3,5-4 раза, а при дальнейшем ее увеличении с 6 до 7 мм E_n снижается на 20-25%. Увеличение частоты колебаний с 75 до 125 рад/с повышает E_n в 1,5-1,7 раза, при дальнейшем увеличении частоты до 165 рад/с происходит монотонное снижение E_n на 10-15%. Увеличение ширины рабочей камеры с 250 до 350 мм приводит к снижению E_n на 40-50%. Возрастание степени заполнения рабочей камеры инструментальной средой с 50 % до 80% монотонно снижает E_n на 40-60%. Увеличение размера частиц с 3 до 11 мм изменяет E_n в 4-5 раз по полиэкстремальной зависимости: с максимумом при 6-7 мм, и двумя минимумами при 3-4 мм и 9-10 мм. Изменение формы траектории колебаний рабочей камеры с круговой на вертикальный и горизонтальный эллипс вызывает изменение E_n , соответственно, на 20-25% и 35-40%.

3. Установлены закономерности влияния E_n на интенсивность съема материала и формирования шероховатости при виброабразивной обработке деталей без закрепления с учетом их формы и взаимного расположения поверхностей, которые состоят в следующем. Увеличение E_n в 1,4-1,5 раза приводит к монотонному увеличению интенсивности съема металла в 1,8-2 раза. Для достижения минимального значения R_z необходимо обеспечить оптимальное значение $E_n = E_{n \text{ opt}}$, при котором R_z снижается на 40-45%. При $E_n > E_{n \text{ opt}}$ величина R_z увеличивается из-за увеличения глубины внедрения зерен. При $E_n < E_{n \text{ opt}}$ величина R_z увеличивается из-за недостатка энергии у частиц для смятия заданной высоты микронеровностей. Интенсивность снижения R_z на исследуемых режимах обратно пропорциональна E_n . Для достижения минимальной R_z при высокой интенсивности съема металла необходимо обеспечить компромиссное оптимальное значение $E_n^* \text{ opt}$.

4. Разработана методика проектирования технологии виброабразивной обработки деталей без закрепления на основе критерия удельной плотности полной кинетической энергии инструментальной среды, обеспечивающая повышение интенсивности съема металла и снижения шероховатости на различных участках деталей посредством компьютерного моделирования процесса обработки.

5. Разработана динамическая схема вибростанка, отличающаяся введением в технологическую систему активизатора инструментальной среды, системы контроля и управления режимами обработки, позволяющая интенсифицировать процесс обработки в 2-2,5 раза по сравнению с традиционной схемой виброабразивной обработки.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Ачкасов, В.А. К вопросу о критерии оптимизации оборудования для виброабразивной обработки с U-образной рабочей камерой [Текст] / В.А. Ачкасов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012.– № 6.– С.16-19.
2. Ачкасов, В.А. Основы расчета и проектирования упругих элементов виброустановок [Текст]/ А.П. Сергиев, В.А. Ачкасов, А.И. Еськов, А.С. Долгих // Вестник Машиностроения.– 2011.– № 12. – С. 26-29.
3. Ачкасов, В.А. Удаление заусенцев с плоских деталей в абразивных средах в переменном силовом поле [Текст] / А.П. Сергиев, С.В. Тюрина, В.А. Ачкасов // СТИН. – 2005. – №12. – С. 24-28.

Публикации в других изданиях:

4. Ачкасов, В.А. Динамика процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления с учетом формы и расположения поверхностей [Текст] / Ю.Р.Копылов, В.А. Ачкасов // Всерос. науч.-техн. конф. «Авиакосмические технологии»: сб. науч. тр.– Воронеж, 2013.– С.199-206.
5. Ачкасов, В.А. Компьютерное моделирование процесса виброабразивной обработки деталей без закрепления с учетом формы и расположения поверхностей [Текст] / Копылов Ю.Р., В.А. Ачкасов // Межд. науч.-техн. конф. «Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов»: сб.науч.тр. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2013.– С. 347-353.
6. Ачкасов, В.А. Зависимость производительности и шероховатости от конструктивных параметров вибромашины [Текст] / А.П. Сергиев, В.А. Ачкасов, А.С. Долгих, А.И. Еськов // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. статей в 2 т.: Т. 2. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – С. 306-310.
7. Ачкасов, В.А. Методика идентификации модели технологической загрузки в машинах для виброабразивной обработки [Текст] / В.А. Ачкасов // 8-я всероссийская науч.-практ. конф. студентов и аспирантов с межд. участием: сб. науч. тр. в 4-х т.: Т. 3. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2012. – С. 9-12.
8. Ачкасов, В.А. Моделирование и расчет упругих элементов пространственных вибромашин [Текст] / А.П. Сергиев, В.А. Ачкасов, С.С. Сергиев // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. тр. – Курск: КГТУ, 2008. – С. 152-160.

9. Ачкасов, В.А. Моделирование динамики пространственной маятниковой вибромашины в программном комплексе «Универсальный механизм» [Текст] / А.П. Сергиев, В.А. Ачкасов // Молодые ученые - производству: Сб. тр. регион. науч.- практ. конф. в 3-х т.: Т. 2. – Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2007. – С.173-178.

10. Ачкасов, В.А. Перспективное оборудование для отделочной виброабразивной обработки [Текст] / В.А. Ачкасов, И.О. Матвеев, Д.А. Спицын // 62-е дни науки студентов МИСиС: материалы межд.науч.-техн. конф. – Москва.: МИСиС, 2007.– С. 246-247.

11. Ачкасов, В.А. К вопросу оптимизации режимов обработки в вибромашинах, реализующих колебания по закону конического маятника [Текст] / А.П.Сергиев, В.А. Ачкасов // Образование, наука, производство и управление: Сб. тр. межд. науч.-практ. конф. в 4-х т. - Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006. - Т.1. – С. 375-377.

12. Ачкасов, В.А. Влияние гироскопического момента на динамику вибромашины [Текст]/ В.А. Ачкасов, Н.С. Дронова, А.С. Павлова, А.П. Сергиев // Молодые ученые – производству: Сб. тр. регион. науч.-практ. конф.– Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2006.– С. 122-124.

13. Ачкасов, В.А. Машины для виброабразивной обработки без жесткой кинематической связи, реализующие колебания по закону конического маятника [Текст] / А.П. Сергиев, В.А. Ачкасов // Образование, наука, производство и управление: Сб. тр. регион. науч. конф.: в 2-х т.– Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2005.- Т.1.– С. 145-147.

14. Ачкасов, В.А. Отделочно-зачистная обработка в абразивных средах в переменном силовом поле [Текст] / А.П. Сергиев, С.В. Тюрина, В.А. Ачкасов // Образование, наука, производство и управление в XXI веке: Сб. тр. межд. научн. конф. в 4-х т.; Под редакцией проф. В.Б. Крахта. - Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2004. - Т.2. – С. 199-204.

Патент РФ на изобретение

15. Устройство для отделочной обработки: патент на изобретение № 2330752 РФ: МПК В24В 31/06 / А.П. Сергиев, В.А. Ачкасов, С.С. Сергиев; заявители и патентообладатели А.П. Сергиев, В.А. Ачкасов, С.С. Сергиев. - №2006119277/02; заявл. 01.06.06.

Подписано в печать 07.10.2013. Формат 60х84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 120 экз. Заказ 65.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.