

Реферат

Пояснительная записка содержит 69 листов формата А4, 5 таблиц, 33 рисунка, 20 источников литературы и 3 приложения

СМЕННАЯ МНОГОГРАННАЯ ПЛАСТИНА, РАБОЧИЙ БАРАБАН, ЛОКАЛЬНАЯ ПОЛОСТЬ, АБРАЗИВНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ, ШЕСТИГРАННАЯ ФОРМА.

В пояснительной записке проведен анализ оборудования и оснастки для виброабразивной обработки сменных многогранных пластин, а также исследования, направленные на усовершенствование конструкции виброабразивной установки для обработки сменных многогранных пластин без центральных отверстий, с целью повышения производительности обработки; разработана компьютерная и математическая модель, описывающая влияние технологических параметров обработки на силы соударений и их количество между сменной многогранной пластиной и абразивной гранулой, по которым произведена оценка повышения производительности.

ПГУ 2.15.04.05.02.00.00 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>«Оснастка и исследование виброабразивной обработки сменных многогранных пластин режущего инструмента»</i>		
Разраб.		<i>Богатырев К.П.</i>					
Провер.		<i>Липов А.В.</i>					
Н. контр.		<i>Липов А.В.</i>					
Утв.							
					Лит.	Лист	Листов
						3	69 3
					<i>Кафедра «ТОМ», гр.20ММм1</i>		

Содержание

Введение.....	6
1. Состояние вопроса и анализ исходных данных для исследования.....	9
1.1 Виды отказов твердосплавных режущих инструментов и способы их предупреждения	9
1.2 Оборудование для виброабразивной обработки сменных многогранных пластин.	14
1.3 Оснастка для виброабразивной обработки сменных многогранных пластин.	18
1.4 Обзор наполнителя для виброабразивной обработки.....	23
1.5 Технологические параметры виброабразивной обработки.....	26
1.6 Цели и задачи проектирования.....	27
2. Предлагаемая оснастка для виброабразивной обработки.....	28
2.1 Конструкция и описание работы предлагаемой оснастки	28
3. Моделирование процесса обработки в предлагаемом устройстве с использованием программного обеспечения SolidWorks Motion.....	33
3.1 Анализ исходных данных и допущения при моделировании.....	33
3.2 Результаты моделирования.....	39
4. Исследование процесса обработки	41
4.1 Метод математического планирования эксперимента для исследования процесса обработки	41
4.2 Разработка математической модели процесса вибрационной обработки СМП	45
5. Реализация полученных результатов.....	59
5.1 Анализ зависимостей для технологических параметров	59
5.2 Определение геометрических параметров элементов рабочего барабана	60
Выводы по работе.....	63
Список литературы.....	64
Приложение А	67

Приложение Б.....	68
Приложение В	69

Введение

Тема магистерской диссертации: оснастка и исследование виброабразивной обработки сменных многогранных пластин режущего инструмента

Актуальность:

Режущие твердосплавные инструменты, в сравнении с инструментами из быстрорежущих сталей, находят все большее применение при механической обработке. Это связано с тем, что такой инструмент имеет более высокие характеристики износостойкости, твердости, жаростойкости и допустимых скоростей резания.

К твердосплавным режущим инструментам относится цельный инструмент, т. е. полностью изготовленный из твердого сплава, и снабженный напаянными или сменными режущими пластинами из этих материалов.

Концевой инструмент (различные фрезы, сверла и т.п.) небольших размеров в основном используется как цельная деталь из-за высокой стоимости твердого сплава. Напайные и сменные пластины снабжаются различными инструментами (токарными резцами, различными фрезами, сверлами и т.п.). При этом предпочтение отдается сменным многогранным пластинам (СМП). Так, например, объем инструмента с СМП составляет примерно 55 % от всего используемого инструмента, а количество снимаемой им стружки достигает 50–60 % от общего объема стружки при механической обработке [1,2]. Это объясняется тем, что инструмент с СМП по сравнению с инструментом с напаянными вставками, по данным ВНИИ инструмента, увеличивает стойкость инструмента на 25–30 %, снижает расход твердого сплава на 2 раз, снижает затраты на производство в 3–4 раза, повышает производительность труда на 20–30%.

Особенно эффективно использование инструмента с СМП на станках с ЧПУ, что позволяет проводить безналадочную обработку.

Основными причинами, в результате которых, происходит поломка пластин считаются выкрашивания и сколы на режущей кромке, что вызвано недопустимыми напряжениями на режущем клине, которые во много раз превышают максимальные значения

Среди способов для увеличения прочностных показателей режущей кромки являются: отрицательная фаска на режущей части СМП, нанесение специальных покрытий и термообработок, округление режущих кромок и т. д. [3,4].

Применение каждого из этих способов должно обеспечивать требуемые параметры режущего инструмента при наименьших затратах на их достижение.

Метод округления режущих кромок считается одним из самых распространенных по повышению прочности инструмента из твердого сплава с помощью оборудования для объемной обработки: виброабразивного (ВО), центробежно-ротационного (ЦРО) и др. ЦРО может обеспечивать высокий показатель производительности, но при таком способе достаточно велик процент брака в виде возникающих сколов и выкрашиваний режущего клина, в результате столкновения СМП между собой. Похожий недостаток встречается и при классической объемной виброабразивной обработке, данный вид обработки менее производительный, но он может быть реализован, исключая взаимные столкновения сменных многогранных пластин. Таким образом методы, направленные на совершенствование показателей ВО сменного многогранного инструмента, будут являться актуальными.

Научная новизна: установлены взаимосвязи между числом соударений абразивных гранул со сменными многогранными пластинами и величинами этих усилий в зависимости от режимов работы виброабразивной установки, массы абразивных гранул и сменных многогранных пластин.

Практическая ценность: предложена шестигранная форма локальных полостей рабочего барабана, в которые загружают абразивный наполнитель и обрабатываемые пластины

Научные публикации: по теме магистерской диссертации опубликована 1 научная статья в сборнике, входящем в РИНЦ:

Оснастка и исследование виброабразивной обработки сменных многогранных пластин режущего инструмента / А.В. Липов, К.Д. Бастылов // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 17-18 марта 2022 года / Под научной редакцией В.В. Салмина. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 135-138.

1. Состояние вопроса и анализ исходных данных для исследования.

1.1 Виды отказов твердосплавных режущих инструментов и способы по их предупреждению

По статистике использования инструмента с СМП на машиностроительных производствах выявлено, что процент отказов, по причине разрушения пластины может достигать 70-75% [2]. В ходе анализа по видам отказов СМП в промышленных условиях выявлено, что характерным видом разрушения пластины являются сколы и выкрашивания режущей кромки, в большей степени, в условиях чернового и прерывистого резания, в следствие превышения напряжений на режущей кромке за максимальные значения.

Наличие сколов вызывают существенное увеличение силы резания на режущем клине инструмента. Сколы вызывают значительное увеличение сил резания на режущей кромке инструмента. [5] Положение плоскостей скола, при данных повреждениях определяется от силы резания, а именно ее направления. Возможно появление сколов, вызванное прерывистым резанием, в основном при обработке материалов повышенной вязкости, когда происходит наростообразование. К наиболее распространенным причинам появления сколов является наличие в заготовках твердых неметаллических включений, возникающих из-за дезоксидации. К перенапряжениям такого рода крайне чувствительны износостойкие сорта твердосплавного инструмента, особенно, если работа происходит при малом поперечном сечении стружки.

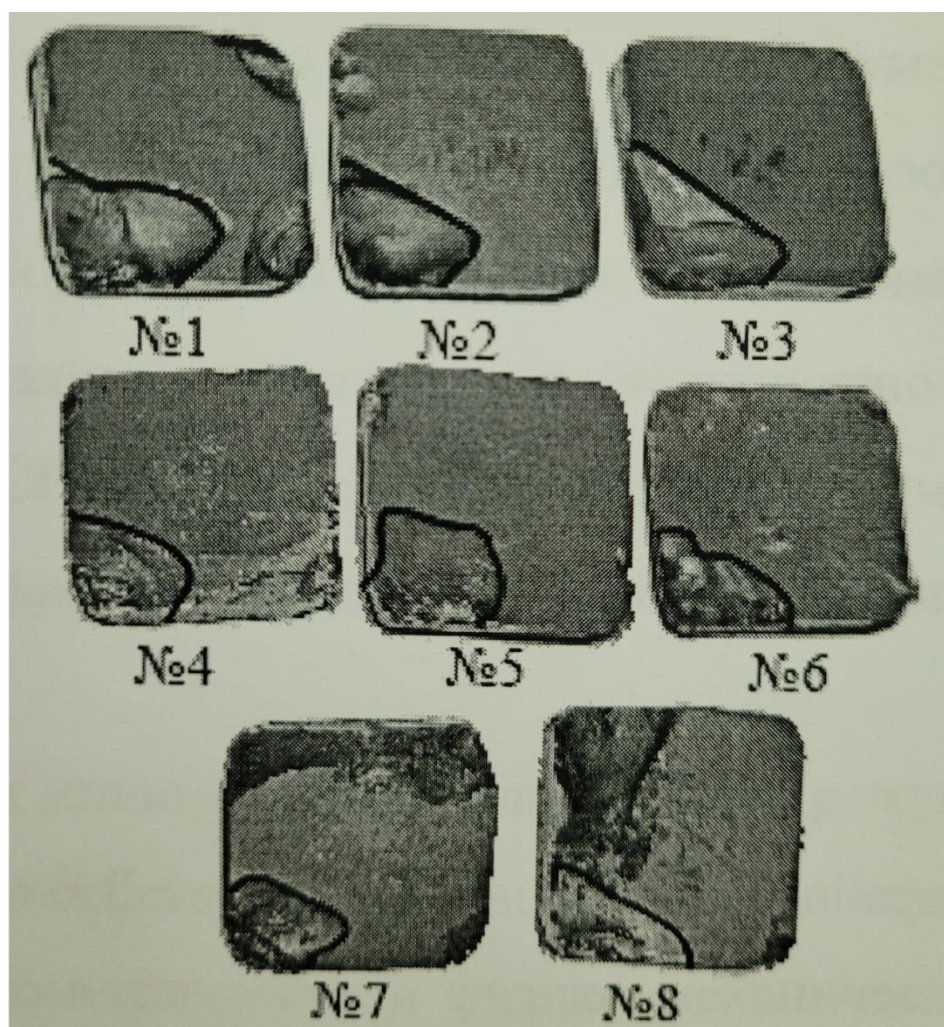


Рисунок 1 –Разрушения четырехгранных СМП из материала Т15К6 после фрезерования

Изменения сил резания за короткий промежуток времени, которые наблюдаются при фрезеровании, могут приводить к образованию поперечных трещин. Знакопеременные нагрузки, в процессах, сопровождающихся суставчатой стружкой, при повышенном количестве циклов нагружений, тоже могут привести к образованию поперечных трещин [5].

Трещины продольного вида, которые возникают при кратковременном изменении температурных показателей. Их характер схож с линией изотерм температурных полей режущего клина. В процессе фрезерования происходит нагрев режущей кромки до высоких температур, с последующим

охлаждением на воздухе. В силу того, что растягивающие напряжения поверхностного слоя превосходят предел текучести, показатель которого у горячего инструмента меньше, чем у холодного, это приводит к возникновению пластических деформаций. Так же пластические деформации происходят в твердых сплавах с большим содержанием связки, а также при возрастании температуры режущего клина до степени, когда происходит размягчение режущей части. [5].

Чтобы уменьшить число поломок СМП путем изменения условия их работы, нужно поменять углы накола инструмента, убавить режимы резания, поменять состав СОТС и т.д. Однако при использовании СМП в условиях автоматизированного оборудования, когда происходит изменение в технологии и системе СПИД, может произойти резкое уменьшение производительности обработки, что в подобных условиях производства является недопустимым.

Повышение собственных прочностных характеристик инструмента также является одним из способов для уменьшения его числа поломок в процессе резания. Прочностные показатели сменных многогранных пластин определяются параметрами геометрического и физико-механического характера, а также формой профиля режущего клина, характеристикой поверхностного слоя и микрогеометрией опорной и рабочей поверхностей.

Технология изготовления режущего инструмента, в частности соблюдение всех необходимых физико-механических и геометрических показателей во многом определяет его эксплуатационные характеристики

Среди способов повышения прочностных параметров режущего клина можно выделить следующие:

1. Увеличение прочностных характеристик материала, из которого изготовлена режущая часть инструмента: использование твердых сплавов, с высокими прочностными показателями, применение специальных методов для упрочнения режущей части.

2. Изменение геометрической формы профиля нормального сечения режущей кромки.

3. Изменение шероховатости опорных и рабочих поверхностей режущего инструмента

Использование первого метода имеет ряд ограничений, в силу того, что при изменениях характеристик в твердых сплавах, чтобы повысить их ударную вязкость, довольно часто приводит к нежелательным последствиям в виде изменения теплопроводности, износостойкости, обрабатываемости, стоимости и адгезионных свойств и т.д. в худшую сторону. [6]

Принцип действия второго метода основан на изменении профиля нормального сечения режущей кромки, что влечет за собой изменение сил, действующих на нее, и тем самым более равномерному распределению напряжений в режущем клине.

Одним из наиболее распространенных способов повышения прочности инструмента из твердого сплава является округление его режущих кромок, что относится ко второму методу изменения геометрической формы профиля нормального сечения режущей кромки. Суть данной операции заключается в том, что в конструкции режущей кромки появляется дополнительный элемент в виде радиуса округления режущей кромки r . При увеличении величины r начинают возрастать силы резания, в основном происходит увеличение силы P_x , которая действует противоположно направлению движения подачи инструмента. Данный процесс ведет за собой изменение направления сил, действующих на режущий клин, в сторону биссектрисы угла β заострения режущей кромки, что способствует симметричному нагружению режущего клина и, как следствие, изменению напряжений и повышению его прочности.

Также установлено, что в результате округления режущей кромки инструмента происходит увеличение температуры и мощности резания. Возрастание тепловых и силовых нагрузок при достижении оптимальных

значений по критерию прочности значения ρ является фактором, оказывающим негативное воздействие, и который влияет на прочность режущего инструмента. Тем самым оценивая влияние прочности и стойкости режущего инструмента в зависимости от радиуса округления режущего клина, можно сделать вывод, что оно является экстремальным, а значения прочностных характеристик имеют большой диапазон в зависимости от таких параметров, как: режимы обработки и обрабатываемый материал. При таком характере влияния ρ на качественные показатели инструментов из твердых сплавов возникает потребность в определении радиуса округления ρ при разных условиях обработки.

Вибрации, возникающие в процессе обработки, могут снижаться с увеличением показателя ρ , в силу дополнительной нагрузки системы СПИД

Также с ростом ρ в поверхностном слое детали после обработки, наблюдается увеличение величины и глубины распространения сжимающих остаточных напряжений

Значение величины ρ является индивидуальным и зависит от таких факторов как: диаметр вписанной окружности СМП, марка твердого сплава и согласно ГОСТ 19086-80 может принимать значения от 0,02 до 0,1 мм. Операцию округления режущих кромок рекомендовано проводить с использованием виброабразивной обработки.

Из сказанного выше следует, что для обеспечения более продолжительного сохранения геометрических показателей режущей кромки ее следует округлять до определенных значений, с целью повышения прочности и, как следствие, стойкости режущего инструмента,

1.2 Оборудование для виброабразивной обработки сменных многогранных пластин.

А.П. Бабичев выделяет три типа рабочих камер виброабразивных установок как наиболее распространенные в настоящее время: лотковые, торовые и спиральные. [7,8]

Среди этих установок можно выделить лотковую ВО установку с U-образной камерой, для которой возможна реализация обработки СМП без контакта друг с другом.

Классическая схема обработки СМП в U – образных лотковых ВО установках представлена на рисунке 2.

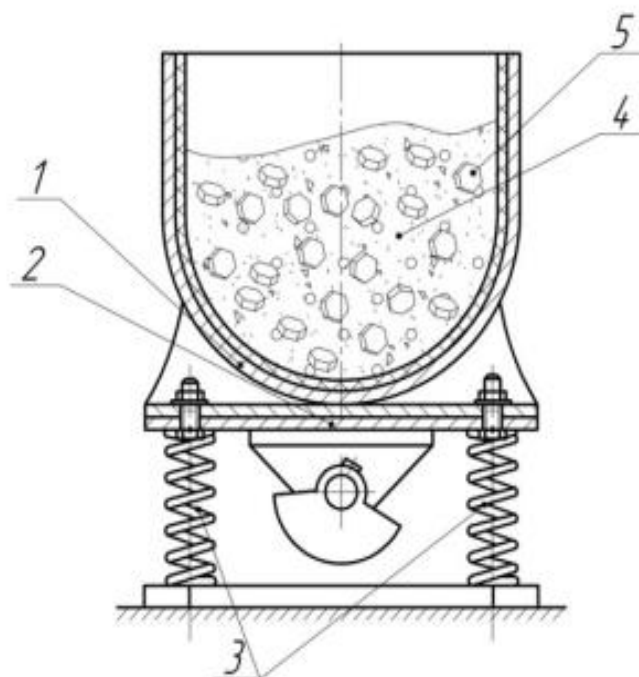


Рисунок 2 – Виброабразивная установка с U – образной камерой

Состоит данная установка из упруго подвешенного корпуса (рабочей емкости) с цилиндрическим дном 1, основания с эксцентриковым вибратором 2 и пружинной подвески 3. Абразивная среда 4 вместе с деталями 5 загружается в конкретной пропорции в рабочую камеру. Далее запускают вращение вала эксцентрикового вибратора и начинается

обработка. В данном случае время обработки определяется временем для необходимой величины радиуса округления определенной величины. Движение галтовочного наполнителя вместе с заготовками в барабане виброабразивной установки при обработке имеет траекторию кругового типа относительно продольной оси барабана. в лотковых U-образных виброабразивных установках наполнитель движется по траектории который повторяет поверхность цилиндра.

На рисунке 3 приведена схема габаритных размеров рабочей камеры.

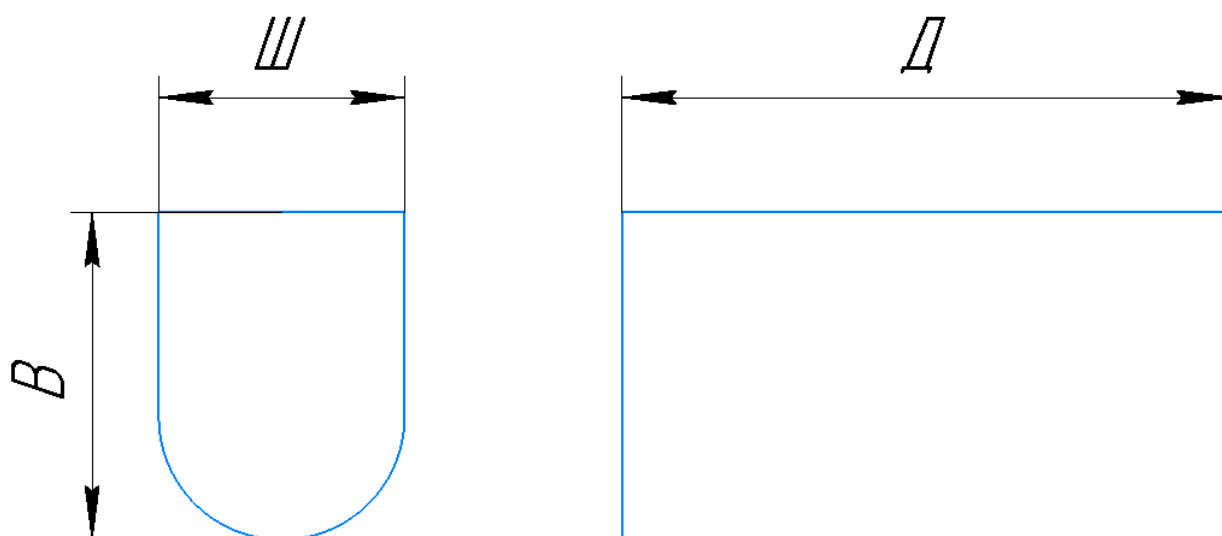


Рисунок 3 - Схема габаритных размеров рабочей камеры

Данная виброабразивная установка может осуществлять следующие действия:

- снимать заусенцы с поверхности детали;
- полировать и объемно шлифовать детали;
- притуплять острые части элементов;
- удалять окалины и погрешности после термических обработок;
- обезжировать и убирать загрязнения;
- добавлять необходимую шероховатость и матовость изделиям;
- отделку деталей из цветных металлов на финишном этапе.

Среди промышленных образцов известны виброабразивные установки с U – образной рабочей камерой производственного центра «ТОП» (рис. 4,5). Данные виброабразивные установки представляют собой рабочую камеру U-образной формы снизу которой смонтирован электродвигатель с вибрационным приводом. При больших размерах лотковых машин, требующих для работы больших мощностей одного электродвигателя недостаточно; в таких машинах на каждую из них устанавливается по два двигателя с виброприводом.

Основным преимуществом отделочных станков лоткового типа является возможность обработки крупногабаритных, объемных и длинномерных заготовок. Такие заготовки невозможно обработать ни на каком другом станке, а использование ручной обработки намного дороже, а иногда и невозможно из-за формы и размеров заготовок.

На примере производственного центра «ТОП» показаны основные типоразмеры U-образных виброабразивных установок (таблица 1-2).



Рисунок 4 – U-образная виброабразивная установка «Импульс»

Таблица 1. Характеристики виброабразивной установки «Импульс»

Модель установки	Общая емкость камеры, л	Размер рабочей камеры (ШхВхД), мм	Длина установки, мм	Высота установки, мм	Ширина установки, мм
«Импульс» 15	15	210х230х500	690	570	370
«Импульс» 100	100	320х380х900	1090	780	520
«Импульс» 200	200	400х500х1100	1300	895	600
«Импульс» 300	300	440х550х1340	1550	970	680
«Импульс» 500	500	600х620х1500	1720	1050	820
«Импульс» 50	50	260х300х720	910	700	450



Рисунок 5 - U-образная виброабразивная установка «Сегмент»

Таблица 2. Характеристики виброабразивной установки «Сегмент»

Модель установки	Общая емкость камеры, л	Размер рабочей камеры (ШхВхД), мм	Длина установки, мм	Высота установки, мм	Ширина установки, мм
«Сегмент» 800	800	700x800x1600	3030	1250	940
«Сегмент» 1000	1000	750x850x1800	3370	1300	1080
«Сегмент» 1600	1600	880x1000x2000	3700	1400	1250
«Сегмент» 2200	2200	1000x1100x220	3820	1520	1370

1.3 Оснастка для виброабразивной обработки сменных многогранных пластин.

Среди СМП режущего инструмента по креплению к державкам инструмента различают пластины без центральных отверстий и с центральными отверстиями (рис.6-7)

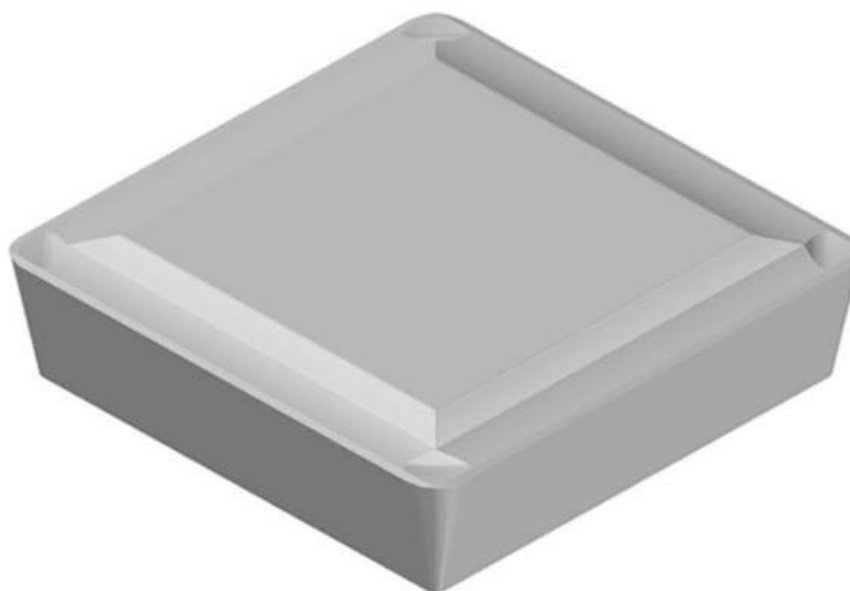


Рисунок 6 – СМП без центрального отверстия



Рисунок 7 – СМП с центральным отверстием.

Чтобы уменьшить количество брака, вызванное сколами и выкрашиваниями при соударении пластин между собой при классической обработке известны некоторые виды оснастки (рис. 8-11).

Для того, чтобы уменьшить силы, действующие на детали при взаимных соударениях, используется специальный барабан 1, для размещения в нем рабочей среды и СМП. Диаметр барабана равен 0,7-0,95 диаметра цилиндрической части рабочей камеры (рис.8). Достижение снижения сил при столкновениях между деталями достигается за счет более малых колебаний рабочего барабана, в результате введения в систему дополнительного элемента

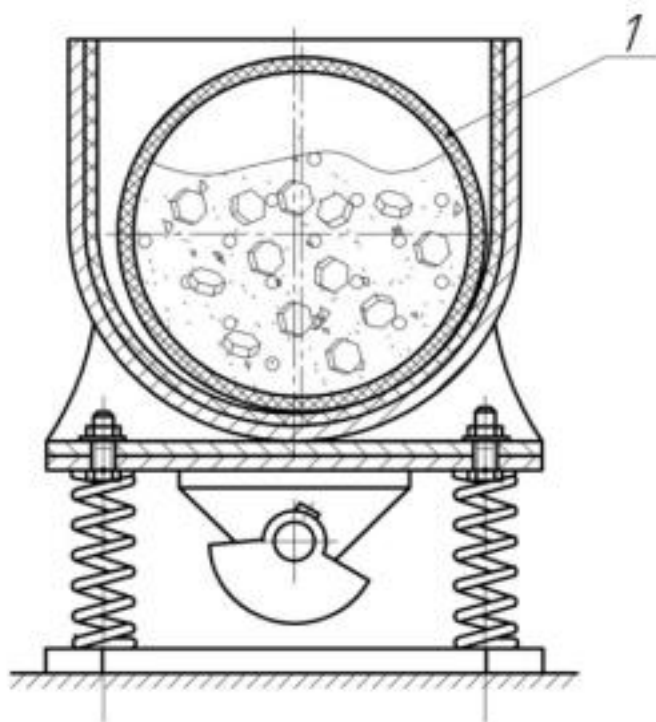


Рисунок 8 – Виброобразивная установка с барабаном

С целью дополнительного уменьшения воздействий между СМП в систему вводятся рабочие барабаны 1, которые размещаются в несущей среде 2, в качестве которой может использоваться песок, металлические отходы, галька и т.п. (рис. 9). При этом несущая среда гасит часть колебаний, которые передаются на рабочие барабаны и тем самым уменьшается сила соударений между сменными многогранными пластинами.

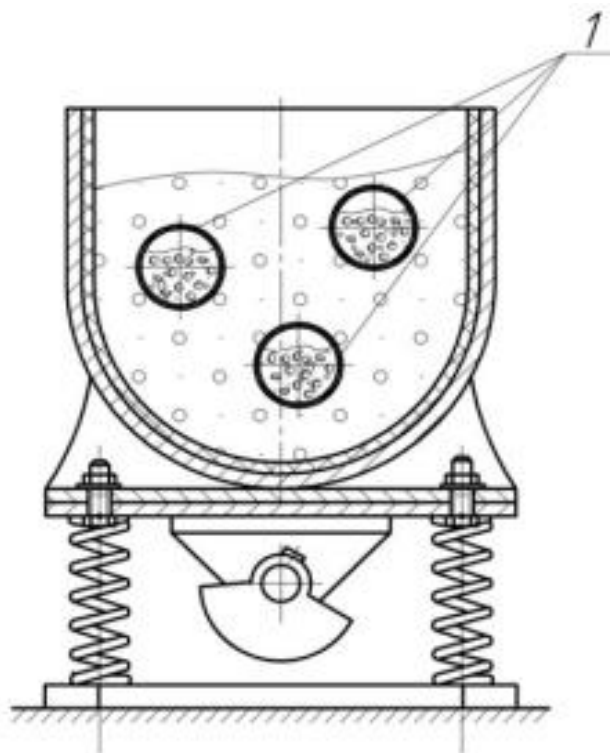


Рисунок 9 – Виброабразивная установка с барабанами и несущей средой

В ситуациях, при которых приведенные выше способы обработки СМП не обеспечивают требуемых показателей, применяют конструкцию, состоящую из кассетных барабанов, свободно размещенных в абразивной среде (рис. 10). Данный вид оснастки применим для обработки СМП с центральными отверстиями.

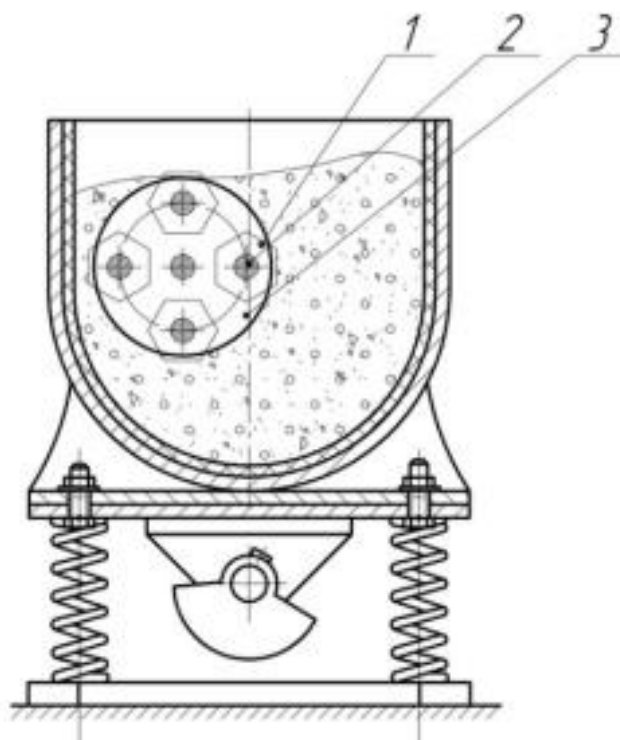


Рисунок 10 – Виброабразивная установка для обработки СМП с центральными отверстиями.

СМП 1 закрепляется на оси 2, установленной в кассетном рабочем барабане 3 с наружным диаметром 0,5–0,6 диаметра цилиндрической нижней части рабочей камеры. Абразивный наполнитель находится в контакте с СМП, которые, в свою очередь, не контактируют между собой. Данный вид оснастки позволяет обрабатывать СМП без контакта друг с другом, при этом исключая дефекты в виде сколов и выкрашиваний практически при любых режимах обработки.

Для исключения столкновения пластин без центральных отверстий известно устройство рабочего барабана, выполненного в виде пакета контейнеров коробчатого типа, которые соосно, друг за другом скреплены между собой, с помощью оси и гаек. Диаметр барабана в данном случае будет равен 0,7-0,95 диаметра округлой части рабочей камеры данная конструкция показана на рисунке 11.

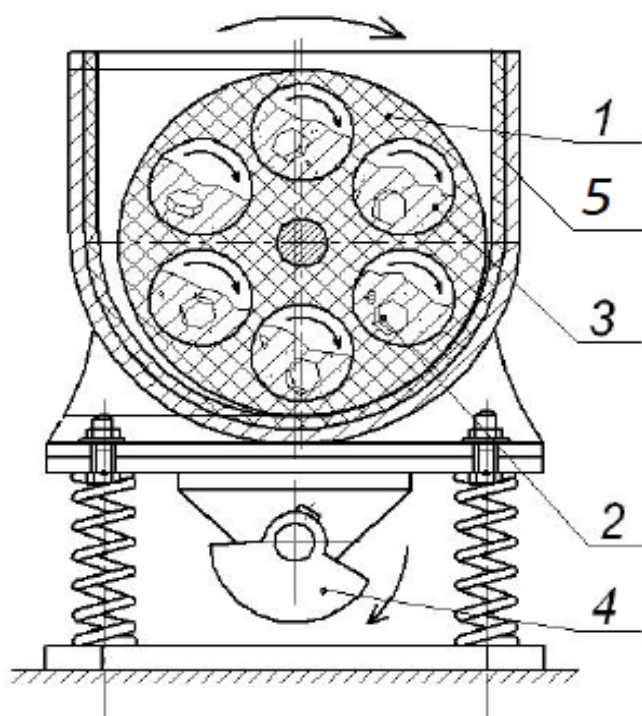


Рисунок 11 – Виброабразивная установка для обработки СМП без центральных отверстий.

В каждом контейнере 1 сделаны цилиндрические локальные полости, находящиеся по окружности, в которые перед процессом обработки закладывается по одной пластине 2 и соответствующая порция абразивного наполнителя 3. При включении оборудования в работу загрузки локальных полостей совершают вращательно-колебательные движения в направлении вращения эксцентрика 4, обеспечивающего соответствующие перемещения рабочей камеры 5 вибрационного станка. Вращательное движение задается вращением рабочего барабана, а колебательное движение передается от стенок рабочей камеры станка.

1.4 Обзор наполнителя для виброабразивной обработки

Абразивный наполнитель на керамической связке. Данный тип наполнителя является наиболее распространенным при виброабразивной обработке. Может отличаться по своей геометрической форме, а также

зернистости абразива, в качестве которого в основном применяется электрокорунд. Данные гранулы могут иметь плотность равную от 2,4 до 3,7 г/см³. Основные конфигурации изображены на рисунке 12.

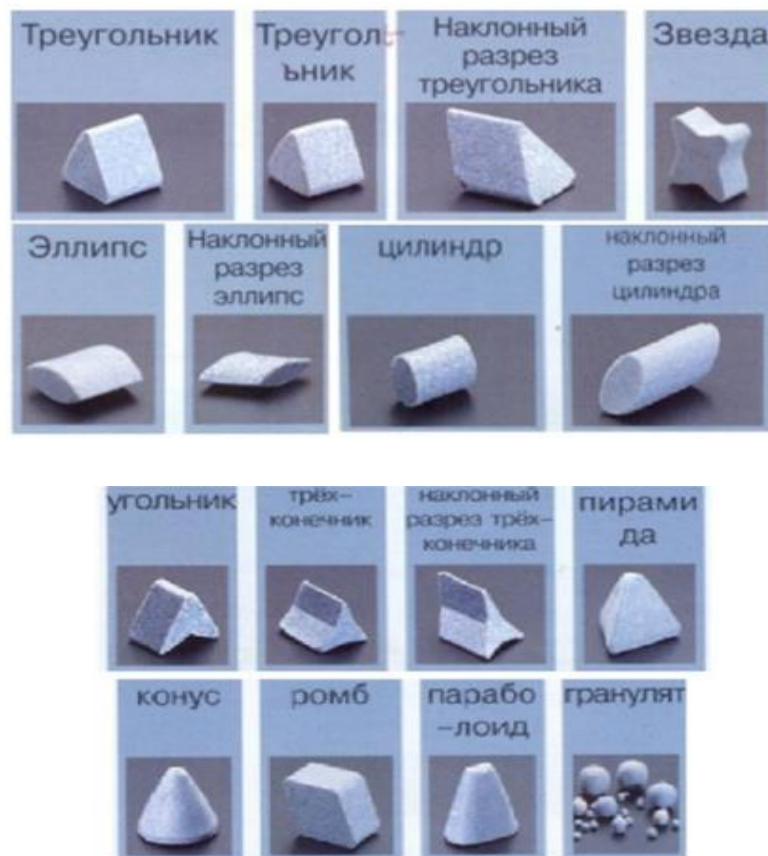


Рисунок 12 – Формы абразивных гранул на керамической связке

Абразивный наполнитель на пластиковой связке. Данный вид наполнителя, по сравнению с керамическим, имеет меньшую твердость и плотность: от 1,4 до 1,86 г/см³, что позволяет обрабатывать тяжелые и хрупкие детали. Конфигурации гранул на пластиковой связке приведены на рисунке 13.



Рисунок 13 – Формы абразивных гранул на пластиковой связке

Рабочие тела из нержавеющей стали. В основном применяется для отделочно-упрочняющей обработки, в результате которой происходит деформирования исходного микрорельефа, тем самым создаются сжимающие напряжения на поверхности детали, тем самым повышая прочностные характеристики изделия. Основные виды данных рабочих тел представлены на рисунке 14.



Рисунок 14 – Рабочие тела из нержавеющей стали

Рабочие тела на органической основе. Тела подобного рода нашли широкое применение в ювелирной и сувенирной промышленности для отделочных операций, улучшая внешний вид изделий. Основные конфигурации изображены на рисунках 15, 16, 17



Рисунок 15 – Наполнитель из дробленой кукурузы



Рисунок 16 –Скорлупа грецкого ореха



Рисунок 17 – Кубики из дерева

1.5 Технологические параметры виброабразивной обработки

Характеристика технологических параметров виброабразивной обработки сменных многогранных пластин делится на режимы и условия ее проведения. К режимам относятся такие параметры как: время обработки, частота вибраций рабочей камеры, амплитуда, в свою очередь к условиям

можно отнести: размер и вид абразивных гранул, количество и состав компаунда, величина заполнения локальных полостей.

Тем самым, определенный набор параметров будет характеризовать производительность и качественные показатели обработки в тот или ином случае.

1.6 Цели и задачи проектирования

Целью данного исследования является разработка конструкции оснастки для виброабразивной обработки СМП режущего инструмента без центральных отверстий, позволяющей повысить ее производительность

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести анализ конструкции оснастки, позволяющей обрабатывать СМП без центральных отверстий.
2. Разработать конструкцию технологической оснастки для виброабразивной обработки СМП без центральных отверстий, позволяющую повысить производительность обработки.
3. Разработать компьютерную модель, описывающую влияние технологических параметров на производительность обработки.

2. Предлагаемая оснастка для виброабразивной обработки

2.1 Конструкция и описание работы предлагаемой оснастки

Среди описанной выше оснастки для обработки СМП без центральных отверстий наибольшим образом подходит конструкция приведенная на рисунке 9. Однако производительность обработки будет являться невысокой при цилиндрической форме локальной полости рабочего барабана поскольку в нижней части их загрузок могут образовываться значительные объемы «застойных» зон, в которых не происходит перемешивания СМП и абразивного наполнителя, что может значительно снизить производительность обработки.

Известно, что при обработке во вращающихся галтовочных барабанах для снижения вероятности образования «застойных» зон форму рабочих камер выполняют многогранной вместо цилиндрической. Это обеспечивает более интенсивное перемешивание абразивного наполнителя и обрабатываемых деталей [10].

Предлагается выполнять локальные полости шестигранными, что по аналогии с галтовкой позволит более интенсивно перемешивать загрузки. Это сократит время нахождения обрабатываемого СМП в «застойных» зонах и, как следствие, повысит производительность обработки.

Для придания локальным полостям шестигранной формы предлагается устанавливать в них шестигранные вставки из полиуретана марки ПУ-2 (рис 18). Размеры поперечного сечения вставки определяются по известными зависимостями для расчета геометрических параметров правильного шестиугольника, вписанного в окружность [11]:

$$a = R \quad (1),$$

где a – сторона правильного шестиугольника, вписанного в окружность;

R–радиус описанной окружности.

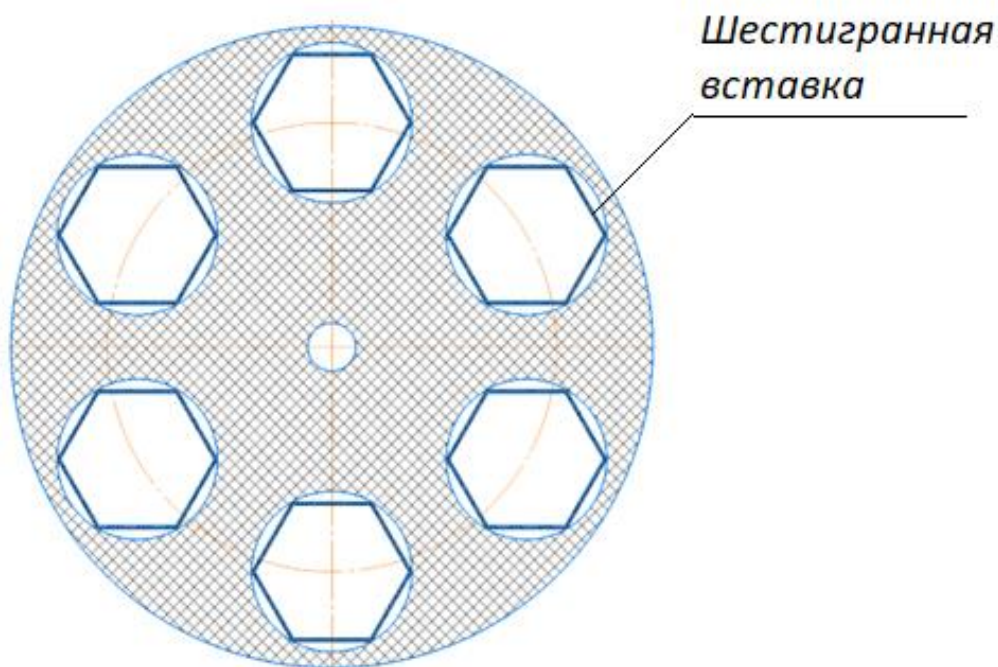


Рисунок 18–Предлагаемая конструкция коробчатого контейнера с шестигранными вставками

2.2 Выбор основных параметров рабочего барабана

На рисунке 19 приведен общий вид установки для виброабразивной обработки.

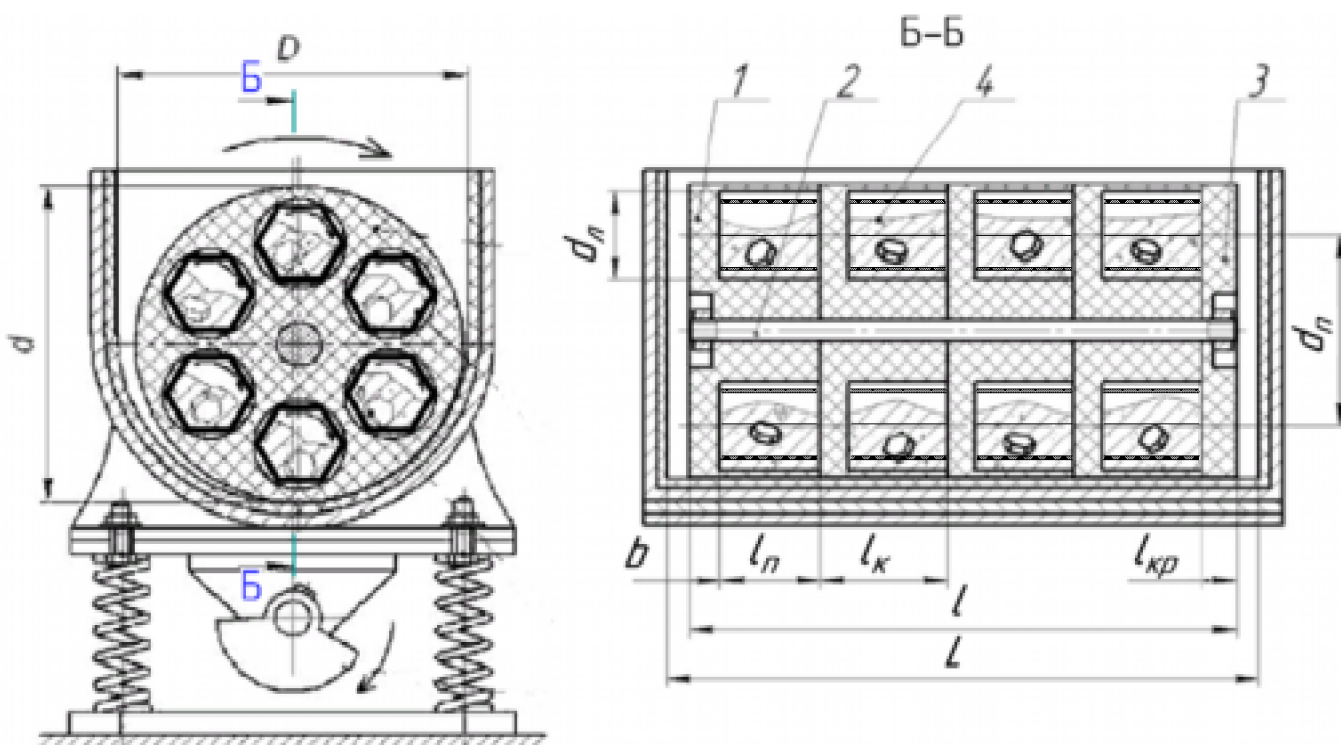


Рисунок 19 – Общий вид виброабразивной установки марки ВМ с собранным рабочим барабаном

Конструкция барабана выполнена в виде соосно и последовательно расположенных коробчатых барабанов 1, для их фиксации используется ось 2 с гайками. Закрывается данное приспособление крышкой 3

Каждый отдельный контейнер имеет несколько глухих отверстий, расположенных по окружности, данные полости предназначены для порции абразивного наполнителя и сменной многогранной пластины. При скреплении контейнеров между собой, их локальные полости 4 закрываются дном последнего контейнера, что обеспечивает обработку СМП без контакта друг с другом.

Принцип работы заключается в следующем.

В каждую локальную полость коробчатого барабана засыпает порция абразивного наполнителя и одна СМП.

Затем с помощью центральной оси на первый коробчатый барабан устанавливается второй, предварительно «заряженный» абразивным

наполнителем и СМП, по аналогии с первым и т.д. После сборки барабана, его скрепляют гайками и устанавливают в рабочую камеру виброабразивной установки (рис.19). В качестве источника вибраций используется вибратор эксцентрикового типа.

Под действием вибрации рабочий барабан 1, детали 2 и рабочая среда 3 совершают колебательно-вращательные движения в направлении вращения эксцентрика 4. В результате этих перемещений в каждой локальной полости происходит перемешивание детали с обрабатывающей средой и обработка деталей без их контакта друг с другом.

Геометрические размеры барабана, локальных полостей, диаметр окружности, по которой они расположены в емкости, их количество и количество емкостей определяют из рис. 19, при этом для обеспечения обработки наружный диаметр рабочего барабана d выбирается из условия:

$$d = (0,7 \dots 0,95)D, \quad (2)$$

где D — внутренний диаметр округленной части U-образной рабочей камеры.

Максимальная длина рабочего барабана l (без учета возможного размещения центральной оси с гайками за его габаритами) определяется из следующего условия:

$$l = 0,9L, \quad (3)$$

где L — длина рабочей камеры.

Рабочая длина и диаметр локальной полости соответственно l_L и d_L выбираются из условия

$$l_L \geq 3a; \quad d_L \geq 3a, \quad (4)$$

где a — наибольший геометрический размер обрабатываемой СМП.

С учетом толщины дна локальной полости длина коробчатого контейнера l_K определится как

$$l_K = l_{\Pi} + b. \quad (5)$$

Количество коробчатых контейнеров в рабочем барабане определяется по формуле

$$n = \frac{l - l_{KP}}{l_K}, \quad (6)$$

где l_{KP} — толщина крышки рабочего барабана.

При выборе размеров l_{KP} и b при проектировании рабочего барабана необходимо учитывать вид материала, из которого изготовлены коробчатый контейнер и крышка, а также технологии их изготовления. Обычно принимают $l_{KP} = 5 \dots 7$ мм и $b = 3 \dots 5$ мм.

При выборе диаметра окружности d_{Π} , по которой следует располагать локальные полости, необходимо учитывать, что при максимально допустимой его величине представляется возможность, либо увеличения их количества, что повышает производительность обработки, либо их геометрических размеров, что расширяет технологические возможности использования рабочего барабана. Обычно величину d_{Π} определяют из условия

$$d_{\Pi} \leq d - d_L - (8 \dots 10), \text{ мм}. \quad (7)$$

3. Моделирование процесса обработки в предлагаемом устройстве с использованием программного обеспечения SolidWorks Motion

3.1 Анализ исходных данных и допущения при моделировании

Предлагается повышение производительности оценивать по косвенным показателям виброабразивной обработки, т.е по числу столкновений абразивных гранул с СМП и по величинам усилий соударений

Для решения задачи активного управления виброабразивной обработки, а также ее оптимизации, необходимо создание и математическое описание всей сущности процесса, с учетом всех взаимных явлений происходящих в нем. Выходными параметрами виброабразивной обработки являются силы соударений гранул и СМП и количество этих соударений.

При вибрационном воздействии абразивного наполнителя его поведение будет являться динамический процессом, который будет описываться конкретными параметрами силовых воздействий и сложных движений. Наполнитель получает колебания от рабочего барабана, который, в следствие вибраций от рабочей камеры, начинает совершать вращательно движение, тем самым образуется сложное перемещение абразивной среды: колебания, медленная циркуляция и угловые вращения гранул. [7, 12].

Существующие математические модели для описания движения загрузки рабочей камеры для объемной вибрационной обработки можно разделить на две группы: 1) модели, в которых загрузка контейнера учитывается присоединенной массой; 2) модели, в которых рассматривается воздействие загрузки и контейнера виброабразивной установки, но с определенными допущениями. Это пренебрежение взаимодействием обрабатываемых деталей друг с другом и влиянием обрабатываемых деталей

на движение обрабатывающей среды, действие обрабатывающих тел на обрабатываемые детали рассматривается, как влияние сплошной среды, движущейся по заданному закону и связанной с обрабатываемой деталью силами трения [13]. Поэтому известные модели не полностью описывают процессы, происходящие во время реальной обработки. Кроме того, известные модели рассматривают определенные схемы обработки (обработка «внавал» или обрабатываемые детали размещены в коробчатом барабане, без контакта друг с другом), вследствие этого они не могут быть применены для описания предлагаемой технологии обработки.

Создание модели, позволяющей по заданным характеристикам рабочей камеры, обрабатывающей среды и обрабатываемых деталей непосредственно определять режимы ВО, позволит оперативно корректировать параметры обработки. Такая модель может быть разработана на базе программ CAD и CAE – систем, в частности с применением программы SolidWorks и его дополнения Motion [14], которое позволит наглядно продемонстрировать анимацию движения абразивных гранул внутри локальных полостей при вращении рабочего барабана с заданной амплитудой и частотой вращения. При этом в моделировании использовались мощные программы кинематического расчета, которые учитывали такие параметры как: свойства материала, силы, трение, а также массу и инерцию.

При создании данной модели был принят ряд допущений:

- 1) Вращательное движение рабочего барабана задается не от стенок рабочей камеры, а от условного двигателя, приложенного к оси вращения барабана, смещенной на заданную величину. Тем самым в компьютерной модели исключена вибрация, но имеет место амплитуда вращения рабочего барабана.

- 2) В данном моделировании вращение барабана во всех экспериментах задавалось с постоянной угловой скоростью и степенью заполнения

локальных полостей рабочего барабана абразивными гранулами, соответственно $\omega = 8$ об/мин, степень заполнения = 75% [15]

3) Так как рабочий барабан совершает плоскопараллельное движение, то силы соударения равны во всех поперечных сечениях. Поэтому можно моделировать процесс обработки в одной плоскости, проходящей перпендикулярно оси вращения барабана, что сокращает время расчета [16].

4) Все физико-механические свойства поверхности детали постоянны, т.е. частица осуществляет микрорезание однородного и изотропного полупространства.

5) Твердость абразивных зерен неизмеримо больше твердости материала детали.

6) В процессе обработки деформации гранулы и смещения ее абразивных зерен не происходит.

7) За один акт микрорезания геометрия гранулы не изменяется.

Такой подход позволит предварительно оценить эффективность предложенной оснастки для ВО СМП без центральных отверстий, что в свою очередь послужит основанием для проведения более точного эксперимента проводимого в реальных условиях.

Порядок решения задачи моделирования движения загрузки коробчатого контейнера следующий:

1. Построение твердотельной модели рабочего барабана с локальными полостями цилиндрической и шестигранной формы (рис. 20-21), абразивной гранулы и СМП THUN – 110308 (ГОСТ 19043-80) по известным характеристикам с применением CAD – системы SolidWorks.
2. Создание сборки из созданных деталей. Элементы конструкции машины, не влияющие на результаты расчета (неподвижные детали) в модели не учитывались.

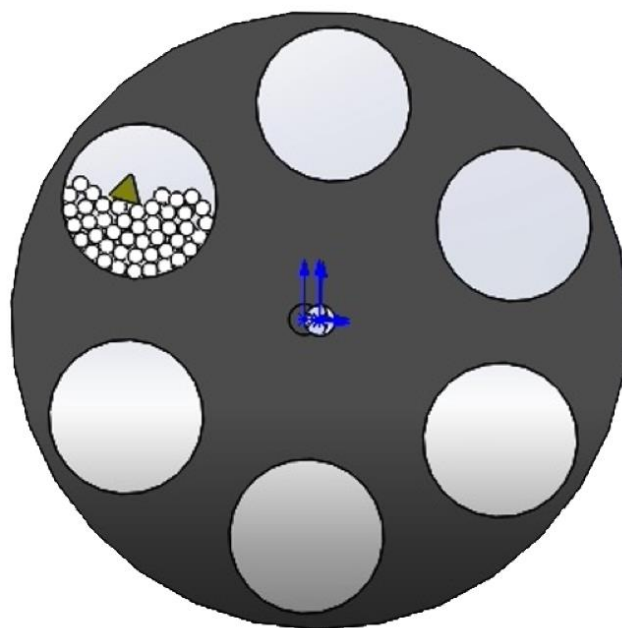


Рисунок 20 – Рабочий барабан виброабразивной установки с локальными полостями цилиндрической формы

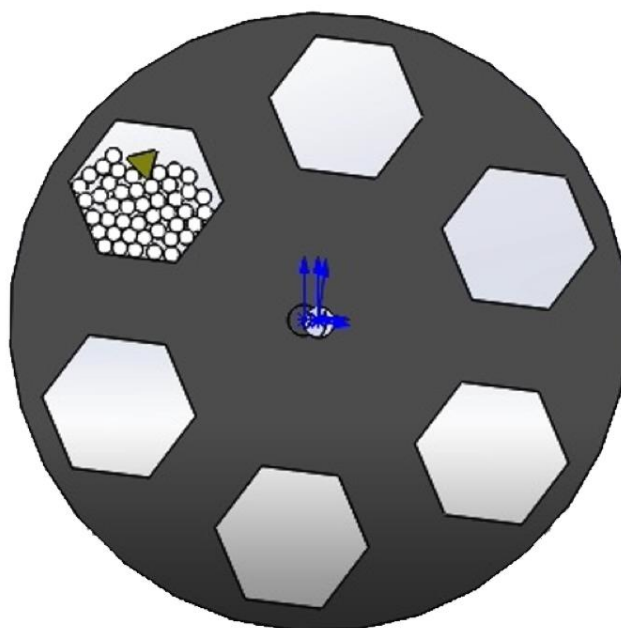


Рисунок 21 – Рабочий барабан виброабразивной установки с локальными полостями шестигранной формы

3. Распределение элементов сборки по подвижным и неподвижным деталям.
4. Задание граничных условий:
 - 4.1. Задается сила тяжести направленная вертикально вниз.

- 4.2. Добавляется 3D – контакт между шариками, обрабатываемыми деталями и стенками локальной полости рабочего барабана, где учитываются такие свойства материала, как: свойства упругости и силы трения.
- 4.3. Прикладывается вращение к оси рабочего барабана и задается его частота
- 4.4. Настройка расчетных параметров моделирования. (время расчета, шаг расчета и т.д.).
5. Непосредственно сам расчет. Модель позволяет определить, скорости, ускорения, силы соударения абразивных гранул и обрабатываемых СМП в любой момент времени с заданным шагом расчета. Также модель позволяет определить общее число соударений N абразивных гранул с обрабатываемой деталью, происходящих в единицу времени. Для определения сил соударения обрабатываемых СМП и абразивных гранул строятся эпюры воздействия каждой гранулы на СМП за определенный промежуток времени вращения рабочего барабана (22, 23). Результаты экспортируются в таблицу Excel, где показаны результаты расчета: приведено время, когда произошло соударение, а также величина этого соударения (24)

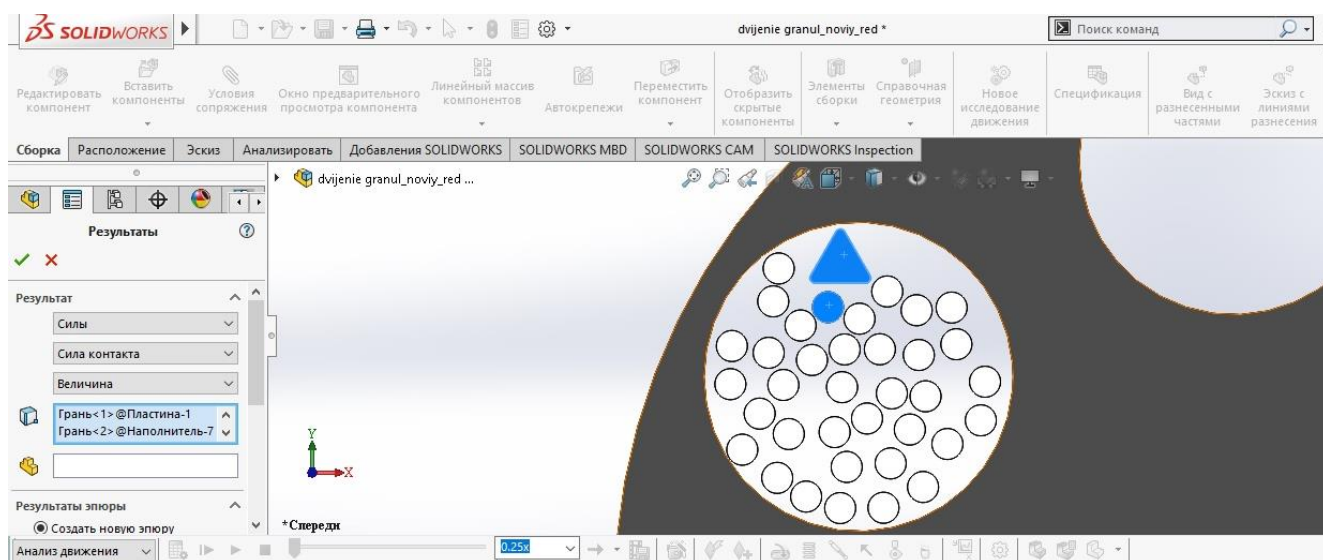


Рисунок 22 – Построение эпюры силы контакта между наполнителем и СМП

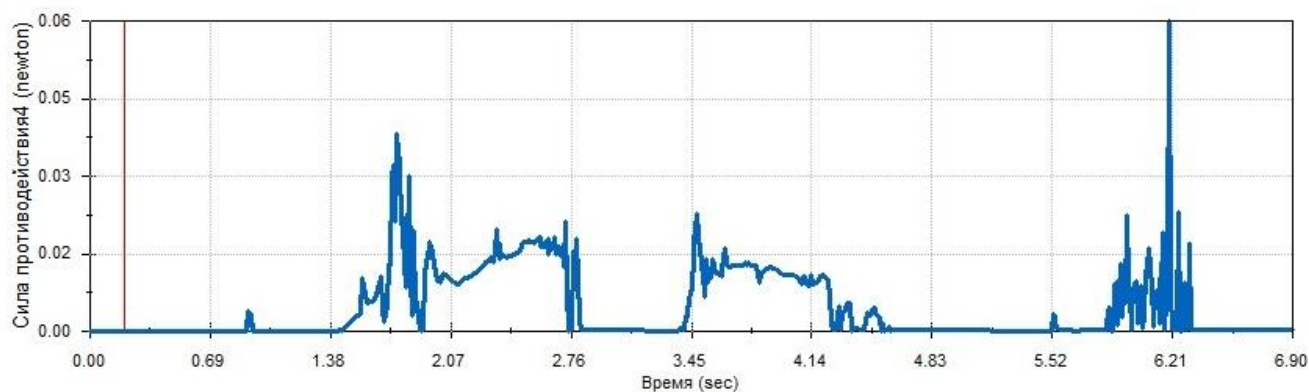


Рисунок 23 – Эпюра воздействия одной из гранул на СМП

1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Эпюра4							360	3.4613619	0				
Время (se	Сила противодействия2 (newton)						361	3.46994210	0.00424958068369739				
0							362	3.4713358	0.00377797297347933				
0.0103077	0						363	3.4814129	0.00848167325847275				
0.0203303	0						364	3.4915505	0.0100229814978333				
0.0303264	0						365	3.5016548	0.0148003110682039				
0.0398843	0						366	3.5098265	0.0093363453472048				
0.0402990	0						367	3.51163010	0.00987255636893204				
0.0502717	0						368	3.52164540	0.0159649815508369				
0.0602476	0						369	3.5316345	0.0147818069155222				
0.0702207	0						370	3.54302670	0.0204007896209531				
0.0797687	0						371	3.5497109	0.0193150364413681				
0.0801934	0						372	3.55305550	0.0182090283221182				
0.0901672	0						373	3.5637026	0.0121090139326907				
0.1001594	0						374	3.57901270	0.0178423015981253				
0.1101830	0						375	3.5891639	0.0155064911592557				
0.1196531	0						376	3.5895953	0.0154995892180266				
0.1204045	0						377	3.59975670	0.0152882047585654				
0.1303761	0						378	3.61276640	0.0150154672647204				
0.1403505	0						379	3.6230316	0.0130118091508098				
0.1503261	0						380	3.62947970	0.0138403183245588				

Рисунок 24 – Результаты расчета после экспортирования в Excel

Разработанная модель позволяет определить среднее значение сил соударения F и общее число N соударений за рассчитанный промежуток времени, определяющие производительность виброабразивной обработки от амплитуды вращения рабочего барабана и формы локальных полостей: круглая и шестигранная.

3.2 Результаты моделирования

Обработывая результаты моделирования, определяется общее число N соударений за рассчитанный промежуток времени, среднее значение силы F соударений обрабатываемой детали с абразивными гранулами. Модель позволяет режимы обработки в виде амплитуды вращения рабочего барабана, смещая ось вращения на определенную величину для двух видов локальных полостей: круглой и шестигранной, тем самым определить влияние этого параметра на силу соударения и число соударений в единицу времени. На рисунках 25, 26 приведены зависимости силы F соударения и числа N соударений СМП с абразивными гранулами от амплитуды вращения рабочего барабана и формы локальной полости.

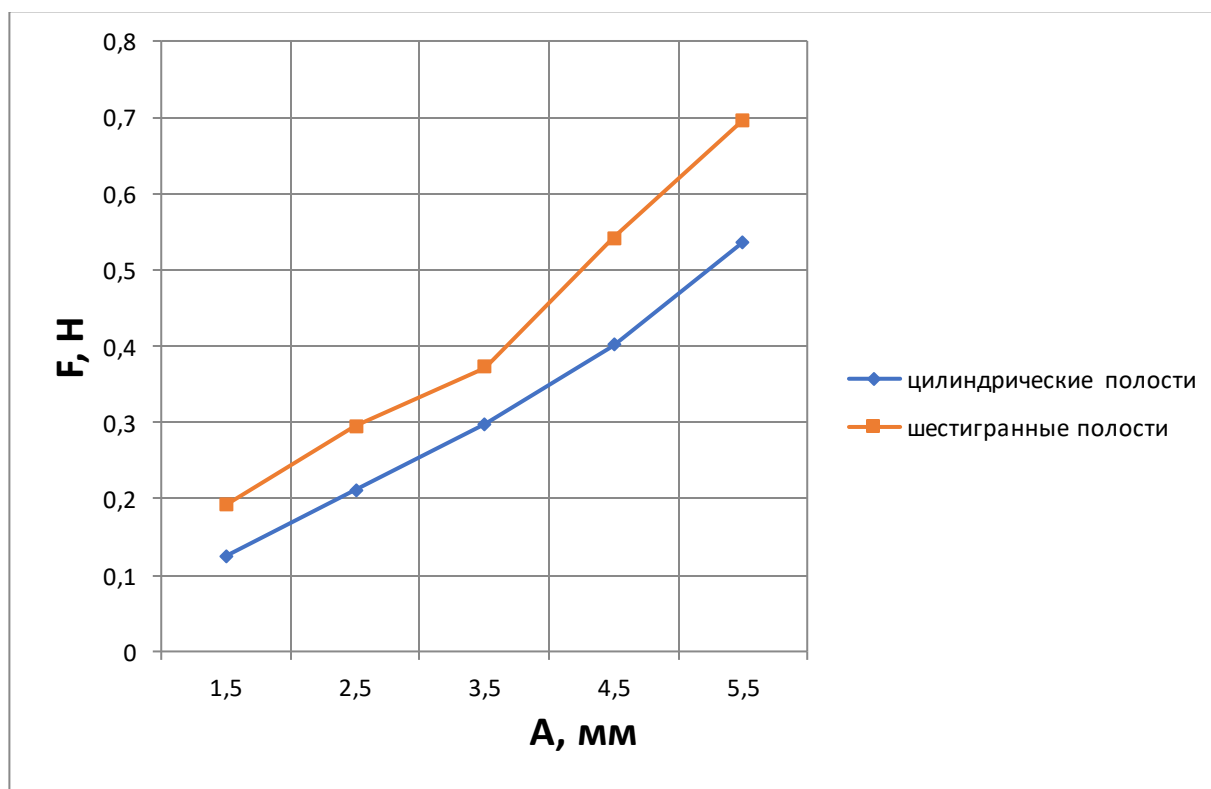


Рисунок 25 – Зависимость силы F соударения абразивных гранул и обрабатываемых СМП от амплитуды вращения рабочего барабана.

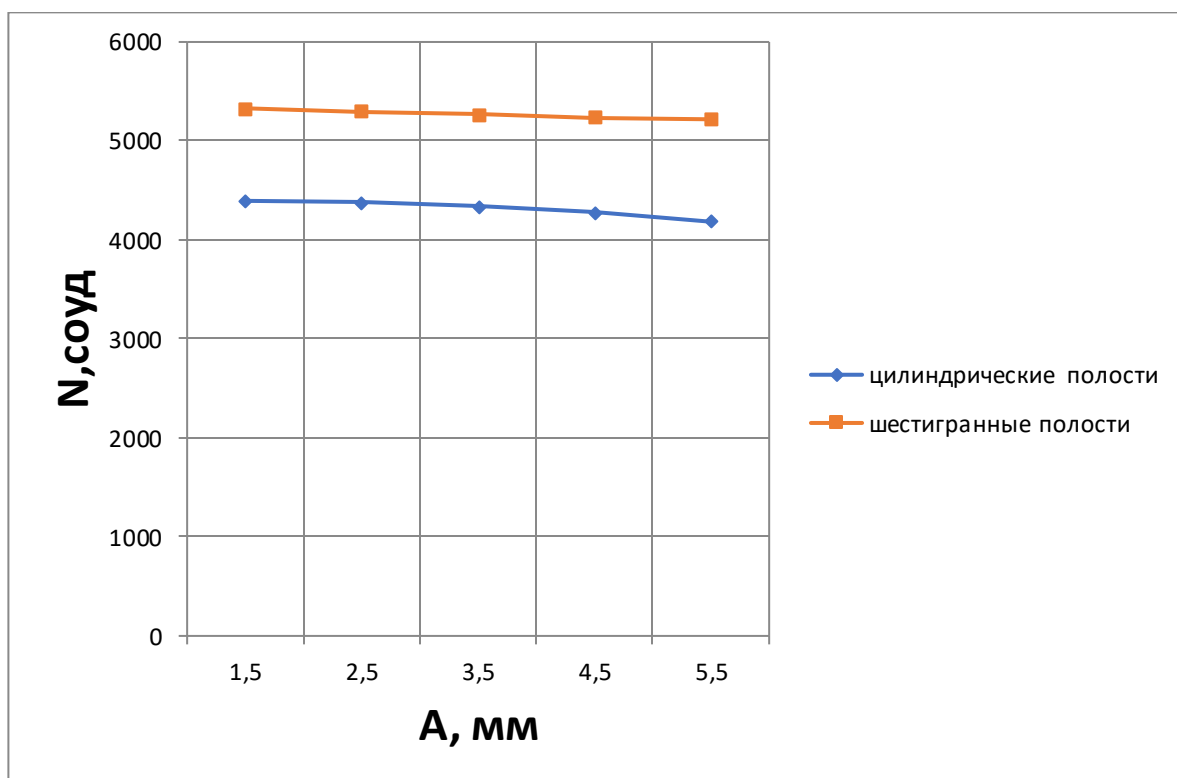


Рисунок 26 – Зависимость числа соударений N абразивных гранул и обрабатываемых СМП от амплитуды вращения рабочего барабана.

Из данных зависимостей видно, что величины сил соударений абразивных гранул и обрабатываемых деталей при использовании полостей шестигранной формы на 20-22% выше, чем при использовании цилиндрических полостей. Число соударений абразивных гранул по СМП в шестигранных полостях выше на 25%, чем при использовании цилиндрических полостей. Это подтверждает тот факт, что применение шестигранных полостей в предлагаемой оснастке будет повышать производительность округления режущих кромок и снижение шероховатости рабочих и опорных поверхностей пластин.

Недостатком разработанной модели являются большие затраты времени на перестроение, расчет и обработку результатов, что не позволяет оперативно использовать данное моделирование при конкретных производственных условиях.

4. Исследование процесса обработки

4.1 Метод математического планирования эксперимента для исследования процесса обработки

Для разработки технологических процессов виброабразивной обработки СМП следует провести соответствующие теоретические исследования, позволяющие получить зависимости для определения значений F силы соударения СМП и наполнителя и N – количество этих соударений от определенных факторов. При этом различают два подхода к изучению технологических процессов и оборудования. Первый - это объективно изучить сущность процесса и на основе этого сделать общую теорию, которая поможет решить все частные проблемы. Данный подход для решения задачи моделирования виброабразивной обработки СМП, как показал обзор литературы, с большой долей вероятности оказывается недоступен. Это объясняет использование метода математического планирования экспериментов со статистической обработкой результатов исследований. При обращении к этому методу проводится активный эксперимент, который в дальнейшем позволяет получить соответствующие зависимости при неполном знании механизма процесса [17,18].

В этом случае используется понятие «черный ящик» (рис.27). На данном рисунке стрелками справа показаны числовые характеристики целей исследования. Они обозначаются $Y_1, Y_2...Y_m$ и именуются как, параметрами оптимизации. В литературных источниках встречаются иные названия этого параметра, одни из них: критерий оптимизации, целевая функция, выход "черного ящика" и т. д. При нескольких параметрах оптимизации задача будет называться многокритериальной. Часто такая задача не имеет одного решения и решается методами многокритериальной оптимизации, которые основаны на поиске компромиссного решения. При одном выходном параметре, зачастую, задача может иметь одно решение и его поиск производится различными методами. На рис. 36 $X_1, X_2...X_3$ –

воздействие на «черный ящик» (объект исследования), т.е. факторы (входы черного ящика, переменные). Значения, которые могут приниматься факторами, называют уровнями. Закрепленный набор уровней факторов позволяет определить одно из возможных состояний черного ящика. Данный набор и определяет условия для проведения одного из возможных экспериментов. Все существующие множества состояний определяют полное множество выходного параметра, из которого необходимо определить оптимальное значение оптимизируемого параметра и определенное ему множество уровней факторов.



Рисунок 27 – Схема «черного ящика»

Математической моделью процесса в таком случае будет являться представление поверхности отклика переменных параметров (факторов), которое в общем случае описывается функцией:

$$M\{Y\} = \varphi (X_1, X_2 \dots X_k) \quad (8),$$

где

Y – выход процесса, подлежащий изучению;

$X_1, X_2 \dots X_k$ – переменные факторы.

Такая математическая модель описывается уравнением регрессии, содержащее линейные члены и взаимодействия первого порядка:

$$\hat{Y} = \sum_i b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j, \quad (9)$$

где

$\hat{Y}$ - оценка математического ожидания отклика $M\{y\}$,

b – коэффициент регрессии.

Коэффициенты регрессии b этой функции определяют из экспериментов.

После нахождения коэффициентов регрессии проходит их проверка на значимость с помощью t-критерия Стьюдента, рассчитываемый по следующей формуле:

$$t_p = \frac{b}{s_p}, \quad (10)$$

где s_p – стандартное отклонение параметра.

Полученное значение t-критерия сравнивают с табличным значением с выбранной доверительной вероятностью (обычно 0,95) и числе степеней свободы $N - k - 1$ (N - количество экспериментов, k - число переменных в уравнение регрессии). Если расчетное значение t_p больше табличного, в таком случае коэффициент регрессии является значимым с заданным уровнем достоверности. Или же коэффициент регрессии исключается из уравнения.

Когда прошли преобразования переменных факторов из кодовых координат в натуральные начинается проверка адекватности построенной модели, заключающаяся в определении связи между дисперсией адекватности $S^2_{ад}$ и дисперсией выходного параметра $S\{y\}$ с помощью F-критерия Фишера.

Описание будет адекватным объекту, если вычисленное значение критерия меньше критического $F_{кр}$ для соответствующих степеней свободы:

$f_{ад} = n-m, f_y = n(r-1)$, и при заданном уровне значимости α .

Учитывая, что зависимость между технологическими режимами виброабразивной обработки и выходными параметрами носит нелинейный характер в случае при планировании экспериментов можно воспользоваться относительно не сложными двухуровневыми планами вида 2^K (где K — число факторов), с последующими действиями, в виде преобразования выходного параметра и факторов. При этом преобразование переменных из кодовой формы в натуральные значения будет осуществляться по следующей зависимости:

$$X_i = \frac{2(\ln \tilde{X}_i - \ln \tilde{X}_{i\max})}{\ln \tilde{X}_{i\max} - \ln \tilde{X}_{i\min}} + 1, \quad (11)$$

где

X_i – кодирование значение i -го фактора;

$\tilde{X}_i$ – значение фактора в натуральных единицах;

$\tilde{X}_{i\max}, \tilde{X}_{i\min}$ – значение верхнего и нижнего уровней фактора в натуральных единицах.

При использовании метода математического планирования экспериментов опыты проводятся в соответствии с матрицей, т. е. таблицей из n строк и m столбцов, которая имеет различные комбинаций факторов, изменяющихся симметрично относительно некоторого начала или нулевого уровня. Допустимая область варьирования факторов – факторное пространство выбирается основываясь на предварительное изучение объекта в соответствии с поставленной целью. Чтобы упростить записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных верхний уровень факторов кодируется $+1$, нижний -1 , а основной 0 . Каждая строка соответствует условиям эксперимента, а столбец соответствующему уровню факторов. При этом в первом столбце приведены соответствующие номера опытов.

4.2 Разработка математической модели процесса вибрационной обработки СМП

В связи с тем, что создание моделей на базе CAD и CAE систем и их последующий расчет занимает много времени, что затрудняет применение этого метода на практике. Этот факт предопределяет необходимость использования метода математической статистики и математической теории эксперимента для создания программ на основе расчетов в САЕ, удобных для решения практических задач о зависимостях [19]. В этом случае используются методы планирования эксперимента., т.е. оптимальное управление экспериментом при неполном знании механизма явлений. Разрабатываемая математическая модель процесса ВО должна представлять собой совокупность функциональных зависимостей выходных параметров ВО, от переменных факторов (технологических режимов) ВО. Эта модель будет инструментом исследования и управления реальным процессом ВО, в т.ч. и оптимизировать его параметры.\

Основными технологическими факторами, влияющими на результат вибрационной обработки СМП без центральных отверстий в коробчатых контейнерах с локальными полостями многогранной формы являются:

- 1–амплитуда и частота колебаний;
- 2 – время $t_{\text{обработки}}$;
- 3 – масса СМП m ;
- 4 – степень заполнения емкостей абразивным наполнителем и СМП;
- 5 – вид применяемого абразива;
- 6 – вид (марка) обрабатываемого твердого сплава;
- 7 – состав применяемой рабочей жидкости.
- 8–радиус вписанной окружности в правильный многоугольник.

Учитывая изложенное выше принимаем, что выходными параметрами являются:

- сила соударения F гранул наполнителя и СМП;

- количество соударений N абразивных гранул и СМП за определенный промежуток времени;

Переменными параметрами ВО СМП будут являться:

- амплитуда колебаний рабочей камеры A ;
- частота вращения рабочего барабана ω ;
- масса $m_{гр}$ абразивной гранулы;
- масса $m_{смп}$ СМП.

Анализ результатов предварительных экспериментов позволил сделать следующие выводы:

При изучении влияния амплитуды колебаний рабочей камеры было установлено, что при $A < 1$ циркуляции рабочей среды не происходит, что приводит к неравномерности обработки СМП, расположенных внутри локальной полости рабочего барабана. При $A > 5$ при вращении барабана происходит сильное хаотичное перемешивание наполнителя по сечению локальной полости. Поэтому целесообразно установить нижний уровень A , равный 2 мм, а верхний, равный 5 мм.

Масса СМП варьируется от 1,85 до 2,37 граммов.

Масса абразивной гранулы от 0,01 до 0,18 граммов.

Частота вращения рабочего барабана от 5 до 8 об/мин.

В таблице 3 приведены уровни факторов в натуральных и логарифмических координатах для итоговых экспериментальных исследований.

Таблица 3. Уровни факторов при проведении экспериментальных исследований для получения зависимостей для определения $F = f(A, \omega, m_{гр}, m_{смп})$ и $N = f(A, \omega, m_{гр}, m_{смп})$

Уровни факторов	Обозначение	A, мм		ω , об/мин	
		$\widehat{X}_1$	$\ln \widehat{x}_1$	$\widehat{X}_2$	$\ln \widehat{X}_2$
Основной	0	3,5	1,25	6,5	1,87
Интервал варьирования	$\Delta \hat{x}$	1,5	0,4	1,5	0,4
Верхний	+1	5	1,6	8	2,07
Нижний	-1	2	0,69	5	1,6

Таблица 3 (продолжение)

$m_{гр}$, гр		$m_{смп}$, гр	
$\widehat{X}_3$	$\ln \widehat{X}_3$	$\widehat{X}_4$	$\ln \widehat{X}_4$
0,095	-2,35	2,11	0,74
0,085	-2,46	0,26	-1,34
0,18	-1,71	2,37	0,86
0,01	-4,6	1,85	0,61

В таблицах 4 и 5 приведены матрицы планирования экспериментов и результаты экспериментальных исследований для получения зависимостей по расчету значений F и N .

Таблица 4. Матрица планирования эксперимента для определения $F = f(A, \omega, m_{\text{гр}}, m_{\text{смп}})$

Номер	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	$\ln y_1$	y_2	$\ln y_2$	y_3	$\ln y_3$	$y_{\text{ср}}$	$\ln y_{\text{ср}}$
						F_1	$\ln F_1$	F_2	$\ln F_2$	F_3	$\ln F_3$	$F_{\text{ср}}$	$\ln F_{\text{ср}}$
1	+	-	-	-	-	0,074	-2,604	0,064	-2,749	0,085	-2,465	0,074	-2,6
2	+	+	-	-	+	0,201	-1,604	0,188	-1,671	0,195	-2,002	0,194	-1,648
3	+	-	+	-	+	0,161	-1,826	0,154	-1,87	0,152	-1,884	0,156	-1,858
4	+	+	+	-	-	0,104	-2,263	0,115	-2,163	0,118	-2,137	0,112	-2,191
5	+	-	-	+	+	0,168	-1,784	0,158	-1,845	0,162	-1,82	0,161	-1,826
6	+	+	-	+	-	0,159	-1,839	0,163	-1,814	0,151	-1,89	0,158	-1,845
7	+	-	+	+	-	0,115	-2,163	0,14	-1,966	0,115	-2,163	0,123	-2,12
8	+	+	+	+	+	0,701	-0,355	0,692	-0,368	0,699	-0,358	0,698	-0,363
9	+	0	0	0	0	0,17	-1,772	0,16	-1,833	0,21	-1,56	0,18	-1,714

Известно, что связь технологических режимов ВО с выходными параметрами является нелинейной и может быть описана уравнением вида

$$y = C \cdot A^x \cdot m^y \cdot \omega^z \cdot m_{\text{гр}}^n, \quad (12)$$

Однако получить значения показателей степени при факторах на основе полного или дробного факторного эксперимента не представляется возможным. Поэтому для получения линейной модели проведем преобразование зависимости (1) прологарифмировав обе части:

$$M\{Y\} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4, \quad (13)$$

где $M\{Y\}$ - истинное изменение выходного параметра в логарифмическом масштабе;

x_1, x_2, x_3, x_4 — логарифмы соответственно $A, m, \omega, m_{\text{гр}}$.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ — коэффициенты, оценка которых должны быть определена.

Таким образом уравнение регрессии для F примет вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4, \quad (14)$$

где $\hat{y}$ – оценка математического ожидания отклика $M\{Y\}$.

b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – оценки коэффициентов $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ соответственно.

Коэффициенты регрессии, определялись по следующей зависимости:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n X_{iw} \cdot \overline{\ln Y_v}}{n}$$

где n – число точек плана (количество проводимых экспериментов с разным сочетанием переменных факторов);

i – номер фактора (в данном случае 5);

$\overline{\ln Y_v}$ – средний отклик по r повторным экспериментам в точке плана с номером v (таблица 2). В каждой точке эксперимент проводился три раза и по их результатам определялось среднее значение.

$$b_0 = \frac{-2,6 - 1,648 - 1,858 - 2,191 - 1,826 - 1,845 - 2,12 - 0,363}{8} = -1,8$$

$$b_1 = \frac{2,6 - 1,648 + 1,858 - 2,191 + 1,826 - 1,845 + 2,12 - 0,363}{8} = 0,294$$

$$b_2 = \frac{2,6 + 1,648 - 1,858 - 2,191 + 1,826 + 1,845 - 2,12 - 0,363}{8} = 0,7$$

$$b_3 = \frac{2,6 + 1,648 + 1,858 + 2,191 - 1,826 - 1,845 - 2,12 - 0,363}{8} = 0,268$$

$$b_4 = \frac{2,6 - 1,648 - 1,858 + 2,191 - 1,826 + 1,845 + 2,12 - 0,363}{8} = 0,383$$

После определения коэффициентов b_i переходят к статистическому анализу результатов измерений и расчетов. При это на первом этапе проверяется однородность дисперсий, а затем значимость коэффициентов b_i .

Построчные дисперсии определяются по формуле:

$$S_n^2 = \frac{\sum_{j=1}^r (\ln Y_i - \ln \bar{Y}_{cp})^2}{r-1}, \quad (15)$$

где r - число повторных измерений при каждом сочетании факторов ($r=3$)

$$S_1^2 = \frac{(-2,604+2,6)^2 + (-2,749+2,6)^2 + (-2,465+2,6)^2}{2} = 0,02$$

$$S_2^2 = \frac{(-1,6+1,648)^2 + (-1,671+1,648)^2 + (-2+1,648)^2}{2} = 0,051$$

$$S_3^2 = \frac{(-1,862+1,858)^2 + (-1,87+1,858)^2 + (-1,883+1,858)^2}{2} = 0,0009$$

$$S_4^2 = \frac{(-2,263+2,191)^2 + (-2,163+2,191)^2 + (-2,137+2,191)^2}{2} = 0,0044$$

$$S_5^2 = \frac{(-1,784+1,826)^2 + (-1,845+1,826)^2 + (-1,82+1,826)^2}{2} = 0,001$$

$$S_6^2 = \frac{(-1,839+1,845)^2 + (-1,814+1,845)^2 + (-1,89+1,845)^2}{2} = 0,0015$$

$$S_7^2 = \frac{(-2,163+2,12)^2 + (-1,966+2,12)^2 + (-2,162+2,12)^2}{2} = 0,014$$

$$S_8^2 = \frac{(-0,355+0,363)^2 + (-0,368+0,363)^2 + (-0,358+0,363)^2}{2} = 0,000057$$

Дисперсия параметра оптимизации $S^2\{Y\}$ есть средняя арифметическая из всех построчных дисперсий:

$$S^2\{Y\} = \frac{\sum_{j=1}^n S_n^2}{n}, \quad (16)$$

$$S^2\{Y\} = \frac{0,02+0,051+0,0009+0,0044+0,001+0,0015+0,014+0,000057}{8} = 0,013$$

Для проверки однородности дисперсий можно воспользоваться критерием Кохрена, поскольку он пригоден для случаев, когда число измерений при разном сочетании факторов одинаково. При этом, из всех дисперсий S_n^2 находится наибольшая S_{nmax}^2 , которая делится на сумму всех дисперсий

$$G = \frac{S_{\text{пmax}}^2}{\sum_{j=1}^n S_n^2} \quad (17)$$

$$G = \frac{0,051}{0,105} = 0,48$$

Критическое значение критерия Кохрена в зависимости от числа степеней свободы дисперсии $q=3-1=2$, числа экспериментов, проведенных при различном сочетании факторов $n=8$ и уровне значимости 5% $G_{\text{кр}} = 0,51$.

Соответственно выполняется неравенство $G < G_{\text{кр}}$, соответственно дисперсии однородны.

Проверка значимости каждого коэффициента проводится независимо. Для этого можно использовать проверку по t - критерию Стьюдента. Первоначально проводится расчет дисперсии коэффициента регрессии $S^2\{b_i\}$ по формуле:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{Y\}}{n*r} \quad (18)$$

$$S^2\{b_i\} = \frac{0,013}{8*3} = 0,00054;$$

Затем рассчитывается t_i – критерий по формуле:

$$t_i = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}} \quad (19)$$

$$s\{b_i\} = \sqrt{0,00054} = 0,023;$$

$$t_0 = \frac{1,8}{0,023} = 71,21;$$

$$t_1 = \frac{0,294}{0,023} = 12,78;$$

$$t_2 = \frac{0,7}{0,023} = 30,43;$$

$$t_3 = \frac{0,268}{0,023} = 11,65;$$

$$t_4 = \frac{0,383}{0,023} = 16,65.$$

Критическое значение при $n(r-1) = 16$ степенях свободы и уровне значимости 5% по табл. работы [20] $t_{кр} = 1,7459$. Так как все значения больше критического, то все коэффициенты значимы.

Следует убедиться, что для описания искомой зависимости достаточно уравнения 1-й степени и не требуется членов 2-й степени.

Для этого проверим нуль гипотезу о том, что сумма всех коэффициентов регрессии $\sum \beta_{ij}$ при квадратичных членах x_i^2 равна нулю.

В нашем случае $b_0 = -1,8$

Среднее значение опытов в центральной точке $\bar{y}_0 = -1,714$, а ошибка эксперимента $S\{Y\} = 0,114$.

Таким образом, $b_0 - \bar{y}_0 = -1,8 - (-1,714) = -0,086$, что меньше $S\{Y\}$. Следовательно квадратичные члены отсутствуют.

Уравнение регрессии в кодовых координатах переменных факторов будет иметь вид:

$$\hat{y} = -1,8 + 0,294x_1 + 0,7x_2 + 0,268x_3 + 0,383x_4$$

Используя полученное уравнение регрессии, зависимость (11) для преобразования переменных факторов из кодовых значений в натуральные, а также данные таблицы 2, выполним некоторые вычисления:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & -1,8 + 0,294 \left[\frac{2(\ln A - 1,6)}{1,6 - 0,69} + 1 \right] + 0,7 \left[\frac{2(\ln \omega - 2,07)}{2,07 - 1,6} + 1 \right] - \\ & + 0,268 \left[\frac{2(\ln m_{гр} + 1,71)}{-1,71 + 4,6} + 1 \right] + 0,383 \left[\frac{2(\ln m_{смП} - 0,86)}{0,86 - 0,61} + 1 \right] \end{aligned}$$

После проведенных соответствующих преобразований уравнение регрессии в натуральных коэффициентах будет иметь вид:

$$\hat{y} = -5,14 + 0,647 \ln A + 0,96 \ln \omega + 0,184 \ln m_{\text{гр}} + 3,098 \ln m_{\text{СМП}}$$

После потенцирования получаем зависимость силы соударений СМП и наполнителя от переменных факторов в виде:

$$F = \frac{A^{0,647} \cdot \omega^{0,96} \cdot m_{\text{гр}}^{0,184} \cdot m_{\text{СМП}}^{3,098}}{e^{5,14}}.$$

Таблица 5. Матрица планирования эксперимента для определения $N = f(A, \omega, m_{\text{гр}}, m_{\text{СМП}})$

Номер	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	$\ln y_1$	y_2	$\ln y_2$	y_3	$\ln y_3$	$y_{\text{ср}}$	$\ln y_{\text{ср}}$
						N_1	$\ln N_1$	N_2	$\ln N_2$	N_3	$\ln N_3$	$N_{\text{ср}}$	$\ln N_{\text{ср}}$
1	+	-	-	-	-	11554	9,355	13003	9,473	11845	9,38	12133	9,403
2	+	+	-	-	+	7201	8,882	7228	8,886	7611	8,937	7345	8,901
3	+	-	+	-	+	9954	9,206	10518	9,26	10121	9,222	10198	9,23
4	+	+	+	-	-	9969	9,207	9801	9,19	10095	9,22	9955	9,206
5	+	-	-	+	+	3615	8,193	3782	8,238	3945	8,28	3781	8,238
6	+	+	-	+	-	8599	9,059	8495	9,047	8491	9,047	8529	9,051
7	+	-	+	+	-	8612	9,06	9145	9,12	8945	9,12	8901	9,094
8	+	+	+	+	+	6579	8,792	6439	8,77	6745	8,77	6588	8,793
9	+	0	0	0	0	7800	8,962	7810	8,963	7801	8,963	8020	8,989
													7

Уравнение регрессии для N примет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4.$$

Коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{9,403 + 8,901 + 9,23 + 9,206 + 8,238 + 9,051 + 9,094 + 8,793}{8} = 8,99;$$

$$b_1 = \frac{-9,403 + 8,901 - 9,23 + 9,206 - 8,238 + 9,051 - 9,094 + 8,793}{8}$$

$$= 0,294;$$

$$b_2 = \frac{-9,403 - 8,901 + 9,23 + 9,206 - 8,238 - 9,051 + 9,094 + 8,793}{8} = 0,7;$$

$$b_3 = \frac{-9,403 - 8,901 - 9,23 - 9,206 + 8,238 + 9,051 + 9,094 + 8,793}{8}$$

$$= 0,268;$$

$$b_4 = \frac{-9,403 + 8,901 + 9,23 - 9,206 + 8,238 - 9,051 - 9,094 + 8,793}{8}$$

$$= 0,383.$$

Построчные дисперсии:

$$S_1^2 = \frac{(9,355+9,403)^2 + (9,473+9,403)^2 + (9,38+9,403)^2}{2} = 0,004$$

$$S_2^2 = \frac{(8,88+8,901)^2 + (8,89+8,901)^2 + (8,937+8,901)^2}{2} = 0,001$$

$$S_3^2 = \frac{(9,206+9,23)^2 + (9,26+9,23)^2 + (9,222+9,23)^2}{2} = 0,0008$$

$$S_4^2 = \frac{(9,2+9,206)^2 + (9,19+9,206)^2 + (9,22+9,206)^2}{2} = 0,0002$$

$$S_5^2 = \frac{(8,193+8,238)^2 + (8,238+8,238)^2 + (8,28+8,238)^2}{2} = 0,0019$$

$$S_6^2 = \frac{(9,059+9,051)^2 + (9,047+9,051)^2 + (9,047+9,051)^2}{2} = 0,0000513$$

$$S_7^2 = \frac{(9,06+9,054)^2 + (9,12+9,054)^2 + (9,099+9,054)^2}{2} = 0,0009$$

$$S_8^2 = \frac{(8,792+8,793)^2 + (8,77+8,793)^2 + (8,817+8,793)^2}{2} = 0,0005$$

Дисперсия параметра оптимизации:

$$S^2\{Y\} = \frac{0,004+0,001+0,0008+0,0002+0,0019+0,0000513+0,0009+0,0005}{8} = 0,0011$$

Расчетное значение критерия Кохрена:

$$G = \frac{0,004}{0,009} = 0,44$$

Критическое значение критерия Кохрена в зависимости от числа степеней свободы дисперсии $q=3-1=2$, числа экспериментов, проведенных при различном сочетании факторов $n=8$ и уровне значимости 5% $G_{кр} = 0,51$.

Соответственно выполняется неравенство $G < G_{кр}$, соответственно дисперсии однородны.

Расчет дисперсии коэффициента регрессии:

$$S^2\{b_i\} = \frac{0,0011}{8*3} = 0,00005;$$

Проверка значимости коэффициентов по t-критерию Стьюдента.

$$S\{b_i\} = \sqrt{0,00005} = 0,007;$$

$$t_0 = \frac{8,99}{0,007} = 981;$$

$$t_1 = \frac{0,014}{0,007} = 2,2;$$

$$t_2 = \frac{0,091}{0,007} = 13,21;$$

$$t_3 = \frac{0,196}{0,007} = 28,67;$$

$$t_4 = \frac{0,199}{0,007} = 28,4.$$

Критическое значение при $n(r-1)=16$ степенях свободы и уровне значимости 5% по табл. работы [13] $t_{кр} = 1,7459$. Так как все значения больше критического, то все коэффициенты значимы.

Проверка на отсутствие квадратичных членов.

$$b_0 = 8,99$$

Среднее значение опытов в центральной точке $\bar{y}_0 = 8,9897$, а ошибка эксперимента $S\{Y\} = 0,0015$.

Таким образом, $b_0 - \bar{y}_0 = 8,99 - 8,9897 = 0,0003$, что меньше $S\{Y\}$. Следовательно квадратичные члены отсутствуют.

Уравнение регрессии в кодовых координатах переменных факторов будет иметь вид:

$$\hat{y} = 8,99 - 0,014x_1 + 0,091x_2 + 0,196x_3 - 0,199x_4$$

Вычисления с преобразованием переменных факторов из кодовых значений в натуральные:

$$\hat{y} = 8,99 - 0,014 \left[\frac{2(\ln A - 1,6)}{1,6 - 0,69} + 1 \right] + 0,091 \left[\frac{2(\ln \omega - 2,07)}{2,07 - 1,6} + 1 \right] - 0,196 \left[\frac{2(\ln m_{\text{гр}} + 1,71)}{-1,71 + 4,6} + 1 \right] - 0,199 \left[\frac{2(\ln m_{\text{СМП}} - 0,86)}{0,86 - 0,61} + 1 \right]$$

После проведенных соответствующих преобразований уравнение регрессии в натуральных коэффициентах будет иметь вид:

$$\hat{y} = 9,104 - 0,03 \ln A + 0,125 \ln \omega - 0,135 \ln m_{\text{гр}} - 1,609 \ln m_{\text{СМП}}$$

После потенцирования получаем зависимость числа соударений СМП и наполнителя от переменных факторов в виде:

$$N = \frac{\omega^{0,125} \cdot e^{9,104}}{A^{0,03} \cdot m_{\text{гр}}^{0,135} \cdot m_{\text{СМП}}^{1,609}}$$

Зависимости, установленные методом планирования эксперимента на основе расчетов предложенной компьютерной модели вибрационной обработки, позволяют определить силу F соударения гранул обрабатываемой среды и СМП, а также количество N соударений СМП и абразивных гранул в единицу времени в зависимости от технологических режимов обработки (амплитуда A , частота вращения ω , масса обрабатываемых СМП $m_{\text{СМП}}$ и массы абразивных гранул $m_{\text{гр}}$))

Графические интерпретации полученных зависимостей выходных параметров модели вибрационной обработки от технологических режимов обработки и массы обрабатываемых СМП представлены на рисунках 28-29.

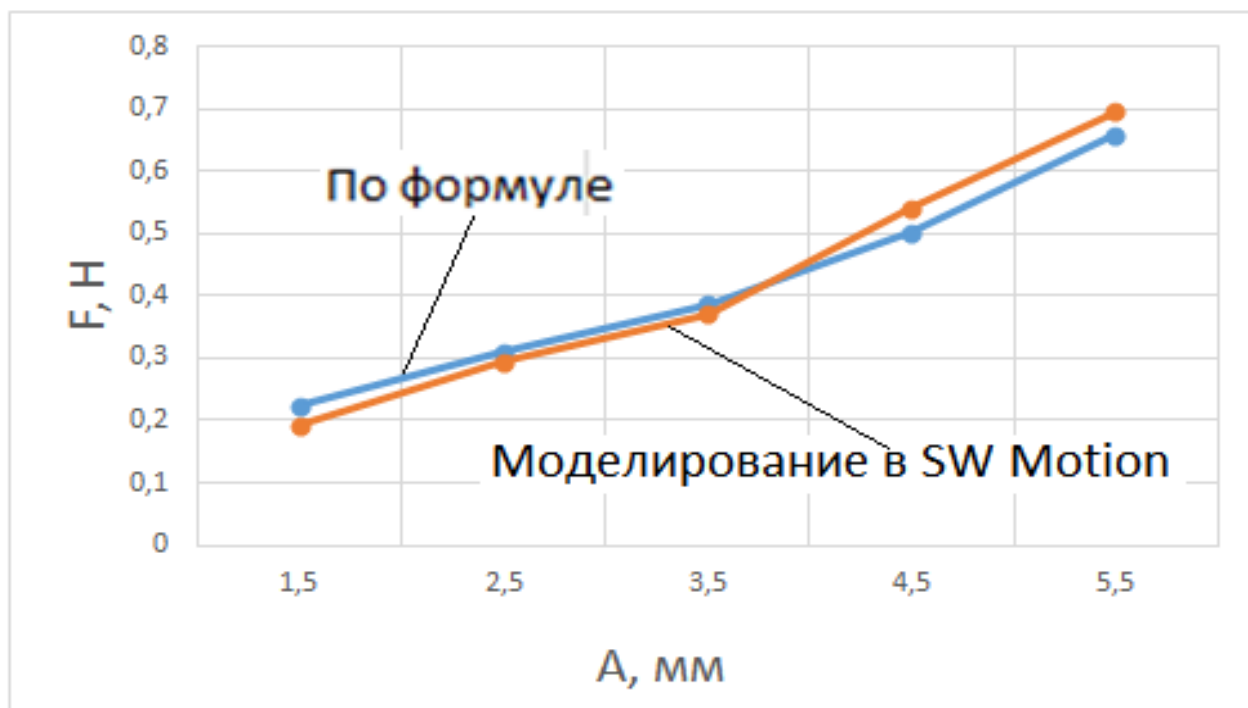


Рисунок 28 – Зависимость силы F соударения абразивных гранул и обрабатываемых СМП от амплитуды колебаний рабочей камеры, построенные из результатов расчетов САЕ программы и по формулам, полученным методом планирования эксперимента

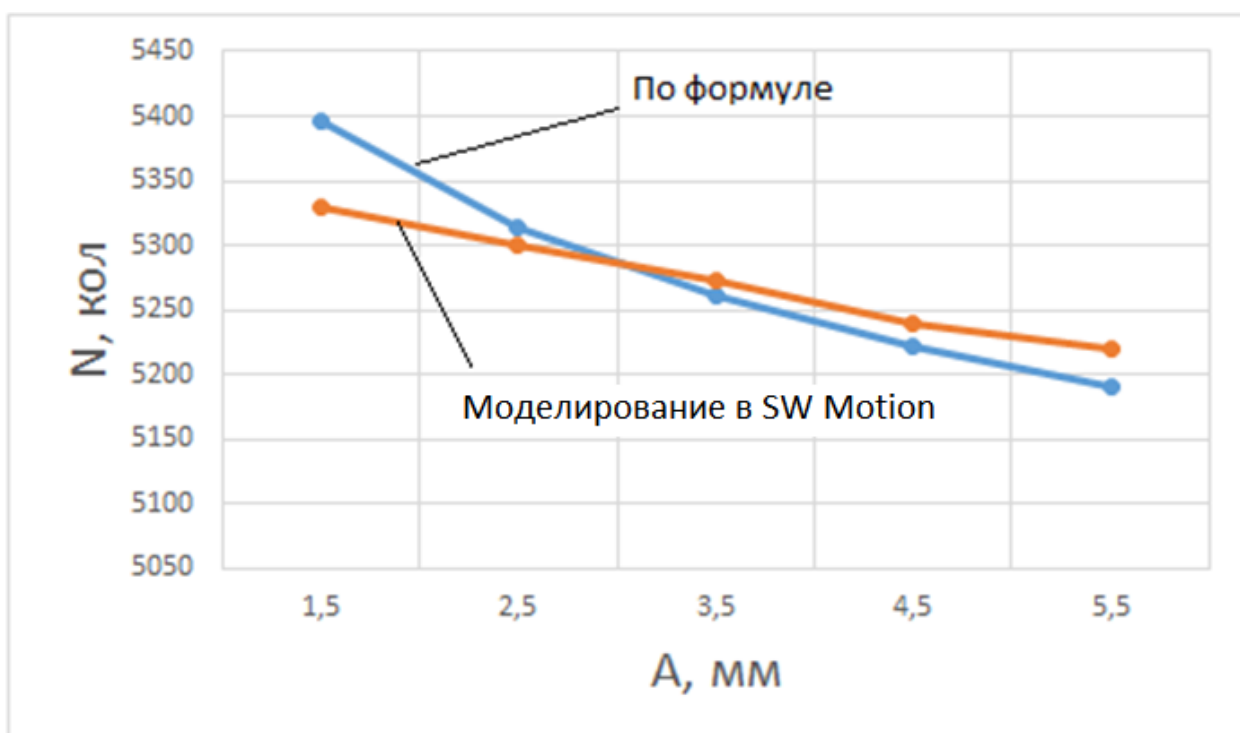


Рисунок 29 - Зависимость числа N соударения абразивных гранул и обрабатываемых СМП от амплитуды колебаний рабочей камеры, построенные из результатов расчетов САЕ программы и по формулам, полученным методом планирования эксперимента.

Расхождение между значениями, полученными экспериментально, и рассчитанными по формулам, полученным методом планирования эксперимента, не превышает 10 %, что подтверждает адекватность полученных зависимостей.

5. Реализация полученных результатов

5.1 Анализ зависимостей для технологических параметров

На рисунках 30-31 приведена графическая зависимость силы соударений F и числа соударений N в зависимости от частоты вращения рабочего барабана.

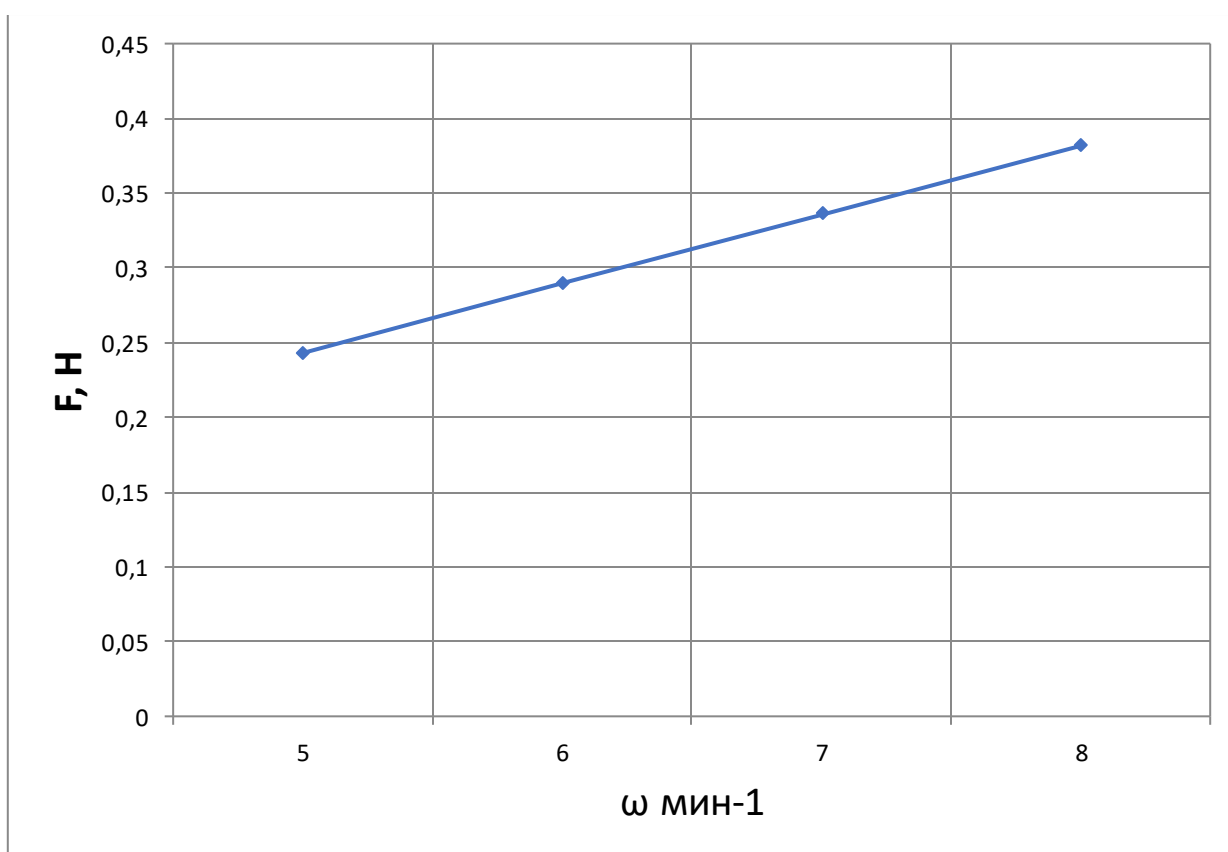


Рисунок 30 – Зависимость силы соударений F от частоты вращения ω ($m_{гр}=0,18$ гр, $m_{смп}=1,85$ гр, $A = 2,5$ мм)

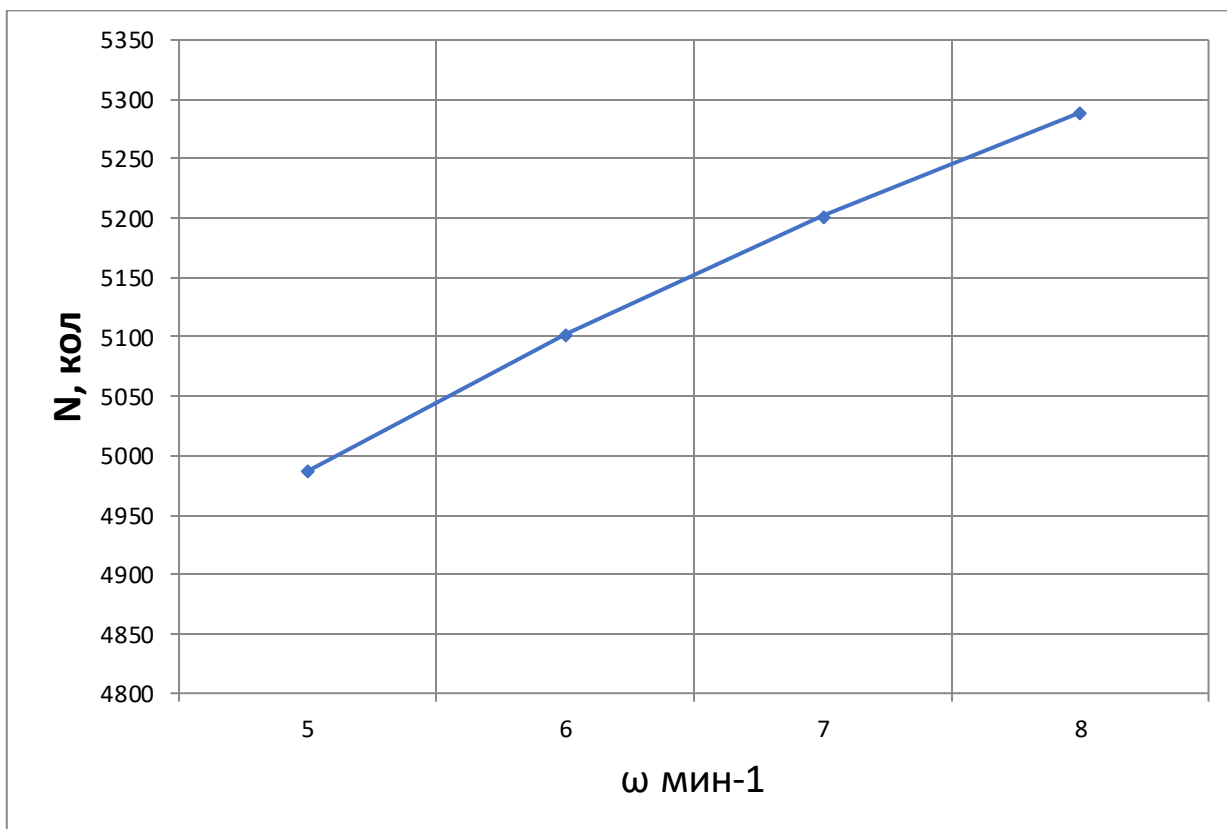


Рисунок 31 – Зависимость числа соударений N от частоты вращения ω ($m_{гр}=0,18$ гр, $m_{смп}=1,85$ гр, $A = 2,5$ мм)

5.2 Определение геометрических параметров элементов рабочего барабана

По известным характеристикам рабочей камеры (п.1.2) и приведенным зависимостям (п.2.2) определяются основные размеры рабочего барабана.

В данной работе использовалась виброабразивная установка с U-образной камерой марки ВМ, с габаритами рабочей камеры аналогичными виброабразивной установке «Импульс 15», приведенной в пункте 1.2.

Таким образом известны следующие данные:

- Диаметр округлой части камеры виброабразивной установки $D = 210$ мм;

- Длина рабочей камеры виброабразивной установки $L = 500$ мм.

Найдем диаметр рабочего барабана:

$$d = 0,95 \cdot 210 = 200 \text{ мм.}$$

Длина рабочего барабана:

$$l \leq 0,9 \cdot 500 = 450 \text{ мм, принимаем } 350 \text{ мм}$$

Рабочая длина и диаметр локально полости соответственно:

$$l_{\text{л}} \geq 3 \cdot 11 = 33 \text{ мм, принимаем } 50 \text{ мм;}$$

$$d_{\text{л}} \geq 3 \cdot 11 = 33 \text{ мм, принимаем } 50 \text{ мм.}$$

Длина коробчатого контейнера:

$$l_{\text{к}} = 50 + 5 = 55 \text{ мм.}$$

Количество коробчатых контейнеров в рабочем барабане:

$$n = \frac{350 - 7}{55} = 6,24, \text{ принимаем } 6 \text{ шт.}$$

Диаметр окружности, по которой расположены локальные полости:

$$d_{\text{п}} \leq 200 - 50 - 10 = 140 \text{ мм, принимаем } 140 \text{ мм.}$$

Согласно формуле (1) при радиусе локальной полости $R=25$ мм, сторона a шестигранной вставки в поперечном сечении составляла 25 мм (рис. 17).

Для обеспечения надежной фиксации вставки в цилиндрической локальной полости ее длина принимается на 1 мм больше длины полости, соответственно $L_{\text{в}} = 51$ мм (рис. 17). При сборке пакета коробчатых контейнеров вкладыши оседают в продольном направлении, увеличивая размеры своего поперечного сечения, надежно фиксируя вкладыши в цилиндрических локальных полостях. Такой подход к изменению формы локальных полостей отвечает требованиям обеспечения минимальных затрат при проектировании оснастки, ее изготовлении и эксплуатации.

Изготовление одной вставки производилось путем склейки шести одинаковых прямоугольников из полиуретана ПУ-2 толщиной $t=3$ (рис 17), габариты прямоугольных пластин составляли 51 мм в длину и 25 мм в ширину. Чтобы получить правильный шестиугольник, требовалось расположить пластины под углом 120° , для этого использовалась оснастка в виде обычного шестигранника S42 ГОСТ 8560-78. Склейка производилась специальным полиуретановым клеем ПУР-501 по наружной поверхности

будущей вставки, что обеспечило надежное скрепление пластин между собой.

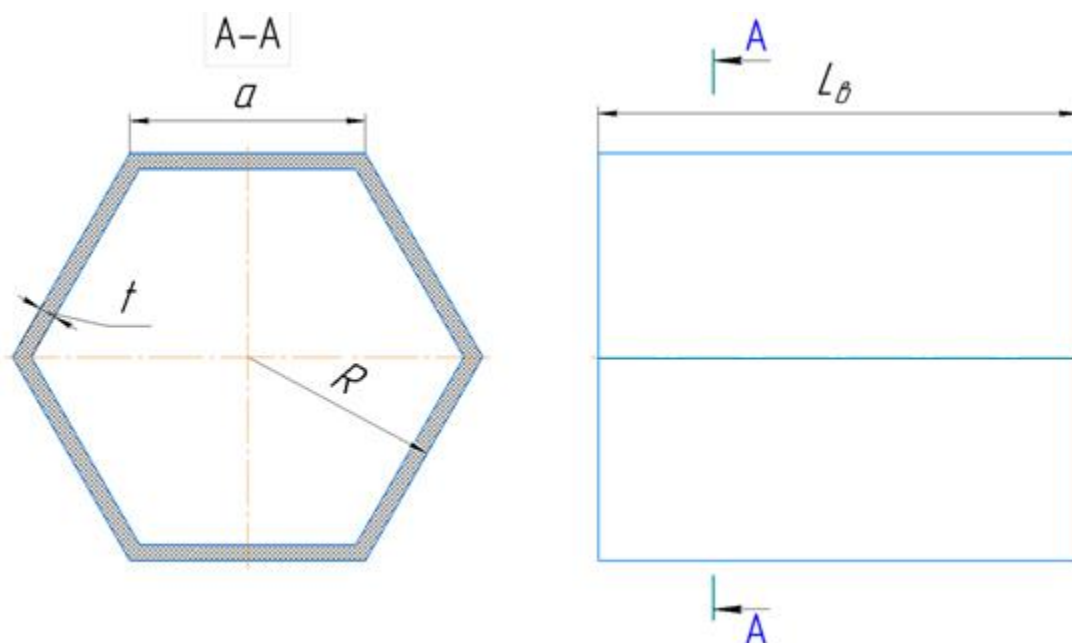


Рисунок 32 – Шестигранная вставка

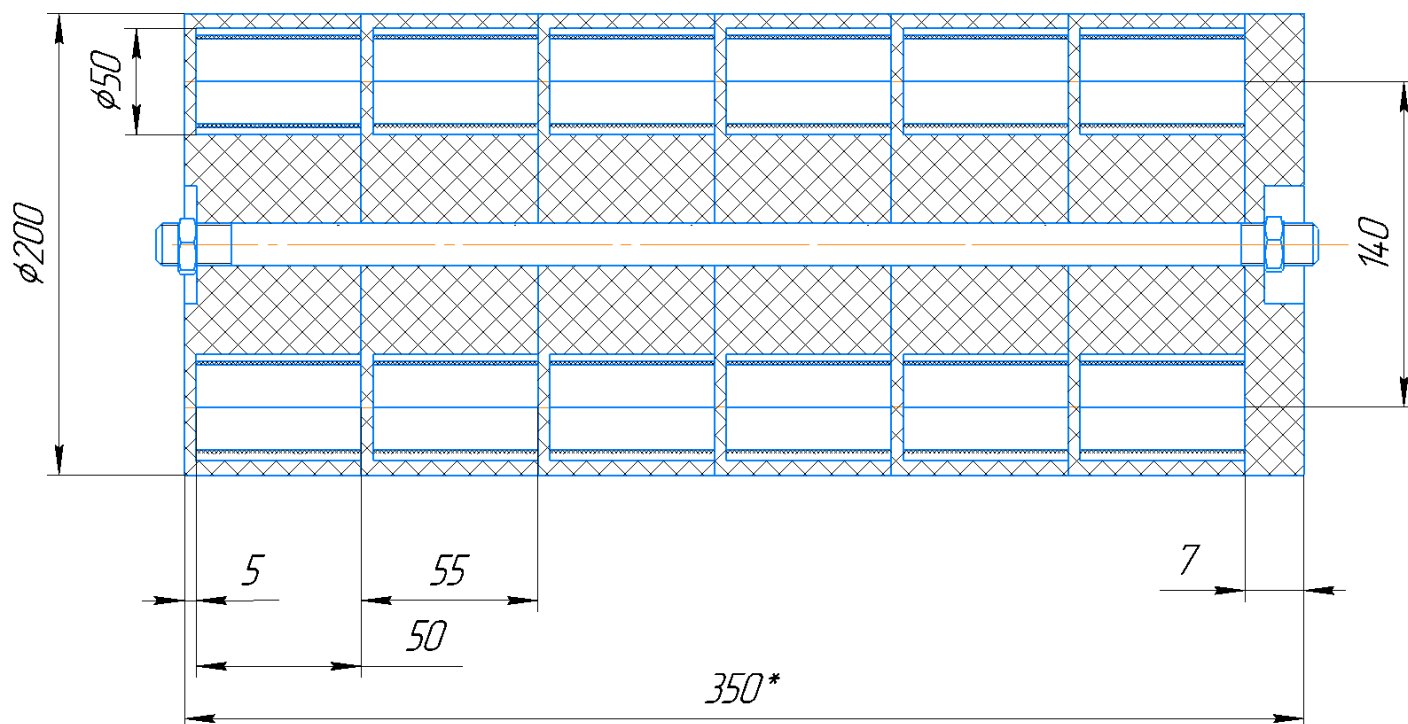


Рисунок 33 – Размеры рабочего барабана

Выводы по работе

В результате проведенных исследований было установлено:

1. Произведен анализ конструкции оснастки, позволяющий обрабатывать СМП без центральных отверстий. За аналог взят барабан коробчатой формы с цилиндрическими полостями и СМП для размещения абразивного наполнителя и СМП.
2. Предложена конструкция барабана с шестигранными полостями для повышения производительности обработки за счет более интенсивного перемешивания абразивного наполнителя с деталями. Ожидаемое повышение производительности 20%
3. Разработана компьютерная модель обработки, в которой по косвенным показателям: числу соударений абразивных гранул с СМП и величинами усилий этих соударений, установлено, что следует ожидать повышение производительности на 20%.
4. С использованием метода математического планирования эксперимента получены зависимости для определения числа соударений и усилий воздействия абразивных гранул и СМП в зависимости от амплитуды и числа оборотов, массы абразивных гранул и пластин.
5. Приведены рекомендации для определения геометрических параметров для предлагаемой оснастки виброабразивной установки с U-образными рабочими камерами.

Список литературы

1. Кожевников, Д.В. Резание материалов: учебник для вузов / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов. – 2-е изд.- Москва: Машиностроение, 2012. – 304 с.
2. Сборный твердосплавной инструмент / Г. Л. Хаेत, В. Л. Гах, К. Г. Громаков и др; под общ. ред. Г. Л. Хаета. – Москва: Машиностроение, 1989. – 256 с.
3. Артамонов, Е.В. Повышение работоспособности сборных режущих инструментов на основе исследования напряженно-деформированного состояния и прочности сменных твердосплавных пластин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Артамонов Е.В. – Томск, 2003. – 34 с.
4. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд.- Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.
5. Леонов С.Л. Ю.В. РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ Леонов С.Л., Татаркин Е.Ю., Федоров Ю.В. Научно-Образовательный журнал Алт ГТУ 2003г. Выпуск 5.
6. Панов В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. Учебное пособие для вузов / Панов В.С., Чувилин А.М. – М.: МИСИ, 2001. 428 с.
7. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
8. Бабичев, А. П. Вибрационные станки для обработки деталей [Текст] / А.П. Бабичев, В. Б. Трунин, Ю. М. Самодумский, В. П. Устинов. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
9. Тамаркин, М. А. Теоретические основы оптимизации процессов

- обработки деталей свободными абразивами [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / М. А. Тамаркин. – Ростов н/Д, 1995. – 237 с.
10. Оборудование для обработки формовых РТИ после вулканизации / Н.В. Васильев, В.Г. Ищенко, Е.Н. Ерыгин [и др.]. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1978. – 68 с. – (Темат. обзор. Сер. «Пр-во резинотехн. и асбестотехн. изделий»)
 11. Арутюнян Г.В. Элементарная геометрия / Г.В. Арутюнян. – М.: Московский Государственный Технический Университет (МГТУ) имени Н.Э. Баумана, 2010. – 950 с.
 12. Бабичев, А. П. Вибрационная обработка деталей в абразивной среде [Текст] / А. П. Бабичев. – М.: Машиностроение. – 1966. – 90 с.
 13. Сухарев М.В. Основы Delphi. Профессиональный подход -- СПб.: Наука и Техника, 2004. – 600 ил.
 14. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский и др. - М.: БХВ-Петербург, 2016. - 800 с.
 15. Липов А.В. Исследование вибрационной обработки сменных многогранных пластин режущего инструмента без центральных отверстий / А. В. Липов, Г. С. Большаков, А. Л. Чернов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014 – №2(30). – с.127-137.
 16. Компьютерное моделирование движения загрузки контейнера вибрационной машины/ Трилисский В.О., Голубовский В.В., Панчурин В.В., Большаков Г.С. / Механики XXI века Межрегиональная научно-техническая

конференция с международным участием: Сборник докладов.-Братск: ГОУВПО «БрГУ», 2005-316 с.

17. Грачев Ю. П. Математические методы планирования экспериментов: учеб. пособие / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин – М.: ДеЛиПринт, 2005. – 296 с.
18. Кацев, П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.
19. Трилисский В.О. Моделирование процесса вибрационной обработки твердосплавного инструмента Трилисский В.О., Большаков Г.С., Панчурин В.В. / Проблемы исследования и проектирования машин: Сборник статей II Международной научно-технической конференции. –Пенза, 2006.
20. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики. Большев Л.Н., Смирнов Н.М. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983г.

Приложение А
Научная публикация

Приложение Б

Презентация

Приложение В

**Фрагмент результата воздействия одной гранулы на СМП после
экспорта результатов в формат Excel**

Эпюра4

Время (sec) Сила противодействия2 (newton)

0	
3,469942197	0,4249581
3,471335836	0,3777973
3,481412989	0,8481673
3,491550556	1,0022981
3,501654889	1,4800311
3,50982659	0,9336345
3,511630164	0,9872556
3,521645412	1,5964982
3,531634575	1,4781807
3,543026789	2,0400790
3,549710983	1,9315036
3,553055007	1,8209028
3,563702608	1,2109014
3,579012713	1,7842302
3,589163997	1,5506491
3,589595376	1,5499589
3,599756797	1,5288205
3,612766431	1,5015467
3,623031654	1,3011809
3,629479769	1,3840318
3,633670329	0,5176020
3,645596948	0,3591589
3,656995983	0,8924694
3,667464721	0,7232733
3,669364162	0,7157493
3,678748797	0,7015325
3,689350965	0,6868690
3,700096732	0,6650719
3,709248555	0,6615603
3,710315232	0,6608061
3,722219733	0,6500961
3,733366155	0,6387306
3,74381926	0,5767387
3,749132948	0,5728619
3,753833294	0,5575700
3,765148217	0,7053986
3,775196469	0,5376690
3,785500247	0,6638928
3,789017341	0,5020487
3,800076644	0,4632292
3,810503546	0,4308388
3,82053178	0,4770229
3,828901734	0,4808036

3,831203949	0,4771336
3,84167527	0,0259755
3,852401683	0,1253358
3,868786127	0,2923874
3,906184971	0,4546841
3,90867052	0,4559743
3,93043172	0,3872196
3,947899978	0,3203541
3,948554913	0,2823900
3,980684166	0,0870756
3,988439306	0,0369799
4,011256689	0,0132840
4,021907324	0,0129675
4,028323699	0,0110222
4,039381377	0,0074015
4,054406949	0,0018902
4,107459897	0,3103439
4,108092486	0,4710320
4,117589017	0,5300886
4,13006206	0,5493788
4,141193628	0,2127074
4,147976879	0,4956574
4,173030074	0,4856085
4,185141259	0,3986147
4,187861272	0,3819192
4,195531043	0,3016842
4,20889141	0,2858158
4,219280206	0,2778797
4,227745665	0,2651189
4,229275996	0,2650237
4,239320214	0,3169467
4,249352391	0,3277832
4,259573451	0,8108607
4,267630058	0,8640612
4,269745763	0,8980996
4,282086225	0,6190249
4,29344697	0,1217245
4,303420175	0,2800920
4,307514451	1,0506989
4,313689462	0,6547041
4,333968126	0,1934812
4,347398844	0,3436494
4,35199835	0,3501863
4,362383174	0,3566110
4,374329667	0,4927133
4,385038047	0,4472314
4,387283237	0,4662543
4,395293709	0,4610870

4,40677288	0,4456028
4,419065643	0,5840276
4,42716763	0,4621557
4,429061047	0,5745849
4,439122396	0,4574914
4,45015327	0,3929098
4,460955894	0,1288334
4,467052023	0,1650433
4,470941981	0,1411585
4,501480616	0,0204360
4,506936416	0,0534436
4,511510504	0,0370215
4,521535977	0,0478185
4,546820809	0,0292873
4,551527838	0,2275188
4,661333052	0,3412720
4,666473988	0,4099180
4,671306579	0,3819657
4,681281087	0,4736346
4,691262357	0,4523255
4,701236974	0,3678528
4,706358382	0,3461071
4,71275952	0,3920177
4,72273617	0,3393036
4,732713727	0,3346764
4,742754846	0,3491345
4,746242775	0,3467786
4,786127168	0,3578332
4,804704099	0,3710920
4,814702392	0,3673415
4,824812173	0,3667124
4,826011561	0,3646392
4,841778552	0,3712613
4,854661048	0,3712854
4,864651131	0,3980395
4,865895954	0,3848940
4,874710307	0,3882867
4,884685399	0,5034196
4,895006942	0,4398166
4,905056982	0,4481214
4,905780347	0,4478667
4,922257345	0,4311960
4,932541243	0,4333493
4,943948031	0,4066584
4,94566474	0,3945521
4,985549133	0,4564812
5,025433526	0,4997570
5,045472589	0,5747112

5,065317919	0,5349494
5,069015705	0,5129966
5,079079807	0,5142128
5,0901326	0,4995038
5,100108111	0,4506486
5,105202312	0,6563098
5,110276945	0,4634861
5,120249773	0,4862992
5,130241721	0,2349000
5,140317657	0,1157168
5,145086705	3,3749731
5,150485612	0,4794909
5,160468744	0,4399752
5,17070312	0,3617157
5,180788697	0,4137392
5,184971098	0,4135524
5,196127525	0,4156211
5,208101043	0,4143512
5,218301558	0,4115712
5,224855491	0,4451968
5,228399703	0,4495924
5,238722254	0,8332003
5,251652369	1,0520655
5,264739884	0,5006177
5,264739884	0,5006177
5,27471612	0,7428157
5,284696772	0,3727747
5,294671474	0,7458677
5,304624277	0,1086193
5,304649422	0,9433029
5,314628216	0,6034869
5,324604125	1,0083961
5,334583442	0,1906400
5,344508671	0,8049599
5,344556334	0,4858204
5,364515307	0,6203386
5,374492222	0,0511474
5,384469305	0,0131919
5,394446373	1,4640490
5,404423939	0,9841636
5,414398457	0,4903997
5,424277457	0,5768637
5,424374398	0,7543783
5,434352098	0,8019692
5,444328833	0,8129505
5,454304576	0,1803925
5,46416185	0,6997009
5,464279099	0,7239162

5,474252449	0,7197510
5,484224504	1,7090448
5,494200285	1,1098153
5,504046243	0,8590067
5,50417427	0,4143315
5,514148799	0,4930932
5,524128258	0,2223830
5,53410674	0,7557176
5,543930636	0,7396921
5,544081507	0,9006500
5,554059475	0,5810635
5,564039174	0,8866772
5,574012727	0,8422240
5,583815029	0,5675714
5,58398953	0,6205538
5,593966826	0,8881591
5,603946312	0,9303888
5,613919914	0,9337563
5,623699422	0,5300061
5,623900364	0,7412338
5,633880858	0,6162464
5,643854888	0,5702188
5,653839223	0,7220588
5,663583815	0,5957076
5,66381292	0,2758836
5,673790195	0,8556545
5,683766766	0,2335446
5,693742238	0,2480617
11,98118985	0,0501245
12,00118985	0,0129281
12,01118985	1,4347680
12,02118985	0,9644803
12,03118985	0,4805917
12,04118985	0,5653264
12,05118985	0,7392907
12,06118985	0,7859298
12,07118985	0,7966915
12,08118985	0,1767846
12,09118985	0,6857069
12,10118985	0,7094379
12,11118985	0,7053560
12,12118985	1,6748639
12,13118985	1,0876190
12,14118985	0,8418265
12,15118985	0,4060449
12,16118985	0,4832313
12,17118985	0,2179353
12,18118985	0,7406032

12,19118985	0,7248982
12,20118985	0,8826370
12,21118985	0,5694422
12,22118985	0,8689436
12,23118985	0,8253795
12,24118985	0,5562199
12,25118985	0,6081428
12,26118985	0,8703959
12,27118985	0,9117811
12,28118985	0,9150812
12,29118985	0,5194060
12,30118985	0,7264091
12,31118985	0,6039215
12,32118985	0,5588145
12,33118985	0,7076176
12,34118985	0,5837934
12,35118985	0,2703659
12,36118985	0,8385414
12,37118985	0,2288737
12,38118985	0,2431005
15,28118985	1,4494085
15,29118985	0,9743219
15,30118985	0,4854957
15,31118985	0,5710950
15,32118985	0,7468345
15,33118985	0,7939495
15,34118985	0,8048210
15,35118985	0,1785885
15,36118985	0,6927039
15,37118985	0,7166770
15,38118985	0,7125535
15,39118985	1,6919544
15,40118985	1,0987172
15,41118985	0,8504166
15,42118985	0,4101882
15,43118985	0,4881623
15,44118985	0,2201592
15,45118985	0,7481604
15,46118985	0,7322951
15,47118985	0,8916435
15,48118985	0,5752528
15,49118985	0,8778104
15,50118985	0,8338017
15,51118985	0,5618957
15,52118985	0,6143483
15,53118985	0,8792775
15,54118985	0,9210849
15,55118985	0,9244188

15,56118985	0,5247061
15,57118985	0,7338214
15,58118985	0,6100839
15,59118985	0,5645166
15,60118985	0,7148382
15,61118985	0,5897505
15,62118985	0,2731247
15,63118985	0,8470980
15,64118985	0,2312092
15,65118985	0,2455811
15,66118985	0,2505423
15,67118985	0,2530477
15,68118985	0,2555782
15,69118985	0,2581340
15,70118985	0,2607153
15,71118985	0,2633225
15,72118985	0,2659557
15,73118985	0,2686153
15,74118985	0,2713014
15,75118985	0,2740144
15,76118985	0,2767546
15,77118985	0,2795221
15,78118985	0,2823173
15,79118985	0,2851405
15,80118985	0,2879919
15,81118985	0,2908718
15,82118985	0,2937806
15,83118985	0,2967184
15,84118985	0,2996855
15,85118985	0,3026824
15,86118985	0,3057092
15,87118985	0,3087663
15,88118985	0,3118540
15,89118985	0,3149725
15,90118985	0,3181222
15,91118985	0,3213035
15,92118985	0,3245165
15,93118985	0,3277617
15,94118985	0,3310393
15,95118985	0,3343497
15,96118985	0,3376932
15,97118985	0,3410701
15,98118985	0,3444808
15,99118985	0,3479256
16,00118985	0,3514049