

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

На правах рукописи

Осинцев Александр Александрович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ
СВЯЗКЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доцент, доктор технических наук,
Марина Николаевна Самодурова

Магнитогорск

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ В РОССИИ И МИРЕ.....	12
1.1 Состояние производства инструмента на керамической связке на предприятиях России.....	12
1.2 Существующие на предприятиях России технологии, оснастка и оборудование для производства абразивных кругов на керамических связках.....	14
1.3 Состояние производства абразивного инструмента на керамических связках в мире.....	25
1.4 Выводы по главе.....	30
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ.....	33
2.1 Анализ влияния размеров засыпок в пресс-формах на выбор способов для прессования.....	33
2.2 Научный анализ исследований процессов прессования заготовок абразивных кругов на керамических связках.....	42
2.2.1 Характеристика абразивного инструмента и ее связь с параметрами исходной смеси и прессования из нее заготовок.....	41
2.2.2 Экспериментальные исследования процесса прессования.....	49
2.3 Выводы по главе.....	73
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ.....	75
3.1 Поверхностное взаимодействие при прессовании порошков.....	75
3.1.1 Анализ известных исследований.....	74
3.1.2 Математическое моделирование поверхностного взаимодействия при прессовании порошков.....	75
3.1.2.1 Функционал перемещений и напряжений.....	75

3.1.2.2 Допущения математической модели.....	76
3.1.2.3 Параметры очага деформации.....	77
3.1.2.4 Функционал поля перемещений.....	78
3.1.2.5 Уравнение плотности.....	79
3.1.3 Результаты реализации модели.....	80
3.2 Осевое сжатие сплошных и полых цилиндрических заготовок.....	85
3.2.1 Двухстороннее (симметричное) осевое сжатие.....	85
3.2.2 Одностороннее (несимметричное) осевое сжатие.....	90
3.3 Статистическая математическая модель.....	93
3.3.1 Постановка задачи для создания математической модели статистическим методом.....	92
3.3.2 Исходные факторы и критерий исследования.....	92
3.3.2.1 Поле эксперимента.....	94
3.3.2.2 Реализация модели.....	96
3.3.2.3 Уравнение регрессии.....	97
3.3.2.4 Анализ полученной математической модели и результатов.....	115
3.4 Выводы по главе.....	121
4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБОТКА НОВЫХ УСТРОЙСТВ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА.....	123
4.1 Технологии и устройства для равномерной укладки и разравнивания абразивной массы в пресс-форме.....	123
4.2 Устройство для формования в одной пресс-форме нескольких типоразмеров заготовок абразивных кругов.....	126
4.3 Устройство к прессу общего назначения для двухстороннего прессования абразивных заготовок.....	130
4.4 Пуансон с гидравлической подушкой пресс-формы для прессования заготовок абразивного инструмента.....	135
4.5 Многоместная пресс-форма для прессования порошков.....	137

4.6 Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью из порошков.....	139
4.7 Прокатная клетка для прокатки порошковых композиций.....	141
4.8 Выводы по главе.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Использование абразивного инструмента всегда давало более точный и менее шероховатый результат при обработке деталей по сравнению с другими видами механической обработки (точение, фрезерование, строгание и другие). Применение таких деталей приводило и приводит к повышению эксплуатационных характеристик оборудования и инструмента, в которых он используется. Путь абразивного производства на территории России начался на заводе Н.Н. Струка в Санкт-Петербурге, когда в XIX веке уже было организовано производство точильных камней из природных блоков, поставляемых с греческого острова NAXOS.

Современное производство инструмента из искусственных абразивных материалов было создано в России только в 30-40-е годы прошлого века, в период индустриализации страны. Так, Петербургский абразивный завод освоил, причем первым в России, производство электрокорунда, а затем зерна из него только в 1931 году. В 30-40-е годы XX века в России были созданы Московские абразивный завод и завод шлифовальных изделий, Челябинский, Косулинский абразивные заводы и Златоустовский абразивный завод. В военные и послевоенные годы на Урале, в Сибири и Центральной России было создано несколько предприятий абразивной промышленности.

С развитием техники и повышением требований к изготавливаемым деталям в промышленности, а так же с учетом появления новых материалов, свойства которых порой требуют обработки без изменения их температурных режимов, возрастают требования к обрабатываемому инструменту, в частности к абразивному. Так, на сегодняшний день требуется скорость шлифинструмента 50 м/с и более, класс точности (ГОСТ 2424-83) - А, АА, класс неуравновешенности - 1 или 2, что предполагает более ответственный подход к изготовлению абразивных кругов, начиная с этапа подготовки сырья к производству. Большое влияние на рабочие характеристики (рабочая скорость, класс точности, класс неуравновешенности) готового абразивного круга оказывает геометрия заготовки

и способ ее получения. Поэтому в зависимости от высоты круга и его диаметра выбирают различные способы формования. Кроме того, используют различные способы укладки смеси в пресс-форму, поскольку от равномерности ее укладки зависит равноплотность готового круга и, как следствие, его рабочие характеристики.

Недостаточно изученный вопрос взаимодействия прессуемой абразивной смеси на керамической связке с деталями пресс-оснастки требует создать математическую модель как при помощи вариационного метода, так и при помощи статистических методов, что требует произвести всестороннее исследование процесса прессования заготовок.

Для получения заготовок кругов с требуемыми на сегодня характеристиками необходимы новые технические методы получения более равномерного распределения физических свойств в уложенной массе и отформованной заготовке. При этом для конкурентоспособности желательно использовать прессы общего назначения.

Проведенные в работе исследования актуальны для производства кругов с повышенными требованиями.

Степень ее разработанности.

В конце 40-х и в 50-е годы XX века выполняли исследования сотрудники ВНИИАШ Любомудров В.Н., Гуревич А.С. и другие. Так, исследования по технологии и оборудованию производства инструмента на керамической связке Любомудров В.Н. обобщил в монографии, вышедшей из печати еще в 1953 году. Позднее научный вклад в развитие абразивной подотрасли внесли такие ученые, как Рыбаков В.А., Ковальчук Ю.М., Глаговский П.А., Бакуль Ю.Н., Тырков В.Н., Барков Л.А., Чаплыгин Б.А., Павлов В.А., Самодурова М.Н. и другие.

Цели и задачи диссертации - совершенствование процесса получения заготовок абразивных кругов на керамической связке и разработка новых элементов оборудования на основе математического моделирования.

В связи с поставленной целью решаются следующие **задачи**:

1. Провести анализ информационных источников технологии производства и оборудования абразивного инструмента на керамической связке в России и мире для выработки направления работы повышения его качества.

2. Посредством натурного моделирования провести исследование процесса прессования заготовок абразивных кругов. Оценить влияние технологических параметров прессовки на выбор рациональной схемы прессования.

3. С использованием вариационного метода осуществить математическое моделирование процесса прессования заготовок абразивных кругов на керамической связке. Описать едиными для всех схем прессования уравнениями скорости деформации заготовок.

4. Разработать новые элементы оборудования, направленные на повышение равномерности плотности по объему заготовок. Модернизировать оснастку для получения заготовок абразивных кругов классов неуравновешенности 1 и 2.

Объект исследования - технологический процесс, оборудование и оснастка для производства заготовок абразивных кругов на керамической связке.

Предмет исследования - заготовка абразивного круга на керамической связке и устройства для ее изготовления на универсальных прессах общего назначения.

Научная новизна работы:

1. Для материала на основе белого электрокорунда разработана математическая модель прессования, учитывающая поверхностное взаимодействие инструмента с прессуемым материалом и геометрией оснастки и позволяющая рассчитать перемещение частиц и их напряженно-деформированное состояние в зависимости от плотности смеси и силы трения.

2. Впервые получены уравнения осевых скоростей перемещения формуемого материала на керамической связке независимо от схемы нагружения, позволившие усовершенствовать технологию получения заготовок и снизить усилие их прессования.

3. На основании полученных экспериментальных данных построена статистическая модель, позволяющая прогнозировать усилие прессования с

повышенной точностью (средняя погрешность 8,1 %) и учитывать влияние характеристик прессуемого материала на основе белого электрокорунда.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что созданы теоретические предпосылки улучшения технологии прессования материалов на основе абразивного материала для изделий шлифовального назначения. Разработанные в диссертации методы расчета функционала напряжений и перемещений, а также единые уравнения поля скоростей для разных способов нагружения и статистическая модель способствуют развитию моделирования процессов прессования композиций на основе абразивного материала и проектирования новых видов оборудования для обработки давлением указанных материалов.

Практическая значимость работы:

1. Результаты натурального моделирования процесса прессования позволяют выбирать различные схемы прессования (одно и двухсторонние) в зависимости от геометрии и структуры заготовки с целью получения заготовок с более равномерной (до 20 %) плотностью по объему.

2. Разработано устройство, позволяющее производить равномерную укладку абразивной массы в пресс-форму, защищенное патентом РФ №2309036, реализация которого позволило повысить равномерность заготовки на 20 %.

Разработаны: устройство для одновременного двустороннего прессования заготовок, применяемое на прессах общего назначения (патент РФ №2156684); устройства, позволяющие упростить эксплуатацию пресс-оснастки (патент РФ №2216440, патент РФ №142883); пресс-форма и устройство подачи материала, с помощью которых повышается равномерность получаемых заготовок (патент РФ №150979, патент РФ №151700) на 20 %; прокатная клеть для прокатки порошковых композиций (патент РФ № 146905).

3. Экономический эффект от внедрения устройств на АО НПО «Южуралинструмент» составил 7,5 млн. рублей в год за счет производства кругов с более высокими характеристиками. Акт о внедрении результатов диссертационного исследования представлен в Приложении.

Методология и методы исследования.

Методы исследования базируются на теории обработки давлением порошковых и композиционных материалов, а также на применении статистических методов анализа данных.

Использован комплексный метод, включающий теоретические исследования на основе теории пластичности с учетом несплошности среды, построение механических и регрессионных моделей прессования для абразивных смесей, исследования в лабораторных и производственных условиях. Использовалась тензостанция TSG-S01 для тензометрирования нагрузки на различных деталях пресс-оснастки при прессовании. Проверка образцов на твердость производилась на твердомере ТП-400.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технологии прессования и формования заготовок абразивных кругов на керамической связке, обеспечивающие снижение усилия прессования и повышение равномерности плотности по объему заготовки на 20 % (п. 4 паспорта специальности).

2. Математическая модель поверхностного взаимодействия инструмента с прессуемым материалом на основе вариационных методов, позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние прессуемой заготовки (п. 6 паспорта специальности).

3. Уравнения для полей скоростей при осевом сжатии цилиндрической заготовки.

4. Статистическая математическая модель процесса прессования заготовок абразивных кругов на керамической связке со средним процентом расхождения 8,1 %.

5. Разработанные устройства, формирующие в материале структуру с комплексом физико-механических свойств, обеспечивающих повышение возможностей эксплуатации изделий на 20 %, позволяющие получать круги класса неуравновешенности 1 и 2 (п. 3 паспорта специальности).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ (г. Челябинск, 2002-2006, 2019 гг.); на Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии» (г. Темиртау, Республика Казахстан, 2003 г.); на международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии» (г. Липецк, 2006 г.); на 10-й юбилейной международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Крым, Ялта, 2010 г.); на XVI INTERNATIONAL CONFERENCE «NEW TECHNOLOGIES AND ACHIEVEMENTS IN METALLURGY AND ENGINEERING» (Czestochowa, Poland, 2015); на международной научно-практической конференции «Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний» (г. Рудный, Республика Казахстан, 2019 г.); на XXI Всероссийской научно-практической конференции «Общество. Наука. Инновации» (НПК-2021) (г. Вятка, 2021 г.); на V международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования в современном мире» (г. Уфа, 2024г.).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа является исследованием закономерностей объемного формования при изготовлении заготовок абразивного инструмента на керамической связке в системе «заготовка-инструмент». Выполненные исследования направлены на повышение равномерности физических свойств заготовки, которые позволят улучшить рабочие характеристики готового инструмента. Полученные научные результаты соответствуют пунктам 3, 4 и 6 паспорта специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается применением уравнений теории пластичности, корректной постановкой задач экспериментальных исследований и методик обработки данных, полученных опытным путем. Проверка разработанных уравнений прессования и регрессионных уравнений показала

возможность их практического использования. Результаты расчетов имеют высокую сходимость с экспериментально полученными данными (средний процент расхождения 8,1 %). Приведенные в диссертации выводы теоретически и экспериментально обоснованы и подтверждены.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 2 из перечня, рекомендованного ВАК, получено 7 патентов РФ, 3 в прочих изданиях.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на 158 страницах машинописного текста, иллюстрирована 61 рисунками, содержит 46 таблиц, библиографический список, включающий 106 наименования и 1 приложение.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ В РОССИИ И МИРЕ

1.1 Состояние производства инструмента на керамической связке на предприятиях России

С начала Первой мировой войны поставки природного наждачного камня из Греции (с острова NAXOS) на завод Н.Н. Струка прекратились, поэтому выпуск абразивного инструмента (точильных камней) в России был остановлен.

Перед Россией встал вопрос о создании абразивного производства на базе собственного сырья. Поисками такого природного сырья (наждака и корунда) в районе Златоуста еще в 30-х годах XIX века успешно занимался известный металлург П.П. Аносов. Месторождение наждака было обнаружено тогда около Златоуста, а месторождение корунда - вблизи озера Тургояк. Из этого дробленого и рассеянного сырья путем прессования со связкой в 1915 году в Златоусте впервые в России получены искусственные точильные камни.

Промышленное производство абразивных кругов с магнезиальной связкой было организовано и начало выпускать продукцию на Златоустовском механическом заводе в 1917 году. Самостоятельным (Златоустовским абразивным заводом* - ЗАЗом) это предприятие стало в 1934 году. В настоящее время ЗАЗ выпускает широкий сортамент шлифовальных кругов диаметром от 250 до 1 060 мм из электрокорунда нормального и карбида кремния [1]. Остановимся на анализе состояния производства абразивных материалов и инструмента на ряде старейших и крупнейших абразивных предприятий России [2-6].

На месте машиностроительного завода Н.Н. Струка в г. Санкт-Петербурге в настоящее время работает одно из крупных предприятий абразивной промышленности России - Петербургский абразивный завод «Ильич» (ПАЗИ). ПАЗИ в 1931 году первым в России освоил производство электрокорунда, в 1933

*В настоящее время переименован в Златабразив.

году - производство карбида кремния, на текущий момент производит инструмент и из эльбора. Позднее стал производить белый электрокорунд (1936 г.) и карбид бора (1949 г.). ПАЗИ первым в России приступил к освоению в 30-е годы 20-го века передовых для того времени технологий производства абразивного инструмента [7]. В последние годы основной продукцией ПАЗИ являются шлифовальные круги диаметром от 100 до 1100 мм, высотой от 4 до 200 мм из электрокорундовых материалов и карбида кремния на керамических связках, а также другая разнообразная продукция.

Второе крупнейшее абразивное предприятие России - Лужский абразивный завод (ЛАЗ), созданный 1926 году на базе старейшего тигельного завода, основанного еще в 1906 году. В настоящее время важной продукцией ЛАЗ являются абразивные круги на керамической связке диаметром от 13 до 1 060 мм и высотой от 3 до 200 мм из электрокорундовых материалов и карбида кремния. ЛАЗ в 2002 году выпустил 34 % всей продукции абразивной отрасли России и вышел на первое место по объемам производства [8].

Как один из крупнейших, известен также Волжский абразивный завод (ВАЗ), занимающийся выпуском электрокорундовых и карбидкремниевых абразивных материалов. Первую продукцию Волжский абразивный завод выпустил в 1961 году. Сортамент производимых инструментов включает круги диаметром от 100 до 1 060 мм и высотой от 10 до 200 мм. Завод имеет механизированные линии по изготовлению и обработке абразивного инструмента [9, 10] и выпускает в настоящее время 22 % всей абразивной продукции России.

К числу крупнейших в 2002 году в России относился входивший в компанию Абразивные заводы Урала (АЗУ) Челябинский абразивный завод (ЧАЗ)*. До последних дней своей работы завод выпускал абразивный инструмент на керамической связке, электрокорундовые материалы и много другой продукции. Выпускаемый сортамент шлифовальных кругов включал круги от 100 до 1 400 мм по наружному диаметру, от 6 до 280 мм по высоте и от 20 до 400 мм по посадочному отверстию [11, 12].

В 2002 году ЧАЗ занимал третье место после ЛАЗ и ВАЗ по объемам производства, выпуская 14 % продукции абразивной отрасли России.

Нельзя не отметить ряд заводов, занятых в производстве абразивного инструмента на керамической связке - Косулинский абразивный завод [13], Московский абразивный завод [14] а также созданный в последние годы, Белгородский абразивный завод (БАЗ), который по объемам производства в 2002 году превзошел ПАЗИ и занял четвертое место в России. В данный момент БАЗ занимается изготовлением шлифовальной шкурки.

1.2 Существующие на предприятиях России технологии, оснастка и оборудование для производства абразивных кругов на керамических связках

В 1953 году в России была издана монография [15], в которой авторским коллективом во главе с В.Н. Любомудровым впервые были приведены подробные сведения об исходных материалах, их свойствах, основных операциях приготовления связок, абразивных формовочных масс и технологии производства заготовок и готовых абразивных кругов на керамических связках. Позднее была издана монография [16] под общей редакцией В.Н. Бакуля, посвященная проектированию и технологии изготовления абразивного инструмента. Оборудование для приготовления абразивных масс, формования заготовок абразивных кругов, механической обработке этих заготовок после термической обработки, испытаниями контроля качества готовых кругов описано впервые в монографии А.С. Гуревича [17], а позднее в монографии [18] под общей редакцией В.А. Рыбакова. Из современных публикаций можно отметить труды В.М. Шумячера [19] и И.П. Никифорова [20].

Применяемые на абразивных предприятиях России в настоящее время технологии, оснастка и оборудование для получения абразивных кругов на керамических связках, в основном мало отличаются от описанных в работах [15-

* Прекратил свое существование в 2009 году.

18], представляющих абразивное производство 50-70 годов XX века.

Формование заготовок абразивных кругов на керамических связках

Схемы выполнения основных операций технологических процессов производства абразивных инструментов на керамических, бакелитовых и вулканитовых связках приведены на рисунке 1.

Самое широкое применение имеет абразивный инструмент на керамических связках, формование которого осуществляется полусухим способом в закрытых пресс-формах.

Формование заготовок абразивных кругов на керамических связках включает следующие основные операции: приготовление и дозирование абразивной смеси; укладку и разравнивание ее в пресс-форме; одностороннее прессование или одностороннее верхнее прессование с нижней подпрессовкой; выталкивание заготовки из матрицы пресс-формы, съем ее с выталкивателя и сушка.

Приготовление и дозирование смеси

После смешивания абразивные смеси подвергаются окончательному приготовлению путем просеивания на специальных устройствах, что позволяет их разрыхлить и устранить комки и примесные частицы. Просеянные смеси поступают на операцию дозирования.

Оптимальное дозирование массы абразивной смеси определяет степень ее уплотнения при прессовании, а также плотность и пористость полученной прессовки. Погрешности в дозировании смеси приводят к изменениям твердости и структуры готового инструмента.



Рисунок 1 - Схемы технологических процессов производства абразивных инструментов на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках

На большинстве абразивных предприятий России в настоящее время используется дозирование по массе смеси путем ее взвешивания на автоматических весах. Причем погрешность взвешивания в большинстве случаев не должна превышать 0,5 % от массы полученной заготовки. Для получения заготовок с небольшой массой используется также объемное дозирование.

Последовательность выполнения основных операций после приготовления и дозирования смеси приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 - Последовательность выполнения основных операций: дозирования, укладки, разравнивания и прессования смеси в пресс-форме, выталкивания прессовки и сушки, термической, механической обработки заготовок и испытания готовых кругов на керамической связке

К недостаткам операции весового дозирования относится использование устаревших торговых весов вместо современного электронного весового оборудования.

Укладка и разравнивание смесей в пресс-формах

Как видно из рисунка 2, после приготовления и дозирования абразивные смеси укладываются в пресс-формы для формования заготовок кругов. Поскольку все пластифицированные абразивные смеси имеют малую текучесть, то выполнить их равномерную укладку в пресс-формы достаточно сложно. Даже незначительная неравномерность в укладке смесей приводит в полученных заготовках и готовых кругах к неравномерной плотности, а затем твердости, неравномерной структуре и дисбалансу массы кругов или их неуравновешенности в процессе эксплуатации. Заготовки кругов с неоднородной плотностью имеют неоднородное напряженное состояние, поэтому в процессе их температурной обработки (обжига) в теле кругов возникают растягивающие напряжения, и, как следствие, макродефекты в виде трещин, а круги малой высоты искажают свою геометрическую форму.

В последнее время на предприятиях абразивной промышленности России при весовом дозировании укладка и разравнивание смесей на керамической связке в пресс-формы выполняется в основном с помощью специальных устройств, хотя известны и простейшие ручные приспособления, например совки, гребенки, ровнялки и т.д. [15, 17, 18].

Так, в работе [18] описана простейшая ручная шпильковая «ровнялка». Разравнивание массы осуществляется поворотом диска со шпильками, помещенного на пресс-форму, на 180° . При этом масса рыхлится шпильками, закрепленными в определенном порядке на диске, сначала приближаясь к центру круга, а затем при повороте диска на 180° к периферии круга. Таким образом, ровной наружной торцевой поверхности абразивной массы в пресс-форме получить не удастся, хотя операция рыхления массы выполняется достаточно успешно. Равномерной плотности массы в пресс-форме с помощью шпильковой «ровнялки» также не удастся получить.

В авторском свидетельстве, приведенном А.С. Гуревичем в работе [17], описано устройство для разравнивания абразивной массы в пресс-формах

(рисунок 3). Устройство состоит из станины 1, питателя 2, в котором смонтированы планетарно-вращающиеся рыхлители 3 и спирали 4, гидropодъемника 5, работающего в заданном режиме, и гидронасосной станции 6, находящейся внутри станины. Пульт управления машиной смонтирован на боковой поверхности станины.

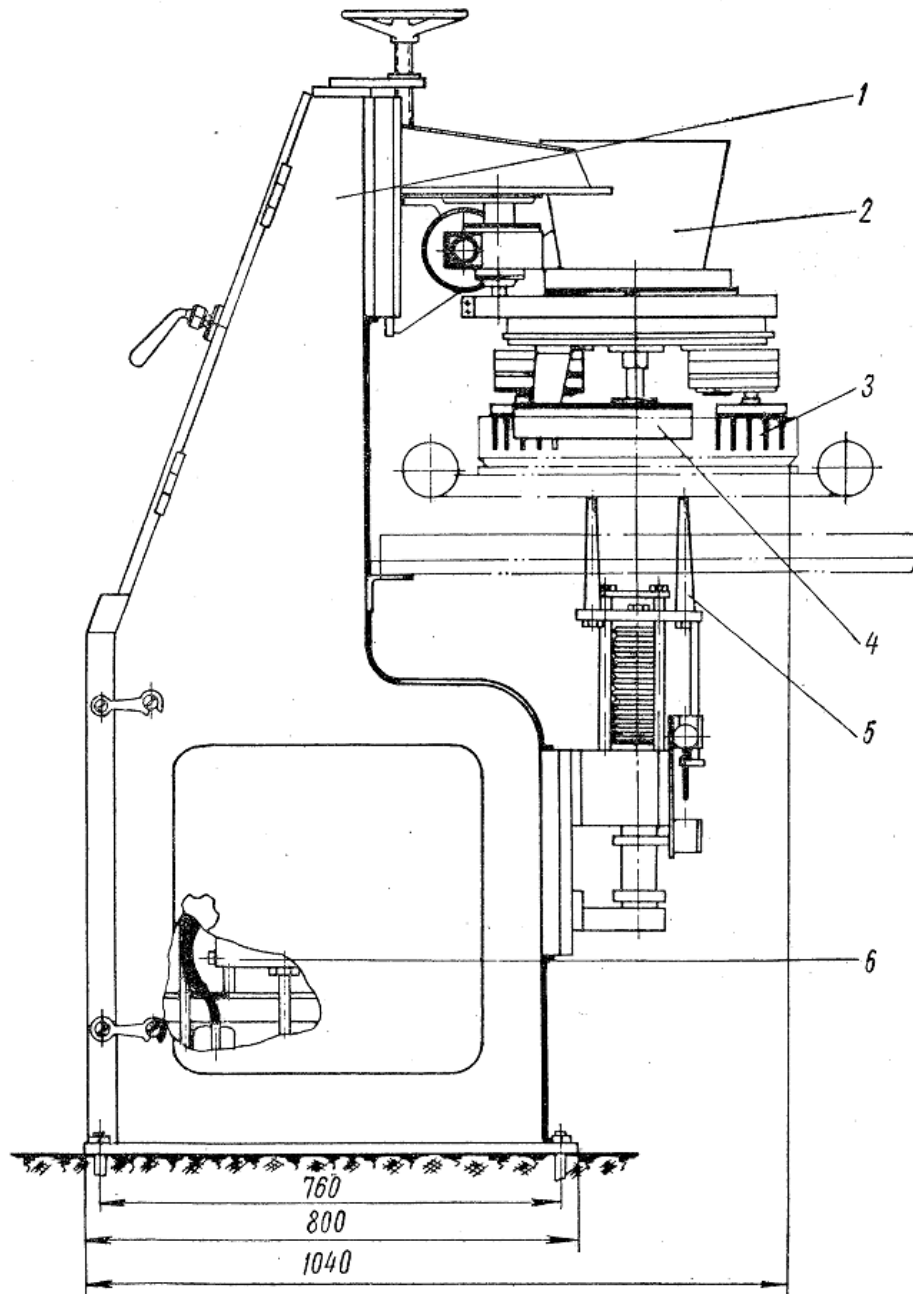


Рисунок 3 - Машина для укладки и разравнивания мелкозернистых абразивных масс в пресс-форме по А.с. №10859

Техническая характеристика

Формуемые круги в мм:

диаметр.....	300-500
высота.....	8-32
Емкость бункера в дм^3	10
Высота бункера над уровнем вала в мм.....	1630
Ход гидроподъемника в мм.....	120
Усилие гидроподъемника в Н.....	9800
Скорость вращения питателя в об/мин.....	31
Скорость вращения рыхлителей в об/мин.....	116
Время укладки массы в пресс-форму в сек.....	20-40
Габариты в мм:	
длина.....	1040
ширина.....	565
высота.....	1870
Вес в Н.....	5880

Основные недостатки способа укладки и разравнивания на описанном устройстве - длительность операций укладки и разравнивания, что приводит к низкой производительности труда на этих операциях.

Известны также и другие способы и устройства для укладки и разравнивания абразивной массы [18]. Однако, все они отличаются или сложностью конструкции или низким качеством разравнивания.

Прессование заготовок абразивных кругов на керамических связках

Способы и устройства для получения изделий путем одностороннего прессования порошков металлов и неметаллов, а также порошковых композиций, были известны гораздо раньше, еще в начале XIX века. Так, русские инженеры П.Г. Соболевский и В.В. Любарский провели первые исследования и

организовали промышленное производство монет из порошка платины еще в 1826 году [21]. Этот год считается официально годом рождения науки и практики порошковой металлургии и технологии производства изделий из металлических порошков способом одностороннего прессования на устройстве, содержащем матрицу и пуансон. Именно этим способом и на таком устройстве многие годы в России получали платиновые монеты [22].

С середины прошлого века основным способом прессования заготовок абразивного инструмента на керамических связках стал способ прессования полусухих смесей, содержащих от 3 до 8 % увлажнителя, в закрытых пресс-формах [15].

Прессование заготовок абразивных кругов в закрытых пресс-формах позволяет получить из качественных исходных смесей их заданную плотность и структуру. Однако, согласно действующей НТД абразивных предприятий России, перед прессованием исходные смеси проверяются только на наличие посторонних предметов и на влажность. Причем влажность проверяется во многих случаях органолептическим способом. Другие, такие важные для порошковой технологии способы проверки качества исходных смесей, как насыпная плотность, уплотняемость и формуемость, вообще не проводятся, что не может не сказаться на качестве готового инструмента.

Изменение объема исходной абразивной смеси при прессовании из нее заготовок обычно [16] характеризуется коэффициентом прессования $k_{\text{п}}$, равным отношению высоты исходной смеси $h_{\text{с}}$ в пресс-форме к высоте заготовки $h_{\text{з}}$ после прессования. Значения коэффициента прессования, как показывает производственная практика, изменяются в широких пределах. Минимальные значения, в пределах от 1,6 до 1,8, коэффициент $k_{\text{п}}$ имеет при прессовании крупнозернистых смесей и максимальные значения, в пределах от 2,5 до 2,8, при прессовании мелкозернистых смесей. Кроме того, на значения коэффициента прессования оказывает влияние вид и марка шлифовального материала, состав и количество керамической связки в формовочной смеси. Представляет интерес

зависимость характера изменения коэффициента прессования k_n от изменения величины удельного давления прессования [17].

Характер кривой $k_n - p$ на рисунке 4 показывает, что на первой стадии прессования, например до значений k_n , равных 1,4 и даже 1,2, нарастание удельного давления прессования незначительно, резкое увеличение давления прессования (в 5 раз и более) наблюдается на второй стадии прессования, когда $k_n < 1,2$. Учитывая описанный характер кривой $k_n - p$ в процессе прессования заготовок, назначают кинематические условия прессования по стадиям: на первой стадии прессования скорость перемещения плунжера достаточно высока и находится в пределах 30-50 мм/с, а на второй стадии сравнительно низка и находится в пределах 2-4 мм/с. Конечно, при выборе значений кинематических параметров, надо учитывать свойства абразивных смесей и характеристики готового инструмента [15-30].

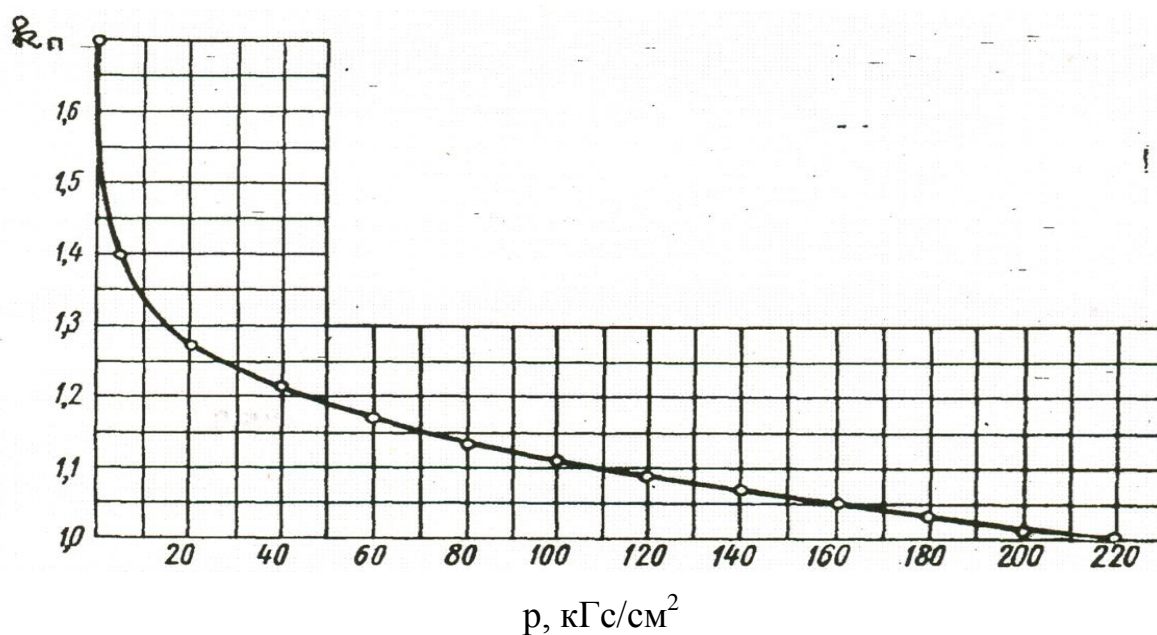


Рисунок 4 - Кривая изменения k_n крупнозернистой смеси в зависимости от удельного давления при прессовании

В настоящее время на предприятиях абразивной промышленности России используются варианты в основном одного способа прессования заготовок абразивных кругов на керамической связке средней ($h_3 > 10$ мм) и большой высоты ($h_3 > 50$ мм) прессование верхним пуансоном с последующей подпрессовкой нижним пуансоном, хотя для низких ($h_3 < 10$ мм) кругов часто применяют прессование только верхним пуансоном (одностороннее прессование).

Вариант способа прессования с подпрессовкой часто выполняется с помощью подкладок, которые убираются на второй стадии прессования, позволяя матрице перемещаться вниз, а нижней формовочной плите осуществлять подпрессовку заготовки [31]. Существенным недостатком этого варианта является увеличение продолжительности операции прессования и повышение трудоемкости способа прессования.

Вариант способа прессования с подпрессовкой, когда подвижность матрицы обеспечивается автоматически, смонтированными на ней пружинами сжатия, описан в работе [18].

Описанные варианты способов одностороннего верхнего прессования с последующей нижней подпрессовкой по сравнению с известным способом одностороннего прессования снижают неоднородности напряженного состояния и плотности по высоте прессовки, хотя полностью их не устраняют. Разноплотность, а стало быть, разнопрочность и другие различные по высоте кругов механические, физические и эксплуатационные свойства снижают качество абразивного инструмента и ограничивают его высоту, особенно это касается кругов, предназначенных для бесцентрового шлифования валов крупных размеров. Существенный недостаток способа прессования с подпрессовкой, как показали промышленные исследования на ЧАЗе, заключаются не только в разных величинах перемещений верхнего и нижнего пуансонов, а также в разных усилиях со стороны того и другого.

При максимальном усилии прессования перемещение прессуемой массы со стороны нижнего пуансона в три раза ниже перемещения массы со стороны верхнего пуансона. По этой причине физико-механические свойства частей

прессовки, примыкающих к верхнему и нижнему торцам заготовки будут разными по величине.

Устранить указанные недостатки верхнего прессования с нижней подпрессовкой может только использование двухстороннего прессования с одновременным и равным по величине перемещением верхнего и нижнего пуансонов. В абразивной промышленности России процесс двухстороннего прессования заготовок абразивных кругов в настоящее время не применяется.

Выталкивание заготовок из пресс-форм после прессования

На ранней стадии развития абразивного производства [15], когда сортамент изделий был невелик, а их масса мала, извлечение заготовок из пресс-форм осуществлялось вручную с помощью простых приспособлений. Так, пресс-форма вместе с заготовкой устанавливались на пустотелую подставку, с заготовки вручную сбивалась пресс-форма и выбивался сердечник. Затем верхняя формовочная плита заменялась плитой для сушки изделия. Полученные изделия требовали для извлечения больших затрат времени и труда, а операции сбивания пресс-формы и выбивания сердечника из заготовки приводили к снижению качества заготовок за счет возникновения многочисленных дефектов (сколов, макротрещин).

В последние годы извлечение заготовок из пресс-форм осуществляется в основном с помощью разного типа выталкивателей [16, 17]. Этот способ отличается повышенной производительностью, но требует достаточно сложного и громоздкого выталкивающего устройства. Кроме того, этот способ выталкивания заготовок из пресс-форм в плоскости выхода заготовок из пресс-форм отличается резкой сменой схем напряженно-деформированного состояния, а также знаков векторов напряжений и деформаций. Такая схема НДС материала заготовки приводит к ее разрыхлению и возникновению дефектов чаще всего в виде расслоений. Именно операция выталкивания является одной из причин,

ограничения максимальной высоты получаемых абразивных кругов и малого выхода годных кругов.

1.3 Состояние производства абразивного инструмента на керамических связках в мире

Американская фирма NORTON, на сегодняшний день входящая в SAINT-GOBAIN, основанная в 1885 году - была первой и в настоящее время является крупнейшей фирмой в мире, как по производству абразивных материалов, так и по выпуску готового инструмента. Номенклатура выпускаемого абразивного инструмента превышает 300 000 наименований изделий [32, 33]. Внешний вид некоторых типов инструмента, выпускаемых фирмой NORTON [36], показан на рисунке 5.



Рисунок 5 - Внешний вид шлифовальных кругов, выпускаемых фирмой NORTON

Первые предприятия, производящие абразивный инструмент из искусственных материалов, появились в Европе в начале XX века. В настоящее время самыми крупными европейскими фирмами являются: австрийская фирма TIROLIT [37], английская фирма UNICORN ABRASIVES [38], немецкие фирмы PFERD, NAXOS-UNION, EFESIS и SAIT [34-43], итальянские фирмы GRANDINETTI и MOLEMAB[44 - 45] и др.

Абразивный инструмент производится в Европе также фирмами Испании, Венгрии, Румынии и других стран.

В Канаде, Бразилии, Аргентине, Индии, Японии, Норвегии и в других странах мира абразивные предприятия еще в прошлом веке были созданы американской фирмой NORTON.

В австрийскую группу фирм TIROLIT, кроме крупного завода в Тироле, входят предприятия, расположенные в Италии (2 завода), Аргентине (2 завода), заводы в США, Мексике и Испании. Первый завод в Тироле был построен в 1919 году, а в настоящее время группа фирм TIROLIT выпускает более 80 000 типоразмеров абразивного инструмента. При производстве инструмента фирма уделяет внимание не только типу абразивного зерна, его физико-механическим свойствам, но и размерам и форме зерна.

TIROLIT первой в Европе среди производителей абразивного инструмента получила международный сертификат управления качеством продукции. Серьезное внимание фирма уделяет развитию международной системы маркетинга своей продукции. Эта система включает в себя торговые фирмы и представительства по всему миру, сеть торговых агентов и дилеров.

Авторитет TIROLIT поддерживается высоким уровнем технологии производства, организационными, экономическими мерами, высоким качеством продукции, сервисным обслуживанием и большим объемом научных исследований. Технический уровень производства отличается широким внедрением автоматических линий для получения абразивного инструмента. Контроль качества предусматривает проверку не только механических свойств и

уравновешенности изделий, но и установление структуры, и обнаружение дефектов путем применения рентгенографии, микроскопов, в том числе сканирующих. Научные исследования направлены в основном на разработку новых видов абразивного инструмента, улучшение качества существующего инструмента (например, шлифовальных кругов до скоростей шлифования 160 м/с), отрезных кругов до скоростей 180 и более м/с, нового абразивного инструмента для обработки природного камня, строительных материалов, черепицы, стекла, дерева, пластмасс и других неметаллических материалов [37]. В качестве примера на рисунке 6 показаны круги фирмы TIROLIT типа 1.



Рисунок 6 - Круги фирмы TIROLIT типа 1 для заточки инструмента

Английская фирма UNICORN ABRASIVES - одна из крупнейших Великобритании, производящих абразивные инструменты. Фирма входит в группу UNICORN INTERNATIONAL PLC - крупнейшего производителя

абразивного инструмента среди 20 ведущих фирм мира. Среди других фирм, входящих в группу UNICORN INTERNATIONAL PLC, можно назвать такие фирмы Великобритании, как UNIVERSAL GRINDINGWHEEL COMPANY, TOYODA VAN MOPPEL LTD, ENGLISH ABRASIVES AND CHEMICALS, а также фирмы США, Канады, Швеции, Бельгии, Германии, Франции, Японии и других стран. Фирма UNICORN ABRASIVES производит более 35 000 наименований всевозможных типов абразивного инструмента. Среди потребителей этой фирмы в основном предприятия автомобильной промышленности, авиакосмической техники и машиностроения.

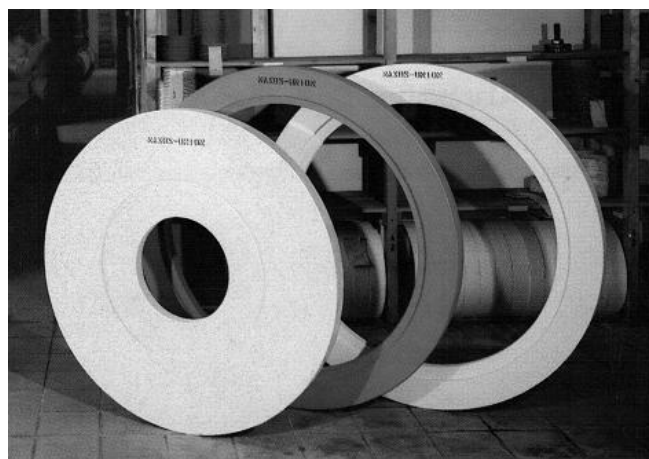
Немецкие фирмы PFERD, REICK, NAXOS-UNION - это старейшие производители инструмента, в том числе и абразивного, в Европе. В состав фирм входят предприятия, расположенные в Германии, а также в США, Швейцарии, Австрии, Италии, Южной Африке, Индии, Испании и других странах. Абразивный инструмент (шлифовальные и полировальные круги, шлифовальные головки и другой инструмент) соответствует международному сертификату качества.

В качестве абразивного материала фирмы используют разные марки электрокорунда, карбида кремния и их смеси. Связками служат керамика, органические порошки.

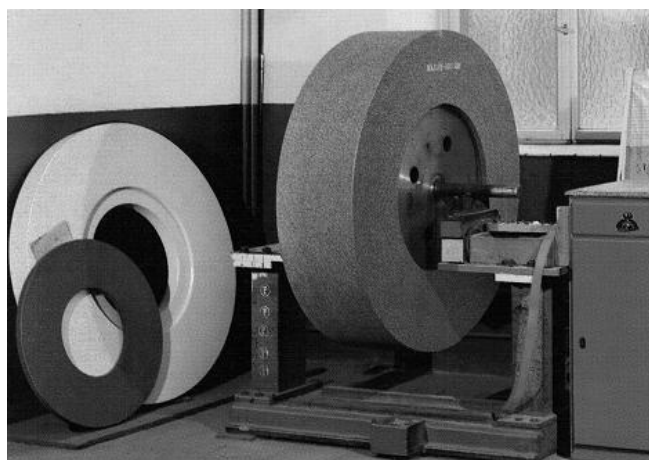
Абразивный шлифовальный и другой инструмент на керамических связках используется для обработки чугунов, сталей, цветных металлов, изделий из камня, бетона, керамики и других материалов на скоростях 50, 63, 80 и 100 м/с. На рисунке 7 показаны крупные шлифовальные круги фирмы NAXOS-UNION. Фирма EFESIS одна из немногих в Европе создает новые абразивные материалы и новые составы керамических связок. Так, фирмой EFESIS разработана новая марка электрокорунда, имеющая по сравнению с нормальным электрокорундом более высокую твердость и меньшую хрупкость. Отличающаяся от обычного электрокорунда микроструктура нового материала обеспечивает повышенную режущую способность абразивного инструмента.

Фирма SAIT основана в 1953 году и является ведущей фирмой не только в Италии, но и в Европе. Ее предприятия расположены в Италии (несколько современных предприятий), Великобритании, США, Канаде и Испании.

В Италии также имеются достаточно крупные фирмы, производящие абразивные инструменты. Так, фирмы GRANDINETTI и MOLEMAV уже более 30 лет производят абразивные круги разного типа с керамической связкой. В качестве абразивного материала для шлифовального инструмента с керамической связкой используются электрокорунд и карбид кремния разных марок. Шлифовальный инструмент с керамической связкой предназначен для работы на максимальной скорости 33 м/с и 45 м/с.



а)



б)

Рисунок 7 - Шлифовальные круги фирмы NAXOS-UNION [34]:

а - для шлифования крупных коленчатых валов;

б - для шлифования крупных валов

В последнее десятилетие в Европе создан самый крупный концерн SAINT-GOBAIN - производитель абразивного инструмента высочайшего качества [46].

Китай является крупнейшим производителем абразивных материалов в мире. В последние годы Китай по абразивным материалам занял рынки Америки, Японии, Европы и Азии [47-52]. Однако качество китайского инструмента остается низким.

Таким образом, краткая информация о ведущих производителях абразивного инструмента США и Европы позволяет сделать следующие выводы. В качестве абразивных материалов используются электрокорунды, карбид кремния и кубический нитрид бора. Наиболее широко в качестве шлифовального абразивного материала применяют различные марки электрокорунда (нормального, белого, легированного, циркониевого, монокорунда, сферокорунда, специального электрокорунда), а также их смеси. Например, фирма EFESIS использует 22 марки электрокорундов, а также смесей электрокорундов разных марок и смесей электрокорундов с карбидом кремния.

Разработано и применяется большое количество марок связок на основе керамики.

Абразивный инструмент отличается широким сортаментом и применяется в широком диапазоне скоростей шлифования (от 33 до 100 м/с и более) [53].

1.4 Выводы по главе

1. Рассмотрено общее состояние абразивного производства России, начиная с 1917 года, когда Златоустовский механический завод выпустил свой первый абразивный инструмент, и заканчивая последними годами, когда самыми крупными производителями абразивного инструмента на керамической связке в России стали ЛАЗ, ВАЗ, ЧАЗ, БАЗ и ПАЗИ. Отмечен вклад ученых России в области производства абразивного инструмента (В.Н. Любомудров, В.Н. Бакуль, А.С. Гуревич и В.А. Рыбаков и др.), которые в своих трудах описали технологию,

оснастку и оборудование для получения абразивного инструмента на керамической связке, применявшиеся на предприятиях в 50-70 годы XX века и применяемые на многих предприятиях и в настоящее время.

2. Дана оценка основным операциям, связанным с формованием заготовок инструмента путем прессования. Первой операцией является операция укладки и разравнивания смесей в пресс-формах. Анализ известных способов и устройств для выполнения этой операции показал, что они отличаются малой производительностью, низким качеством разравнивания и сложностью конструкций известных устройств. Прессование заготовок на отечественных предприятиях осуществляется преимущественно одним способом - способом прессования верхним пуансоном с последующей подпрессовкой нижним пуансоном. Поскольку обжиг смеси со стороны верхнего и нижнего пуансонов разные, то и полученные заготовки отличаются разноплотностью по высоте. Это приводит к разнотвердости, разнопрочности и неоднородности физико-механических свойств инструмента.

3. На основе изучения научно-технической документации и технической информации зарубежных фирм установлено состояние производства абразивного инструмента на ведущих фирмах.

Высокие технические характеристики абразивного инструмента американских и европейских фирм отвечают международным (ISO) и европейским (FEPA) стандартам. Например, характеристики инструмента фирма TIROLIT поддерживает высоким уровнем производства, экономическими мерами и большим объемом научных исследований. Выражается это в том, что у инструмента большие рабочие скорости, высокий класс уравнишенности, что подразумевает собой стабильные и одинаковые физические свойства материала по всему телу инструмента. Самые высокие характеристики инструмента обеспечивает недавно открытый в Европе концерн SAINT-GOBAIN.

Крупнейшим производителем абразивных материалов в мире является Китай. Благодаря низкой цене Китай уже занял основные рынки Америки, Японии, Европы и Азии.

4. Кроме того, необходимо повышать качественные характеристики производимого инструмента, как то: рабочая скорость круга, класс точности, класс неуравновешенности, поскольку, уходя от низкокачественных кругов в производстве, и совсем, исключая их, повышается конкурентоспособность выпускающего предприятия.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

2.1 Анализ влияния размеров засыпок в пресс-формах на выбор способов для прессования

В технологии изготовления абразивных кругов наиболее важными и ответственными являются операции, связанные с получением из абразивных смесей заготовок (формовок). Основной операцией среди всех, указанных в технологии является формование, осуществляемое путем прессования абразивной смеси в закрытой пресс-форме. Именно операция прессования определяет точность формы и размеров изделий, заданную плотность и характер ее распределения по сечению и высоте прессовки, возможность ее дальнейшей транспортировки и термической обработки [15, 16, 54-56].

Кроме того, операция прессования должна обеспечить заданные прочность, твердость, структуру и равномерность их распределения в объеме готового абразивного инструмента.

Размеры кольцевых заготовок и получаемых из них абразивных кругов типа 1, регламентируемых ГОСТ 2424-83, меняются в широких пределах: наружный диаметр D - от 3 до 1060мм, внутренний диаметр H - от 1 до 305 мм, высота круга T - от 1 до 250мм и толщина стенки S , равная $(D-H)/2$ - от 1 до 377,5 мм (ГОСТ 2424-83). При получении заготовок и готовых кругов необходимо обращать внимание на точность их размеров, оговариваемую НТД (ГОСТ 2424-83).

Выбор того или иного способа и устройства для прессования кольцевых заготовок абразивных кругов зависит, прежде всего, от соотношения геометрических размеров насыпки исходной абразивной смеси в пресс-форме, от величины обжатия и характера прессования смеси, а также от соотношения размеров спрессованной заготовки.

К наиболее важным соотношениям геометрических размеров заготовок и исходных насыпок смесей в пресс-форме относятся: отношение высоты заготовки

T_3 к ее наружному диаметру D_3 , отношение толщины стенки заготовки S к высоте заготовки T_3 ; отношение высоты насыпки порошковой смеси в пресс-форму T_n к диаметру заготовки D_3 , который равен диаметру насыпанной в матрицу порошковой абразивной смеси, отношение толщины стенки насыпки S к высоте насыпки T_n .

Если размеры заготовок считать близкими к размерам готовых кругов, то в соответствии с ГОСТ 2424-83 указанные отношения для прессованных заготовок находятся в пределах:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{T_3}{D_3}\right)_{\max} &= 3; \left(\frac{T_3}{D_3}\right)_{\min} = 0,01; \\ \left(\frac{S}{T_3}\right)_{\max} &= 50; \left(\frac{S}{T_3}\right)_{\min} = 0,10. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Процесс прессования из абразивных смесей заготовок можно характеризовать абсолютным, равным $\Delta T = T_n - T_3$, и относительным, равным $\varepsilon = \Delta T / T_n$, обжатиями. Из практики абразивного производства известно, что отношения T_n / T_3 и относительные обжатия находятся в следующих пределах: при прессовании крупнозернистых смесей $T_n / T_3 = 1,6 \dots 1,8$, $\varepsilon = 35 \dots 45\%$, при прессовании мелкозернистых смесей $T_n / T_3 = 2,5 \dots 2,8$, $\varepsilon = 60 \dots 65\%$.

Анализ указанных значений отношений T_n / T_3 и относительных обжатий позволяет установить предельные значения отношений T_n / D_3 и S / T_n при прессовании:

а) крупнозернистых смесей

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{T_n}{D_3}\right)_{\max} &= 6; \left(\frac{T_n}{D_3}\right)_{\min} = 0,02; \\ \left(\frac{S}{T_n}\right)_{\max} &= 30; \left(\frac{S}{T_n}\right)_{\min} = 0,06; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

б) мелкозернистых смесей

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{T_n}{D_3}\right)_{\max}=9; \left(\frac{T_n}{D_3}\right)_{\min}=0,02; \\ \left(\frac{S}{T_n}\right)_{\max}=20; \left(\frac{S}{T_n}\right)_{\min}=0,03. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Согласно работе [55], насыпки порошковых смесей в пресс-формах $T_n/D_3 < 0,3 \dots 0,4$ относятся к низким, с отношением $0,3 \dots 0,4 < T_n/D_3 < 1,5 \dots 2,0$ - к насыпкам умеренной высоты и с отношением $T_n/D_3 > 2 \dots 3$ - к высоким. Насыпки заготовок с отношением $S/T_n < 0,5$ относятся к тонкостенным, а с отношением $S/T_n > 0,5$ - к толстостенным.

Из отношений (2) и (3) видно, что исходные насыпки заготовок из крупнозернистых и мелкозернистых смесей относятся не только к низким насыпкам заготовкам, но и к особо низким, когда $T_n/D_3 < 0,1$, насыпкам заготовок умеренной высоты, к высоким и особо высоким насыпкам заготовок, когда $T_n/D_3 > 5$.

По толщине стенок кольцевые исходные насыпки заготовки из крупнозернистых и мелкозернистых смесей относятся к тонкостенным и толстостенным, а также к особо тонкостенным, когда $S/T_n < 0,1$ и особо толстостенным, когда $S/T_n > 10$.

Для прессования особо низких, низких и частично исходных заготовок умеренной высоты из крупнозернистых и мелкозернистых абразивных смесей применимы способы и устройства для одностороннего прессования. Схемы способов одностороннего прессования в пресс-формах с неподвижными матрицами и с заданными обжатиями показаны на рисунке 8 а и б.

Как видно из рисунка 8, пресс-форма состоит из неподвижной матрицы 1, подвижной верхней формовочной плиты 2, неподвижной нижней формовочной плиты 3, пуансона 4 заданной высоты, равной абсолютному обжатию смеси ΔT , неподвижной оправки 5. Пресс-форма, показанная на рис. 8а, позволяет при использовании пуансона одной высоты получать заготовки 6 также одной высоты.

Для изменения абсолютного обжатия смеси необходимо применять пуансоны равных высот. Кроме того, высоту заготовок можно регулировать за счет использования подкладных колец 7 разной высоты. Рассматриваемые способы прессования, осуществляемые за счет перемещения верхней формовочной плиты и пуансона, соответствуют варианту прессования с заданным абсолютным обжатием. Существенным недостатком этих способов прессования является необходимость в большом парке сменных пуансонов разных размеров, которая устраняется при прессовании по варианту заданного усилия прессования, когда пуансон большой высоты крепится, например, на верхней поперечине гидравлического пресса. В этом случае абсолютное обжатие соответствует ходу пуансона и поперечины пресса.

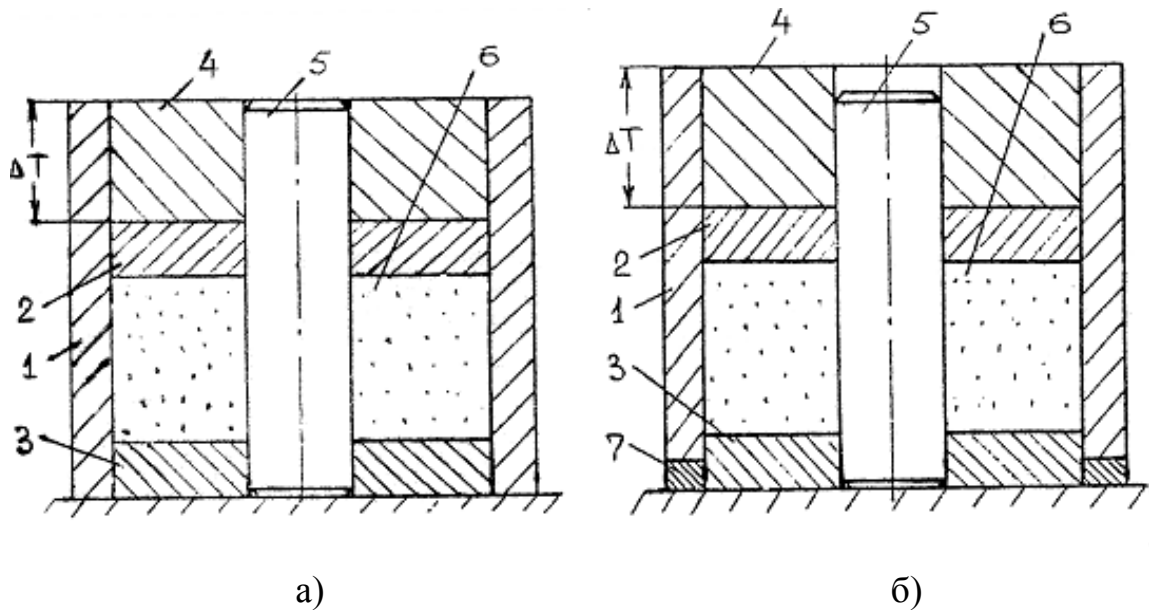


Рисунок 8 - Схемы способов одностороннего прессования в пресс-формах с неподвижными матрицами и с заданными обжатиями:

а) заготовок одной высоты; б) заготовок разной высоты
при сменных пуансонах 4 и кольцах 7

Способ одностороннего прессования с неподвижной матрицей (рисунок 9а) можно проиллюстрировать диаграммами нагружения (рисунок 9б) и изменения плотности (рисунок 9в) формовки в процессе прессования абразивной смеси с

абсолютным обжатием ΔT . Максимальное усилие формования $R_{фв}$ прикладывается к верхней формовочной плите, усилие на нижней формовочной плите $R_{фн}$ будет значительно ниже $R_{фв}$ за счет потерь на трение смеси о стенки матрицы и о поверхность оправки. Поэтому плотность $\rho_{фв}$ будет максимальной на верхней торцевой поверхности формовки и минимальной $\rho_{фн}$ на нижней торцевой поверхности формовки.

Однако способами одностороннего прессования в пресс-формах с неподвижными матрицами невозможно получить однородную плотность формовок, как по сечению, так и по высоте. Разноплотность по объему заготовок приводит к их разнопрочности, готовые абразивные круги, полученные из этих заготовок, будут также разноплотными и разнопрочными, разнотвердыми и разноструктурными.

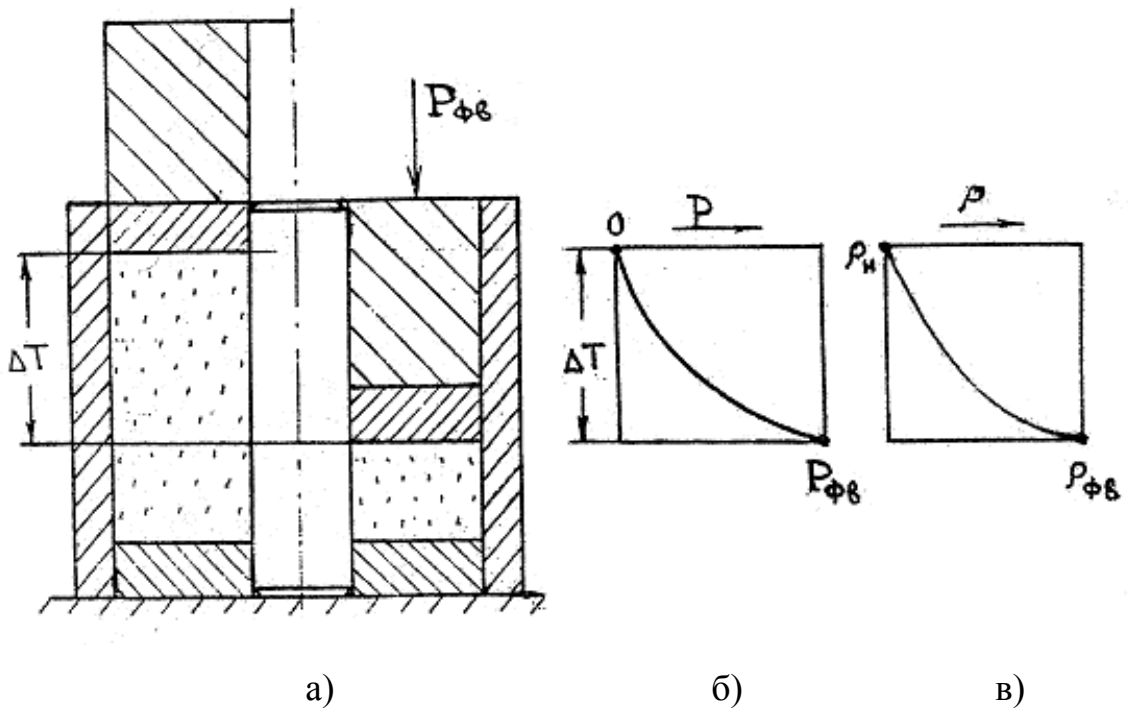


Рисунок 9 - Схема одностороннего прессования (а) и диаграммы изменения усилий (б) и плотности (в)

Основными причинами возникновения разноплотности и разнопрочности при рассмотренных вариантах одностороннего прессования являются

неоднородные напряженное и деформированное состояние прессовок, возникающие вследствие сил трения на поверхностях контакта абразивной смеси с матрицей, верхней и нижней формовочными плитами и оправкой. Кроме того, на разноплотность и разнопрочность прессованных заготовок влияют кинематические и силовые условия взаимодействия прессовок с матрицей и оправкой, а также различные условия взаимодействия с поверхностями верхней и нижней формовочными плитами.

О характере неравномерности распределения плотности по сечению и высоте заготовки абразивного круга можно судить на примере распределения плотности по сечению и высоте цилиндрического брикета, полученного при одностороннем прессовании порошка никеля [57].

Для заготовки с отношением $T_3/D_3 = 0,875$, которую можно отнести к заготовкам умеренной высоты, разноплотность по диаметру заготовки составляет 9%, а по высоте заготовки превышает 12 %. Увеличение отношения T_3/D_3 до 1,5 и более повышает разноплотность по высоте заготовки до 20 % и более. Из таких заготовок невозможно получить абразивные круги требуемого качества. Исходные абразивные смеси умеренной высоты, когда $T_3/D_3 > 1$, прессуют по способу одностороннего (верхнего) прессования с (нижней) подпрессовкой. Для осуществления этого способа прессования используют пресс-формы с подвижной матрицей. На рисунке 10 приведена схема способа одностороннего прессования с подвижной матрицей и с подпрессовкой, а также показана пресс-форма, содержащая матрицу 1, верхнюю и нижнюю формовочные плиты 2 и 3, пуансон 4, оправку 5 и упоры 7. На рисунке 10а показана первая стадия одностороннего прессования заготовки 6 верхней плитой 2, когда матрица 1 неподвижна и установлена на упоры 7. После завершения этой стадии упоры убираются и подпрессовка (рисунок 10,б) выполняется за счет взаимодействия заготовки 6 с нижней неподвижной формовочной плитой 3 путем перемещения матрицы вместе с заготовкой вниз.

Принципиальное отличие одностороннего прессования с подпрессовкой от одностороннего прессования заключается в том, что процесс прессования

выполняется последовательно в две стадии: на первой стадии выполняется одностороннее прессование с обжатием $\Delta T_{\text{в}}$ абразивной смеси верхней формовочной плитой; на второй стадии осуществляется также одностороннее прессование (подпрессовка) полученной прессовки с обжатием $\Delta T_{\text{н}}$ нижней формовочной плитой при перемещении матрицы вместе с прессовкой вниз.

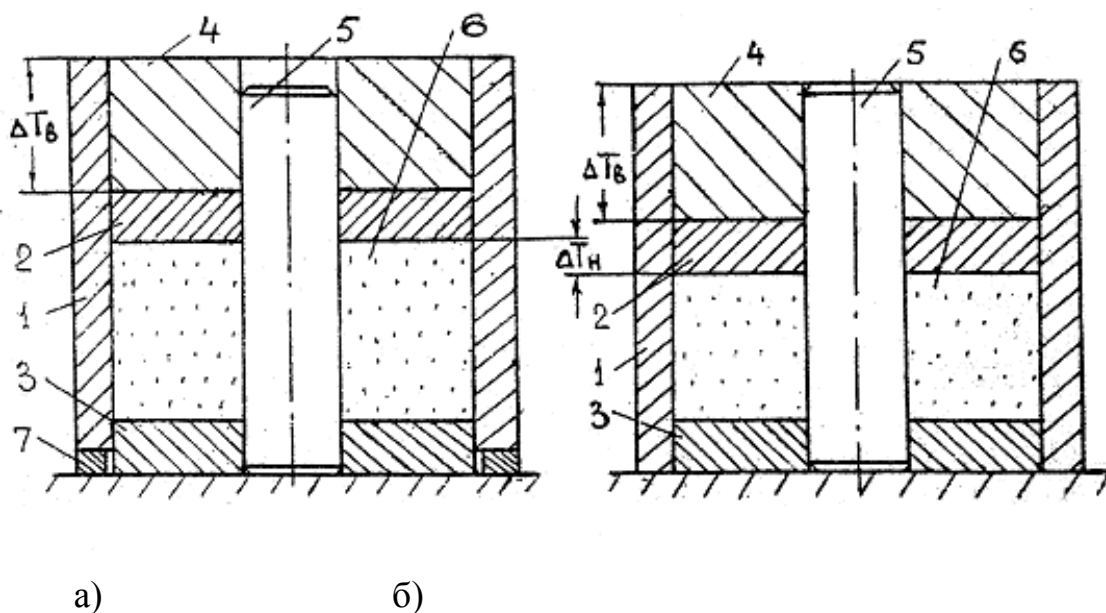


Рисунок 10 - Схема одностороннего прессования с подвижной матрицей и подпрессовкой:

- а) одностороннее прессование верхней формовочной плитой при неподвижной матрице;
- б) подпрессовка за счет взаимодействия заготовки с нижней формовочной плитой при подвижной матрице

Подпрессовка в некоторой степени снижает неравномерность распределения плотности и прочности заготовки абразивного круга по высоте. Однако с применением сменных упоров при одностороннем прессовании с подпрессовкой осуществляется процесс прессования в две стадии с остановкой процесса для снятия упоров. Установка и снятие упоров снижают производительность прессования, и, кроме того, при таком варианте прессования требуется большое количество сменных упоров.

Известен другой вариант способа одностороннего прессования с подпрессовкой, при котором подвижность матрицы обеспечивается упругими элементами (пружинами). Схема способа одностороннего прессования подпружиненной матрицей и с подпрессовкой, а также пресс-форма показаны на рисунке 11.

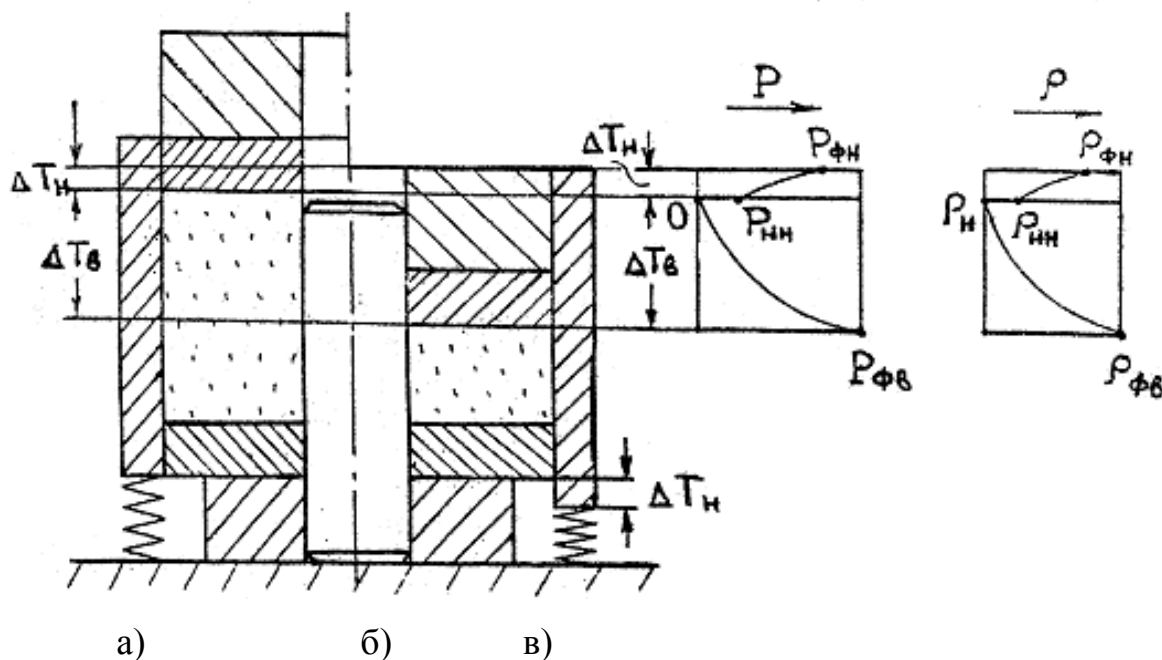


Рисунок 11 - Схема одностороннего прессования с подпружиненной матрицей и подпрессовкой:

- а) исходное (левая часть) и конечное (правая часть) состояния пресс-формы;
- б) кривые изменения усилий на верхней P_{fv} и нижней P_{fn} формовочных плитах;
- в) кривые плотностей заготовки на контактах с верхней ρ_{fv} и нижней ρ_{fn} формовочными плитами

Из рисунка 11а следует, что одностороннее прессование верхней формовочной плитой с обжатием ΔT_b частично совмещается с подпрессовкой нижней формовочной плитой с обжатием ΔT_n при перемещении матрицы вместе с прессовкой вниз на величину ΔT_n . В конце процесса прессования на поверхности контакта верхней плиты с заготовкой достигается максимальное усилие, равное P_{fv} (рисунок 11,б), обеспечивающее максимальную плотность заготовки, равную

$\rho_{фв}$ (рисунок 11,в). Подпрессовка нижней формовочной плитой заготовки выполняется с усилием, равным $P_{фн}$, которое значительно ниже усилия $P_{фв}$ вследствие потерь на трение на поверхностях контакта заготовки с матрицей и оправкой. Кроме того, обжатие ΔT_n заготовки нижней формовочной плитой в несколько раз ниже обжатия ΔT_v верхней формовочной плитой. По этим причинам плотность $\rho_{фн}$ нижней торцевой поверхности заготовки будет значительно ниже плотности $\rho_{фв}$. Конструкция устройства прессования с подпружиненной матрицей (см. рисунок 11,а), предназначенного для получения заготовок в основном средней высоты, не может обеспечить равных ($\Delta T_v = \Delta T_n$) обжатий со стороны верхней и нижней формовочных плит, а также одновременного начала перемещения верхней формовочной плиты и матрицы. В результате на устройстве не удастся осуществить двухстороннее прессование.

Для устранения указанных недостатков необходимо использовать двухстороннее прессование с одновременным началом движения и равным перемещением верхней и нижней формовочных плит. Принципиальная схема двустороннего прессования известна (см. рисунок 12), но для ее осуществления требуются пресса специальной конструкции.

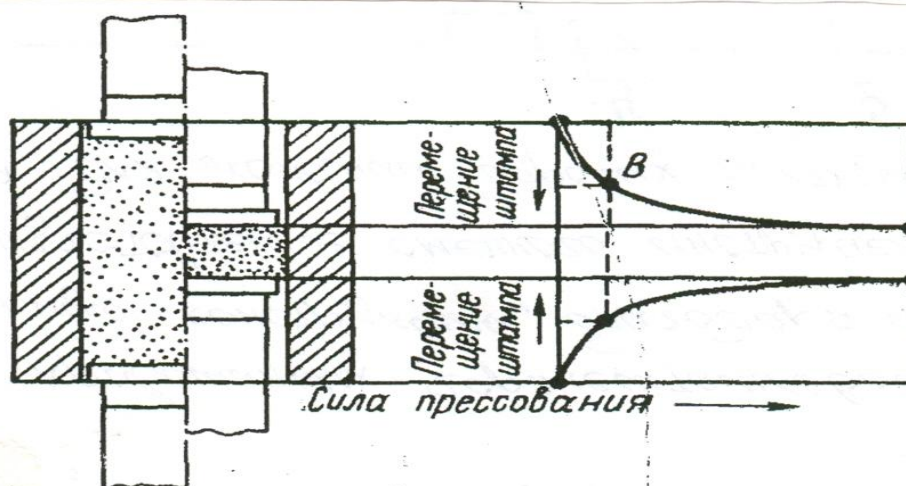


Рисунок 12 - Схема двухстороннего прессования

Описанные способы и устройства для прессования заготовок абразивных кругов не обеспечивают нужного качества полученных из них абразивных изделий.

Одной из задач диссертации является разработка на уровне изобретения конструкции устройства, установка которого на прессах общего назначения только с верхним подвижным пуансоном позволяет выполнить процесс двухстороннего прессования.

2.2 Научный анализ исследований процессов прессования заготовок абразивных кругов на керамических связках

Процесс изготовления абразивного инструмента, как показано на схеме рис. 5, включает целый ряд основных операций, существенно влияющих на качество инструмента.

Среди этих основных операций наиболее важной является операция прессования, определяющая характеристику абразивного инструмента.

2.2.1 Характеристика абразивного инструмента и ее связь с параметрами исходной смеси и прессования из нее заготовок

Как известно [4, 58], в характеристику, определяющую физико-механические и эксплуатационные свойства абразивного инструмента, кроме типа и размеров, входят марка и зернистость шлифовального материала, марка связки, степень твердости, номер структуры и скорость при эксплуатации, например шлифовальных и полировальных кругов.

Наиболее широко применяемым типом абразивного инструмента, в соответствии с ГОСТ 24244-83, стандартами FEPA и ISO, является тип 1 с широким диапазоном размеров (ГОСТ 2424-83). Имеют применение и круги без отверстий, выпускаемые по специальным стандартам или ТУ [24] и

предназначенные для работы на повышенных скоростях (80 м/с и выше). Рабочие скорости шлифовальных кругов указаны в ГОСТ 2424-83.

Среди всех видов шлифовального зерна, известного в России, например выпускаемого в соответствии с ГОСТ 28818-90 и ГОСТ 26327-84, наиболее широкое применение на абразивных предприятиях имеет зерно белого электрокорунда марки 25А зернистостями от 50 до 10.

В понятие «твердость абразивных инструментов», в отличие от твердости изделий и деталей из металлов и сплавов, входит способность связки сопротивляться вырыванию абразивных зерен с поверхности инструмента под воздействием внешних сил [15, 59].

Твердость абразивных инструментов зависит от многих факторов, в первую очередь от соотношения масс шлифовального материала и связки, а также от параметров прессования и термической обработки.

Более подробно факторы, характеризующие абразивную смесь и технологию изготовления шлифовальных изделий, приведены, расшифрованы и указаны на рисунке 13. Следует также отметить, что кроме факторов, указанных на рисунке 13, существенное влияние на твердость оказывает структура круга, т.е. объемное содержание в инструменте зерна, связки и пор: $V_z + V_{св} + V_{пор}$ (см. таблицу 1).

Изменить твердость при той же структуре можно, увеличивая или уменьшая количество связки, либо используя разные по составу и свойствам керамические связки [60]. В отечественной практике производства абразивных кругов для изменения заданной твердости чаще пользуются приемом варьирования массы связки, работая на одной - двух связках. Чем выше твердость круга, тем больше в состав формовочной массы входит связки, при этом, как правило, для рецептов одной структуры снижается только пористость изделия.

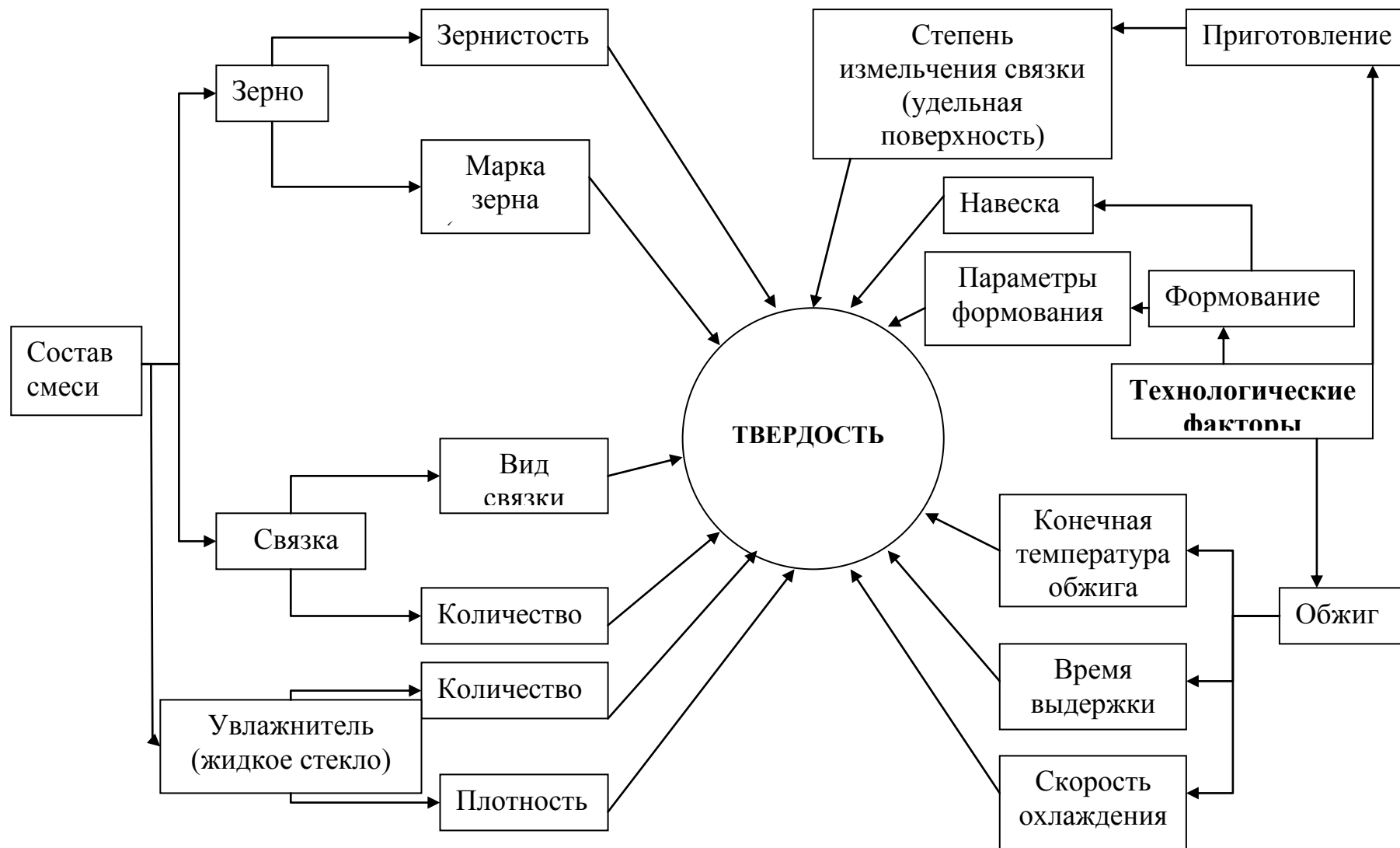


Рисунок 13 - Схема факторов, влияющих на твердость шлифовальных изделий [47]

Таблица 1 - Связь объемов связки, зерна и пор со степенью твердости и структурой абразивного инструмента

№ струк- туры	Объем зерна, %	Степень твердости инструмента																	
		BM1	BM2	M1	M2	M3	CM1	CM2	C1	C2	CT1	CT2	CT3	T1	T2	BT1	BT2	CT1	CT2
		Объем пор, %																	
		49,5	48,0	46,5	45,0	43,5	42,0	40,5	39,0	37,5	36,0	34,5	33,0	31,5	30,0	28,5	27,0	25,5	24,0
		Объем связки в инструментах, %																	
0	62	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	2	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14
1	60	-	-	-	-	-	-	-	1	2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16
2	58	-	-	-	-	-	-	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18
3	56	-	-	-	-	0,5	2	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20
4	54	-	-	-	1	2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22
5	52	-	-	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24
6	50	0,5	2	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26
7	48	2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26,5	28
8	46	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24	25,5	27	28,5	30
9	44	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26	27,5	29	30,5	32
10	42	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26,5	28	29,5	31	32,5	34
11	40	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24	25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5	36
12	38	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26	27,5	29	30,5	32	33,5	35	36,5	38

В зарубежной практике для обеспечения той или иной степени твердости готового круга чаще используют связки с разной огнеупорностью и химическим составом при неизменной их массе в рецепте.

В любом случае очень важно, чтобы связка обладала стабильными свойствами, что должно достигаться в процессе ее изготовления. При использовании более тонкодисперсной, то есть более однородной связки при прочих равных условиях твердость изделия возрастает на 1-2 степени [60].

Особо следует остановиться на контроле твердости готовых абразивных изделий, так как величина твердости зависит и от метода измерения.

Контроль твердости кругов на керамических связках на практике осуществляется в основном двумя способами: пескоструйным способом по ГОСТ 18118 и способом вдавливания шарика прибором Роквелла по ГОСТ 19202, используемым для мелкозернистых кругов зернистостью 12Н и мельче и кругов высотой менее 8 мм. Оба способа основаны на принципе определения прочности удерживания зерна связкой в некоторой локальной области поверхности абразивного изделия при внешнем воздействии по величине глубины лунок.

Кроме того, ГОСТ 2424-83 «Круги шлифовальные» допускает контроль твердости инструмента акустическим способом по ГОСТ 25961.

Акустический способ является неразрушающим способом контроля и основан на определении приведенной скорости распространения акустических волн (по результатам измерения частот собственных свободных или вынужденных колебаний) по ГОСТ 25961 или расчете скорости распространения звука (импульса) прямым измерением времени прохождения звука через определенную высоту (слой) материала при использовании ультразвукового импульсного метода.

Структура абразивного инструмента, как уже отмечено, характеризуется соотношением объемов шлифовального материала, связки и пор. Структура должна быть задана перед изготовлением инструмента. При содержании в инструменте от 56 до 62 % зерна и связки от 0,5 до 20 % структуры обозначают номерами от № 0 до № 3 и называют плотными, хотя в них содержится пор от

24,0 до 43,5 %. При объемах зерна от 46 до 54 %, связки от 1 до 30 % и пор от 24,0 до 49,5 % структуры с номерами от № 4 до № 8 называют открытыми. Структуры с номерами от № 9 до № 12 называют высокопористыми (рисунок 14). Объем пор в высокопористых кругах достигает 75 %. По своим размерам поры могут быть больше, чем абразивное зерно.

Структура, также как и твердость абразивного инструмента, зависит от соотношения масс шлифовального материала и связки, параметров прессования и термообработки.

Следует отметить, что на структуру существенно влияет зернистость и форма зерен шлифовального материала, а также химический состав и вид связки (плавящаяся или спекающаяся), как это показано на рисунке 13.

К параметрам прессования порошковых материалов, как известно [61], относятся геометрические, кинематические и энергосиловые условия взаимодействия порошковой смеси со стенками матрицы пресс-формы, а также верхней и нижней прессующими плитами. Большое влияние на свойства и качество полученных в процессе прессования из порошковой смеси заготовок, кроме нормального давления со стороны стенок пресс-формы и прессующих плит, оказывают касательные силы или силы трения, а также коэффициент трения на поверхностях контакта смеси с элементами пресс-формы.

Впервые связь такого важного параметра прессования, как давление прессования, со свойствами полученных из порошковой смеси заготовок установил в своих работах еще в конце 30-х и начале 40-х годов прошлого века М.Ю. Бальшин. Результаты его экспериментальных исследований обобщены в монографии [61].

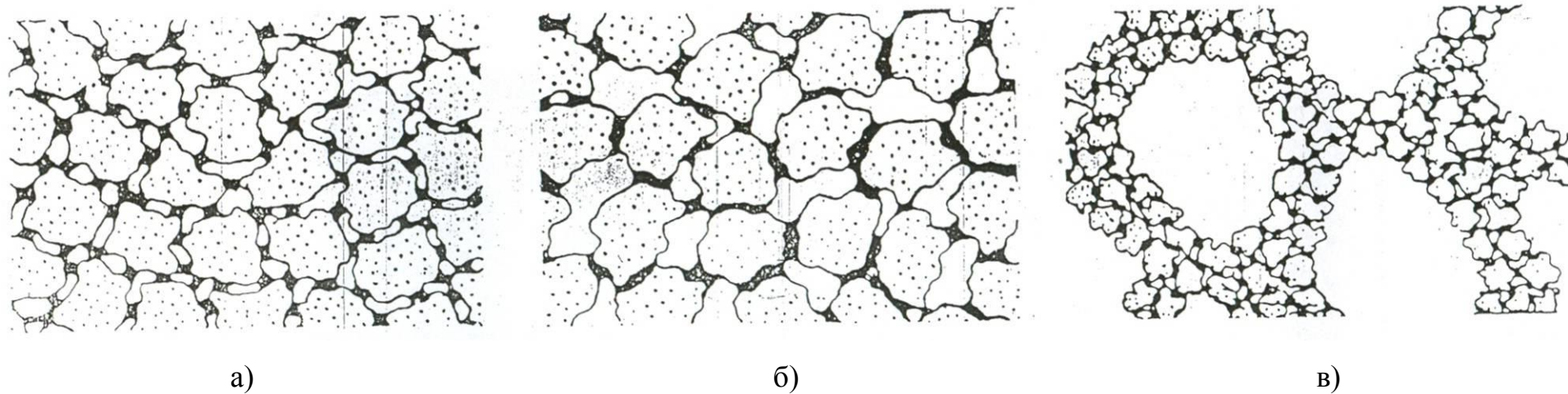


Рисунок 14 - Типы структуры абразивного инструмента: а) плотная; б) открытая; в) высокопористая

Давление прессования P М.Ю. Бальшин представляет состоящим из трех составляющих $P = P_1 + P_2 + P_3$. Здесь:

P_1 - составляющая давления без учета потерь на трение при равномерном распределении плотности в прессовке;

P_2 ($P_{тр}$) - составляющая давления, затраченная на трение порошковой смеси о стенки матрицы пресс - формы;

P_3 - составляющая давления, вызванного неравномерным распределением плотности в прессовке.

В монографии [61] представлены результаты исследований по связи твердости заготовок из металлических порошков от P . Эти исследования показывают, что при сравнительно небольших P его связь с твердостью является прямо пропорциональной.

Первые исследования по связи давления прессования с твердостью заготовок из абразивных смесей, выполненные в конце 40-х годов прошлого века рядом ученых под руководством В.Н. Любомудрова. Материалы этих исследований обобщены и опубликованы в 1953 году в монографии [15]. В результатах исследований установлено, что увеличение давления прессования ведет к повышению степени твердости абразивного инструмента. Конечно, к результатам этих исследований необходимо относиться с достаточной степенью критичности, поскольку абразивная промышленность России в 40-е годы прошлого века делала свои первые шаги. Однако исследования авторов, опубликованные в работе [59] в 2004 году, показали, что изменение давления прессования при получении заготовок мягких кругов на 15 кг/см^2 приводит к изменению твердости готового круга на 2-3 степени.

Так как структура и плотность заготовок абразивного инструмента тесно связаны, то параметры прессования, прежде всего, усилие прессования заготовок инструмента из абразивной смеси оказывает самое существенное влияние на структуру инструмента. Необходимо отметить, что исследований связи давления прессования с плотностью заготовки достаточно много в таких областях производства, как изделия из керамических порошков [60, 61], из порошковых

смесей на основе металлов и сплавов [62 - 65]. Но практически нет исследований в области производства абразивных изделий. В связи с этим необходимы дополнительные исследования связи параметров прессования с параметрами, характеризующими физико-механические свойства абразивного инструмента.

2.2.2 Экспериментальные исследования процесса прессования

Экспериментальные исследования выполнялись на опытном участке цеха №5 Челябинского абразивного завода. Цель исследований - получение данных об усилиях, возникающих при прессовании в отдельных элементах пресс-оснастки, в зависимости от прессуемой массы. Рецепт массы - стандартная для изготовления заготовок абразивных кругов на керамической связке цеха №5 Челябинского абразивного завода.

В качестве исходного абразивного материала использовался белый электрокорунд марки 25А по ГОСТ 28818-90 (в таблице №3 приведена их зернистость и химический состав) [66] как самый распространенный в использовании (порядка 70 %). Исследования выполнялись на корунде с самыми распространенными на предприятиях России зернистостями, равными 16, 25 и 40. А абразивные смеси со связкой марки К11 позволяли получать изделия с твердостями СМ1 - СМ2, С1, и СТ1. В результате исследований из навесок смеси заданной массы получали на опытном устройстве цилиндрические заготовки наружным диаметром 50 мм и высотами 10, 25 и 50 мм. Отношение высот заготовок T_z к их диаметру равно 0,2; 0,5 и 1,0. Отношение высоты насыпки исходной смеси в пресс-форме T_n к диаметру заготовки варьировалось в широких пределах.

Для повышения достоверности результатов для каждого типоразмера заготовки одной зернистости и твердости замеры параметров повторялись трижды. Итого получается 81 прессовка. Для рассмотрения влияния смазки на стенки пресс-формы сделаны еще три прессовки со смазкой для массы 16СМ1, высотой 50 мм. Итого общее число прессовок составляет 84.

Силовые, деформационные параметры и плотность в процессе прессования

К силовым параметрам процесса прессования относятся: усилие прессования, затраты усилия на преодоление трения и усилие бокового давления заготовки на матрицу пресс-формы.

Опытное устройство (пресс-форма) для прессования заготовок показано на рисунке 15. Устройство состоит из матрицы пресс-формы 1, опоры матрицы 2, нижнего и верхнего пуансонов 3 и 4 с нижней и верхней формующими плитами 3а и 4а. На внешней стороне пресс-формы 1, опоре матрицы 2, нижнем 3 и верхнем 4 пуансонах, наклеены тензодатчики 5 для снятия показаний при нагружении. Между формующими плитами загружалась абразивная смесь 6, предназначенная для получения заготовок абразивных кругов. Для достоверности получаемых результатов материалы пресс-формы и пуансонов брались соответственно стандартным изделиям. Пресс-форма изготавливалась из стали Ст45, закаливалась, шлифовалась, футеровалась износостойкой лентой из стали 65Г и снова шлифовалась. Пуансоны изготавливались из стали Ст45, закаливались и шлифовались. Поскольку получаемые заготовки относятся в основном к низким заготовкам, то способ прессования соответствовал одностороннему прессованию верхним пуансоном. В основу замеров при экспериментальных исследованиях параметров прессования положен широко известный метод тензометрирования.

Для его использования был собран тензометрический стенд. Для регистрации параметров на отдельных частях пресс-формы закреплены месдозы (см. рисунок 15). Причем тарировка месдоз выполнялась как перед, так и после выполнения прессования серии заготовок. Для тарировки использовался гидравлический пресс усилием 617,4 кН, снабженный образцовым динамометром марки ДОС-3-50 максимальным усилием 490 кН.

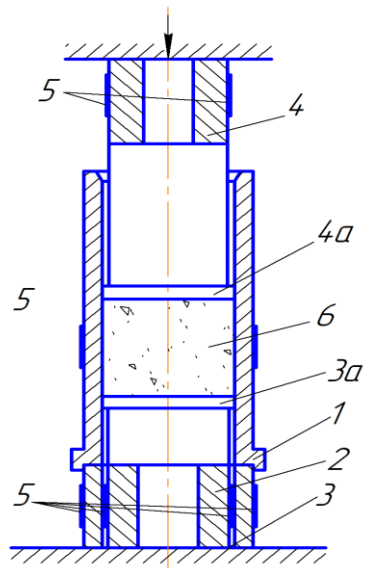


Рисунок 15 - Схема опытной пресс-формы

Общий вид опытно-промышленного формовочного пресса с пресс-формой показан на рисунке 16.



Рисунок 16 - Формовочный пресс с пресс-формой

Его техническая характеристика приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Техническая характеристика формовочного прессы

Характеристика	Показатель
Тип прессы	Гидравлический, с нижним расположением плунжера
Усилие, кН	617,4
Ход плунжера, мм	200
Размеры в свету, мм, в×ш×г	700×700×250
Скорость прессования, мм/мин	60

В процессе опытно-промышленного эксперимента осуществлено осциллографирование 84-х операций прессования для получения заготовок разных размеров и разной твердости.

В таблице 3 приведены значения параметров исходной смеси, т.е. ее массы, объемов, зернистости, твердости и плотности укладки. Например 40СМ2 означает, что зернистость равна 40, а твердость СМ2 - средне мягкая, второй степени. Даны значения усилий прессования, трения на боковой поверхности с матрицей пресс-формы и горизонтального усилия действия прессовки на матрицу пресс-формы. Подсчитан коэффициент прессования, а также плотность укладки смеси в пресс-форме. Следует отметить, что плотность укладки смеси в значительной степени зависит от зернистости.

Масса навески m абразивной смеси определялась взвешиванием на электронных весах. Объем смеси V в пресс-форме находили из произведения площади S в сечении матрицы пресс-формы на высоту насыпки смеси T_n . Зная S и T_n , можно определить плотность насыпки смеси, равной $\rho_n = m / V$.

Значения усилия прессования P и бокового усилия P_b определяли по результатам тензометрирования при прессовании на опытной пресс-форме

(рисунок 15). При определении усилия, затраченного на трение прессовки о стенки матрицы пресс-формы $T_{тр}$, использовали методику, предложенную М.Ю. Бальшиным в работе [61]. Суть методики заключается в измерении усилия выталкивания заготовки из матрицы пресс-формы P_v , которое с достаточной степенью точности приравнивается усилию трения ($T_v \sim T_{тр}$). Хотя, учитывая деформацию заготовки при выталкивании силами трения, $T_v > T_{тр}$. Коэффициент прессования представляет собой отношение высоты засыпки смеси T_n к высоте заготовки T_z .

По значениям параметров, приведенных в таблице 3, построены графики, показывающие зависимость усилия прессования от высоты заготовки, зернистости абразивного материала и твердости. Поскольку для каждого высотного размера одной зернистости и твердости проводилось три прессовки, то в качестве точек для построения графика исходили из средней величины полученных измерений. На рис. 17, 18 и 19 приведены зависимости соответственно для твердостей СМ1, С1 и СТ1. Анализ графиков показывает, что снижение размеров зерен для заготовок высотой 25 и 50 мм приводит к увеличению усилия прессования, особенно на заготовках наибольшей высоты.

Таблица 3 - Результаты экспериментального прессования

№ эксперимента	Масса навески, г	Объем навески в пресс-форме, см ³	Зернистость и твердость	Усилие прессования, кН	Усилие бокового давления, кН	$P_{бд}/P_{п}$	Усилие трения, кН	Коэффициент прессования	Плотность укладки, г/см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	225,8	137,7	40 см ₂	25,48	5,68	0,22	1,67	1,4	1,64
7	225,8	137,7	40 см ₂	30,38	6,27	0,21	1,96	1,4	1,64
9	225,8	137,7	40 см ₂	33,42	5,98	0,18	3,23	1,4	1,64
2	112,9	68,8	40 см ₂	12,15	3,43	0,28	1,27	1,4	1,64
6	112,9	68,8	40 см ₂	36,46	8,92	0,24	2,55	1,4	1,64
8	112,9	68,8	40 см ₂	45,57	12,05	0,26	2,94	1,4	1,64
3	45,2	27,5	40 см ₂	33,42	6,17	0,18	0,69	1,4	1,64
4	45,2	27,5	40 см ₂	66,84	8,53	0,13	1,27	1,4	1,64
5	45,2	27,5	40 см ₂	30,38	7,35	0,24	0,69	1,4	1,64
10	219,9	157,1	25 см ₁	30,38	5,88	0,19	1,27	1,6	1,4
11	219,9	157,1	25 см ₁	33,42	6,37	0,19	1,57	1,6	1,4
18	219,9	157,1	25 см ₁	41,36	7,74	0,19	2,35	1,6	1,4
12	110	78,5	25 см ₁	21,27	4,21	0,20	0,69	1,6	1,4
13	110	78,5	25 см ₁	27,34	5,19	0,20	1,96	1,6	1,4
17	110	78,5	25 см ₁	41,36	6,76	0,16	1,27	1,6	1,4
14	44	31,4	25 см ₁	24,30	3,43	0,14	0,29	1,6	1,4
15	44	31,4	25 см ₁	72,91	19,31	0,26	1,96	1,6	1,4

Продолжение таблицы 3 - Результаты экспериментального прессования

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
16	44	31,4	25 см1	42,53	8,13	0,19	0,98	1,6	1,4
19	237,5	177,2	16 ст1	60,76	17,25	0,28	5,10	1,8	1,34
20	237,5	177,2	16 ст1	70,27	12,94	0,18	5,39	1,8	1,34
21	237,5	177,2	16 ст1	78,99	16,17	0,20	5,10	1,8	1,34
22	118,8	88,6	16 ст1	69,87	17,25	0,25	2,55	1,8	1,34
23	118,8	88,6	16 ст1	88,10	10,78	0,12	0,69	1,8	1,34
24	118,8	88,6	16 ст1	51,65	14,01	0,27	2,55	1,8	1,34
25	47,5	35,4	16 ст1	21,27	-	-	1,57	1,8	1,34
26	47,5	35,4	16 ст1	66,84	18,33	0,27	2,55	1,8	1,34
27	47,5	35,4	16 ст1	42,53	10,39	0,24	1,96	1,8	1,34
28	229	146,8	40 с1	27,34	7,15	0,26	3,23	1,5	1,56
29	229	146,8	40 с1	18,23	4,70	0,26	2,55	1,5	1,56
30	229	146,8	40 с1	27,34	-	-	2,55	1,5	1,56
31	114,6	73,4	40 с1	27,34	7,55	0,26	1,27	1,5	1,56
32	114,6	73,4	40 с1	9,11	2,16	0,24	0,00	1,5	1,56
33	114,6	73,4	40 с1	21,27	8,62	0,41	0,88	1,5	1,56
34	45,8	29,4	40 с1	24,30	4,31	0,18	1,27	1,5	1,56
35	45,8	29,4	40 с1	27,34	5,78	0,21	0,00	1,5	1,56
36	45,8	29,4	40 с1	15,19	6,47	0,43	0,88	1,5	1,56
37	228,8	147,6	25 с1	72,91	11,86	0,16	3,82	1,5	1,55
38	228,8	147,6	25 с1	60,76	12,94	0,21	3,23	1,5	1,55

Продолжение таблицы 3 - Результаты экспериментального прессования

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
39	228,8	147,6	25 с1	56,55	9,70	0,17	2,55	1,5	1,55
40	114,4	73,8	25 с1	39,49	-	-	1,96	1,5	1,55
41	114,4	73,8	25 с1	42,53	7,55	0,18	1,96	1,5	1,55
42	114,4	73,8	25 с1	45,57	9,70	0,21	1,96	1,5	1,55
43	45,8	29,5	25 с1	57,72	18,33	0,32	1,57	1,5	1,55
44	45,8	29,5	25 с1	39,49	7,55	0,19	0,69	1,5	1,55
45	45,8	29,5	25 с1	39,49	6,47	0,16	0,69	1,5	1,55
46	237	147,2	40 сГ1	51,65	9,70	0,19	2,55	1,5	1,61
47	237	147,2	40 сГ1	42,53	12,94	0,30	2,55	1,5	1,61
48	237	147,2	40 сГ1	48,61	9,70	0,20	2,55	1,5	1,61
49	118,6	73,6	40 сГ1	-	-	-	-	1,5	1,61
50	118,6	73,6	40 сГ1	54,68	3,23	0,06	1,96	1,5	1,61
51	118,6	73,6	40 сГ1	39,49	3,92	0,01	1,27	1,5	1,61
52	47,4	29,4	40 сГ1	53,51	4,31	0,08	0,00	1,5	1,61
53	47,4	29,4	40 сГ1	78,99	7,55	0,10	1,27	1,5	1,61
54	47,4	29,4	40 сГ1	48,61	9,70	0,20	1,27	1,5	1,61
55	237,6	157,4	25 сГ1	66,84	16,17	0,24	3,23	1,6	1,51
56	237,6	157,4	25 сГ1	66,84	14,01	0,21	2,55	1,6	1,51
57	237,6	157,4	25 сГ1	48,61	10,78	0,22	2,84	1,6	1,51
58	118,8	78,7	25 сГ1	51,65	6,47	0,13	1,27	1,6	1,51
59	118,8	78,7	25 сГ1	51,65	8,62	0,17	1,96	1,6	1,51

Продолжение таблицы 3 - Результаты экспериментального прессования

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
60	118,8	78,7	25 ст1	66,84	-	-	3,33	1,6	1,51
61	47,5	31,5	25 ст1	54,68	4,31	0,08	1,57	1,6	1,51
62	47,5	31,5	25 ст1	72,91	18,33	0,25	1,27	1,6	1,51
63	47,5	31,5	25 ст1	72,91	-	-	1,27	1,6	1,51
64	228,8	177,4	16 с1	57,72	5,39	0,09	3,82	1,8	1,29
65	228,8	177,4	16 с1	42,53	8,62	0,20	2,35	1,8	1,29
66	228,8	177,4	16 с1	52,23	6,47	0,12	2,16	1,8	1,29
67	114,4	88,7	16 с1	39,49	-	-	1,27	1,8	1,29
68	114,4	88,7	16 с1	42,92	-	-	1,27	1,8	1,29
69	114,4	88,7	16 с1	48,61	8,62	0,18	1,27	1,8	1,29
70	45,8	35,5	16 с1	39,49	8,62	0,22	1,27	1,8	1,29
71	45,8	35,5	16 с1	63,80	8,62	0,14	1,96	1,8	1,29
72	45,8	35,5	16 с1	36,46	-	-	1,27	1,8	1,29
73	220	177,4	16 см1	54,68	8,62	0,16	1,96	1,8	1,24
74	220	177,4	16 см1	42,53	-	-	1,96	1,8	1,24
75	220	177,4	16 см1	54,68	-	-	1,96	1,8	1,24
76	110	88,7	16 см1	36,46	10,78	0,30	1,27	1,8	1,24
77	110	88,7	16 см1	36,46	8,62	0,24	0,88	1,8	1,24
78	110	88,7	16 см1	39,49	-	-	1,27	1,8	1,24
79	44	35,5	16 см1	24,30	5,39	0,22	1,27	1,8	1,24
80	44	35,5	16 см1	27,34	12,94	0,47	0,88	1,8	1,24

Продолжение таблицы 3 - Результаты экспериментального прессования

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
81	44	35,5	16 см ₁	42,53	4,31	0,10	1,27	1,8	1,24
82	220	177,4	16 см ₁ со смазкой	36,46	4,31	0,21	2,55	1,8	1,24
83	220	177,4	16 см ₁ со смазкой	51,65	7,55	0,15	2,55	1,8	1,24
84	220	177,4	16 см ₁ со смазкой	48,61	-	-	1,67	1,8	1,24

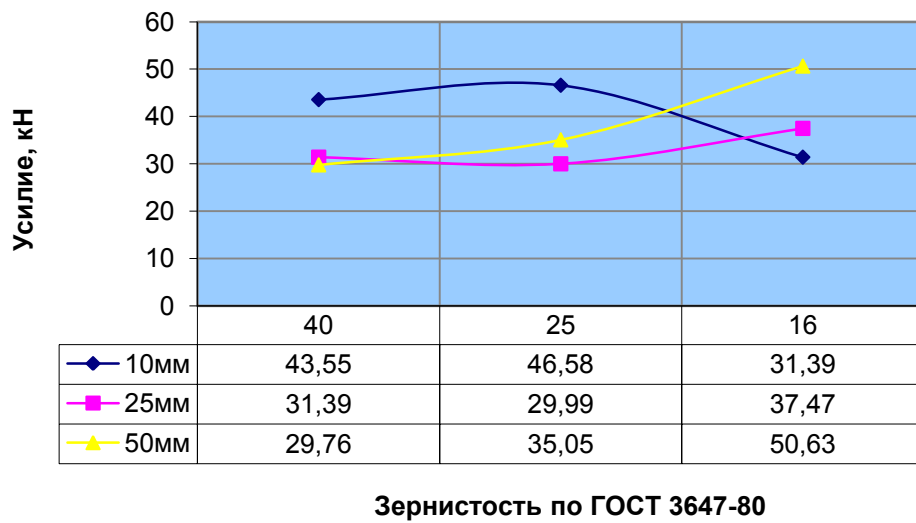


Рисунок 17 - Зависимость усилия прессования от высоты заготовки и зернистости при твердости CM1

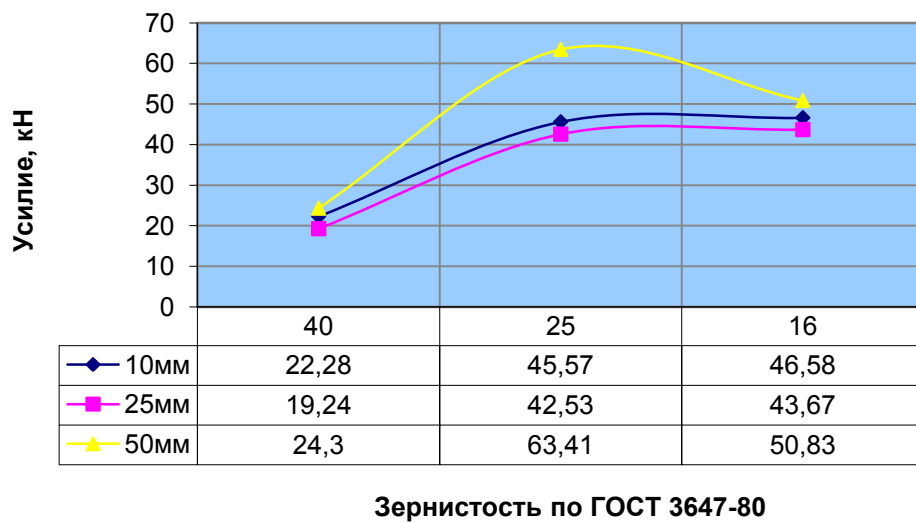


Рисунок 18 - Зависимость усилия прессования от высоты заготовки и зернистости при твердости C1

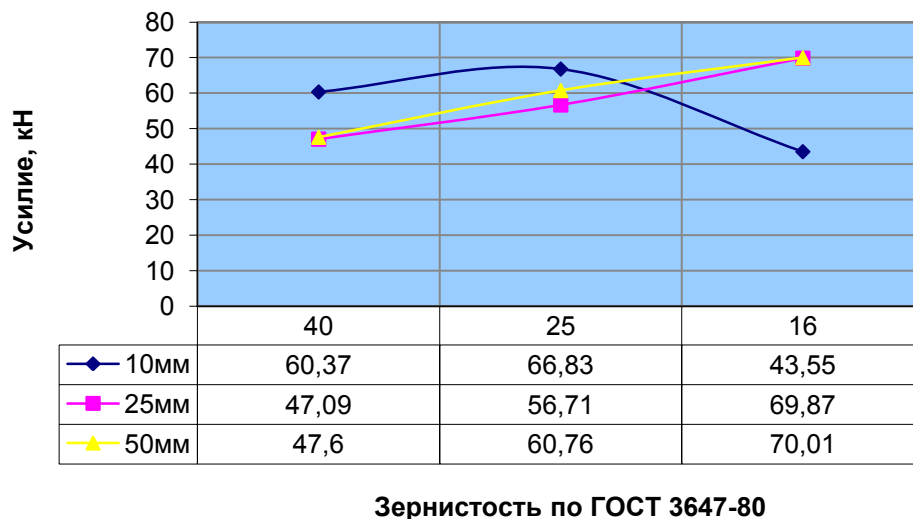


Рисунок 19 - Зависимость усилия прессования от высоты заготовки и зернистости при твердости СТ1

Следует предположить, что увеличение высоты заготовки приводит к увеличению составляющей усилия от трения заготовки о стенки матрицы и внутреннего трения зерен и связки между собой. На заготовках малой высоты ($T_3=10\text{мм}$) характер изменения усилия в зависимости от зернистости достаточно сложный: при изменении зернистости от 40 до 25 наблюдается монотонное увеличение усилия, а при зернистости, равной 16, усилие резко падает. Можно допустить, что в этом случае резкое снижение усилия также связано со снижением сил трения, а также с более однородной плотностью заготовки. Удельные усилия прессования в зависимости от высоты заготовки, зернистости и получаемой твердости представлены на рисунке 20.

Важным деформационным параметром при прессовании заготовок абразивных кругов является коэффициент прессования смеси. Коэффициент прессования необходимо знать при настройке пресс-оснастки, так как навеска одной порции смеси должна входить в объем пресс-формы, ее необходимо правильно уложить и разровнять, и после этого абразивная смесь не должна превышать объем пресс-формы. Для теоретических расчетов необходим еще

такой показатель, как плотность укладки смеси в пресс-форме. Его можно найти, зная плотность заготовки и коэффициент прессования.

В таблице 4 для смеси заданной зернистости, твердости и плотности укладки ее в матрице пресс-формы показана связь коэффициента прессования и плотности полученной заготовки.

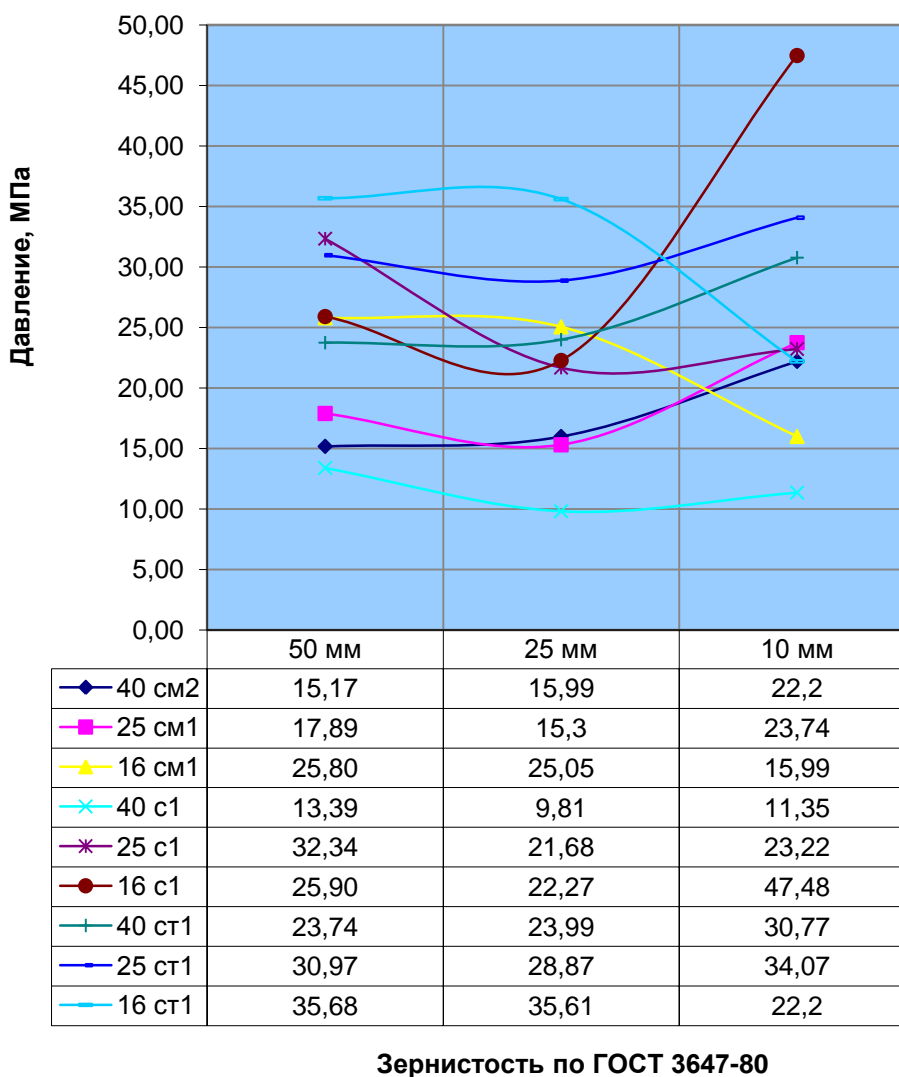


Рисунок 20 - График полученных удельных усилий прессования

Из таблицы 4 видно, что значения коэффициента прессования зависят и очень значительно от зернистости смеси. Так для зернистости смеси, равной 16, коэффициент прессования на 17 % больше по сравнению с зернистостью смеси, равной 40.

Из анализа таблицы 3 можно установить значения такого важного показателя, как коэффициент бокового давления $K_{бд}$, равный отношению P_r к P . Его значения изменяются от 0,08 до 0,33.

Таблица 4 - Деформационный и физический параметры заготовок

Зернистость и твердость заготовки	Плотность заготовки, г/см ³	Коэффициент прессования	Плотность укладки, г/см ³
16см1	2,24	1,8	1,24
16с1	2,33	1,8	1,29
16ст1	2,42	1,8	1,34
25см1	2,24	1,6	1,40
25с1	2,33	1,5	1,55
25ст1	2,42	1,6	1,51
40см2	2,30	1,4	1,64
40с1	2,334	1,5	1,56
40ст1	2,415	1,5	1,61

Такой большой диапазон значений можно объяснить составом смеси (объемом зерна и связки), зернистостью шлифовального материала, размером прессовки и, конечно, усилием прессования. Полученные данные по коэффициенту бокового давления для смесей твердостью СМ1, С1, СТ1 показаны на рисунках 21, 22, 23. Графически удельный коэффициент бокового давления представлен на рисунке 24.

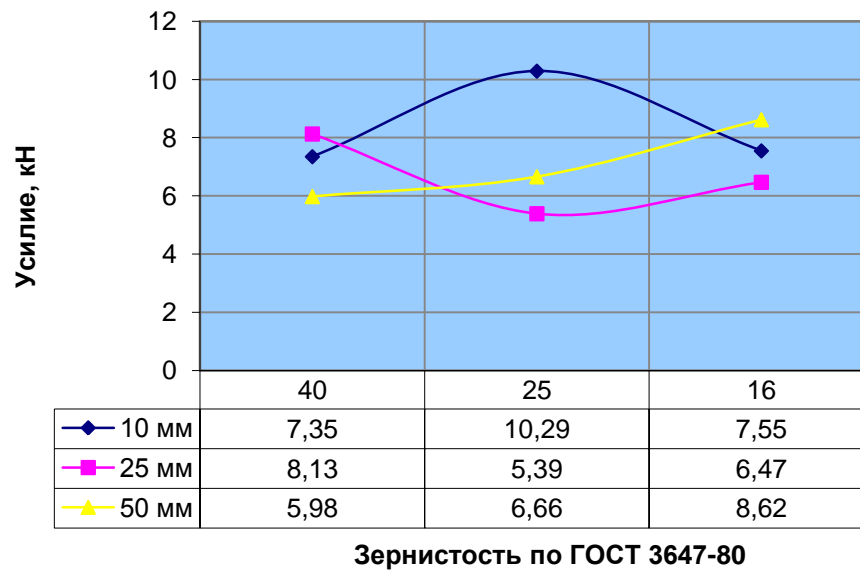


Рисунок 21 - Зависимость бокового усилия от высоты заготовки и зернистости при твердости CM1

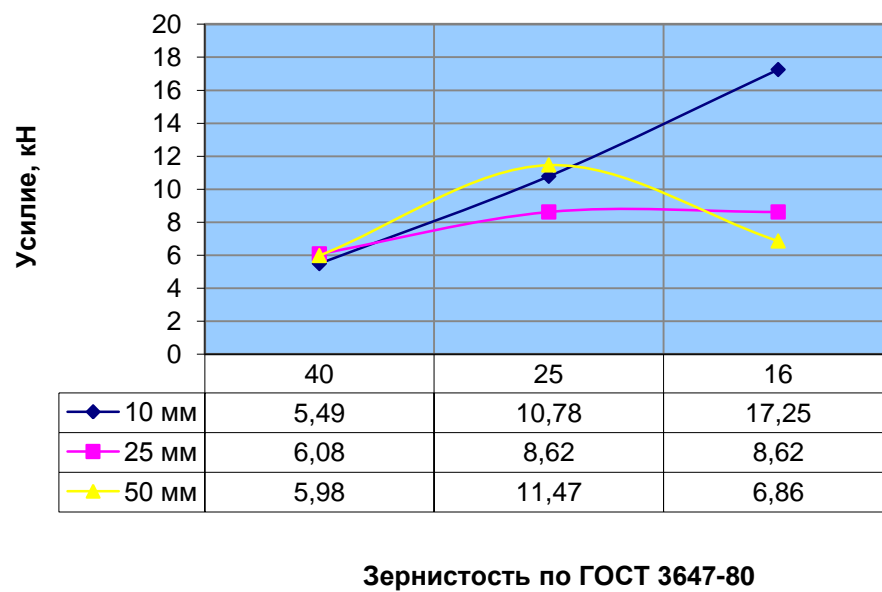


Рисунок 22 - Зависимость бокового усилия от высоты заготовки и зернистости при твердости C1

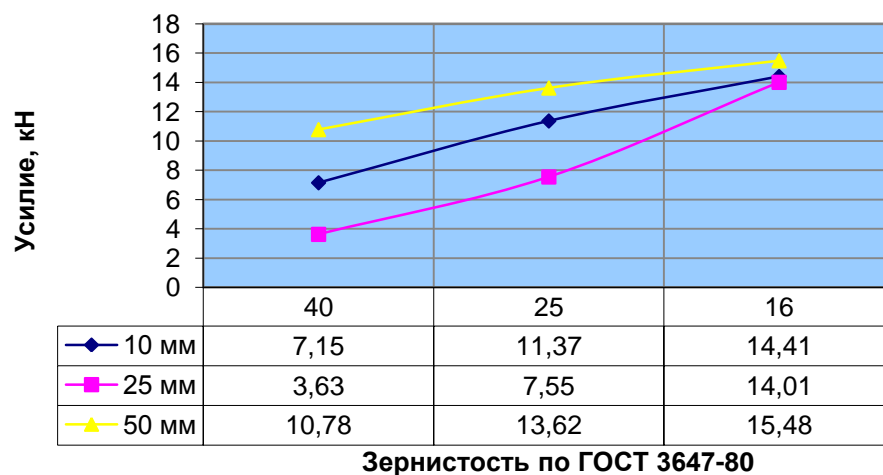


Рисунок 23 - Зависимость бокового усилия от высоты заготовки и зернистости при твердости СТ1

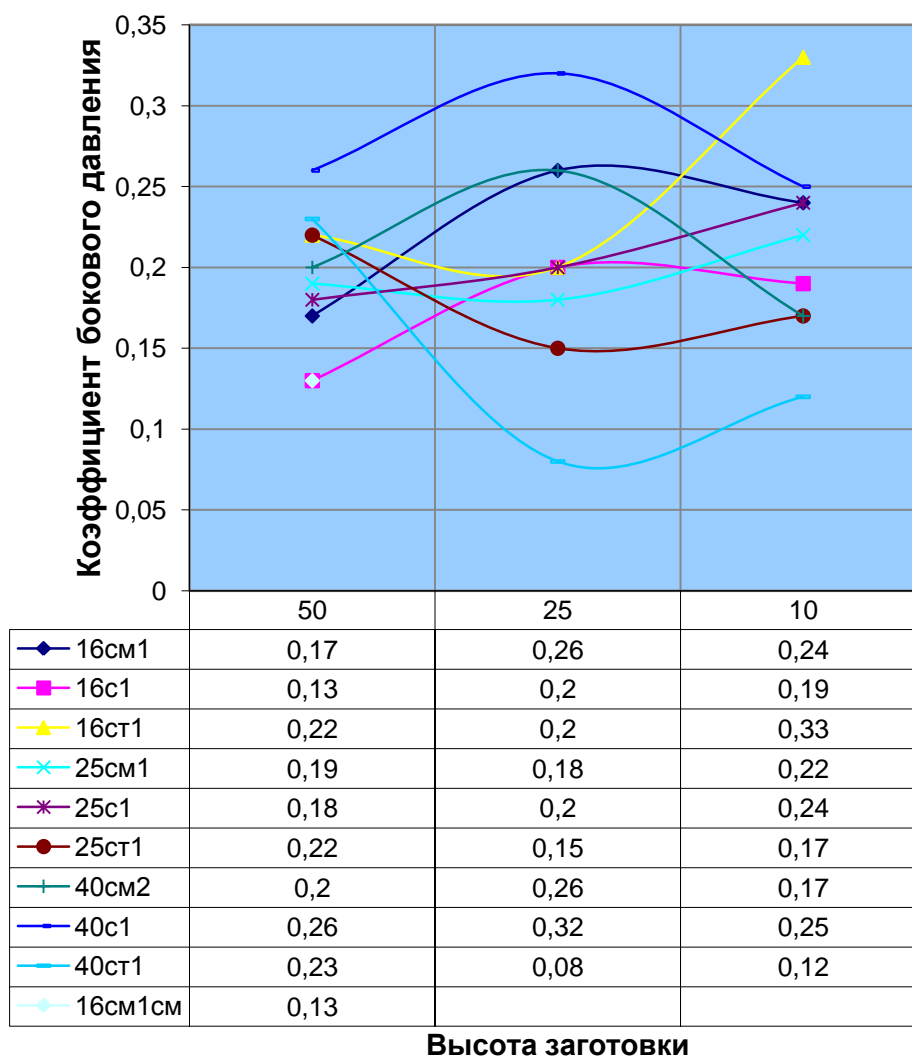


Рисунок 24 - Коэффициент бокового давления от высоты заготовки, ее зернистости и твердости

Физические параметры процесса прессования

К физическим параметрам относятся плотность укладки смеси в пресс-форме (см. таблицу 4), плотность прессованной заготовки, коэффициент трения и твердость прессовок после термической обработки.

Известно, что внешнее трение - сложное физическое явление, зависящее от многих параметров. Поэтому коэффициент трения можно отнести к физическим величинам.

Впервые понятие коэффициента трения скольжения еще в 1508 году ввел Леонардо да Винчи и предложил определять его по формуле:

$$f_{\text{тр}} = P_{\text{тр}}/P, \quad (4)$$

где, $f_{\text{тр}} = 0,25$, $P_{\text{тр}}$ -сила трения, P -сила сдвига тела с места.

В настоящее время этот закон, уже как закон Амонтона - Кулона, широко используется в теории обработки металлов давлением. Коэффициент трения задается в виде сложной функции от физико-химического состояния поверхности контакта, от свойств обрабатываемого материала, инструмента и других параметров.

Внешнее трение и коэффициент трения при прессовании высокопористой сложной по составу композиционной абразивной смеси в пресс-формах существенно отличаются от этих параметров в процессе прессования беспористых металлов и сплавов. Изменение плотности при получении прессовки из высокопористой смеси приводят к необходимости учета функции плотности ρ . В этом случае функция силы трения будет иметь вид

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{тр}}(P, f_{\text{тр}}, \rho). \quad (5)$$

Второе существенное отличие процесса прессования абразивной смеси является наличие более сложного механизма трения, включающего не только механизм скольжения, но и механизм резания матрицы пресс-формы абразивными зернами. Наличие последнего механизма приводит к завышенным значениям $f_{тр}$, если его подсчитывать по закону Амонтона - Кулона (4) и не учитывать значений ρ и механизм резания. Учитывая, что $f_{тр}$ по закону (4) определяется с большой долей приближения назовем его условным коэффициентом трения $f_{тр}$ (см. таблицу 5). Для определения твердости готовых абразивных изделий их необходимо термообработать (обжечь).

Прессованные заготовки перед постановкой в печь для обжига были подвергнуты естественной сушке при комнатной температуре в продолжении суток, после чего были обожжены, как обычные изделия в туннельной печи. После обжига торцы заготовок были механически обработаны на величину 0,2 - 0,3 мм, для снятия корочки, которая имеет повышенную твердость по сравнению с телом прессовки. Далее на торцах каждой прессовки была измерена твердость на твердомере модели ТП-400. Результаты измерений сведены в таблице 6.

Как следует из этой таблицы, при прессовании заготовок высотой 50мм наблюдается снижение твердости от прессующего пуансона к неподвижному от четырех степеней для смеси 16ст1 до двух степеней для смеси 40 см². Для прессовок высотой 25 мм наблюдается некоторое повышение твердости от прессующего пуансона к неподвижному в пределах одной и той же степени твердости. То же самое можно сказать и о прессовках высотой 10 мм.

Таким образом, исходная заданная составом смеси твердость изменяется в процессе прессования и последующей термообработки заготовок, в большей степени для заготовок средней высоты ($D_3 = T_3$) и высоких заготовок.

Для изделий средней высоты и тем более высоких твердость неоднородна по высоте прессовки после термообработки, при односторонним прессовании. Для низких изделий ($D_3 > T_3$) твердость по высоте остается постоянной и изменяется незначительно.

Результаты измерений отмечены в таблице цветом. Зеленый цвет - твердость на торцах совпадает. Синий цвет - твердость на верхнем торце меньше, чем на нижнем, что можно приравнять к совпадению твердости на торцах, поскольку твердость на верхнем торце не может быть меньше, чем на нижнем при одностороннем прессовании с приложением нагрузки сверху. Сочтем это погрешностью измерений. Красный цвет - твердость на верхнем торце больше твердости на нижнем торце, что говорит о непропрессовке при одностороннем прессовании. По результатам измерений составлены три таблицы для каждой высоты (таблицы 7-9). Из этих таблиц следует вывод, что при одностороннем прессовании при соотношении $\frac{D_3}{T_3} \leq 2$ прессовка получается с одинаковой твердостью на обоих торцах при любой из приведенных зернистости и твердости. При $0,06 \leq \frac{D_3}{T_3} \leq 2$ для получения одинаковой твердости на торцах уже требуется подпрессовка для заготовок твердостей С1-С2, СТ1-СТ3 и зернистостей 25 и 40. Красным цветом в таблицах выделены заготовки по твердости и высоте, которые требуют подпрессовки, зеленым - не требующие подпрессовки и которым достаточно одностороннего прессования.

Таблица 5 -Значения $K_{бд}$ и $f_{тр}$ при прессовании

Зернистость	Твердость смеси	Высота прессовки, мм	$K_{бд}$	$f_{тр}$
1	2	3	4	5
16	См1	50	0,17	0,20
16	См1	25	0,26	0,12
16	См1	10	0,24	0,12
16	С1	50	0,13	0,28
16	С1	25	0,20	0,13
16	С1	10	0,19	0,15
16	СТ1	50	0,22	0,53
16	СТ1	25	0,20	0,20

Продолжение таблицы 5 – Значения $k_{бд}$ и $f_{тр}$ при прессовании

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
16	Ст1	10	0,33	0,21
25	См1	50	0,19	0,18
25	См1	25	0,18	0,40
25	См1	10	0,22	0,11
25	С1	50	0,18	0,33
25	С1	25	0,20	0,20
25	С1	10	0,24	0,10
25	Ст1	50	0,22	0,29
25	Ст1	25	0,15	0,22
25	Ст1	10	0,17	0,14
40	См2	50	0,20	0,23
40	См2	25	0,26	0,23
40	См2	10	0,17	0,09
40	С1	50	0,26	0,28
40	С1	25	0,32	0,11
40	С1	10	0,25	0,11
40	Ст1	50	0,23	0,26
40	Ст1	25	0,08	0,17
40	Ст1	10	0,12	0,13
16	См1	50	0,13	0,23

Таблица 6 - Твердость на торцах прессовок

Высота прессовки, мм	Зернистость и твердость смеси	Твердость на верхнем торце прессовки		Твердость на нижнем торце прессовки	
		глубина лунки, мм	твердость	глубина лунки, мм	твердость
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
50	40 см2	5,1	СМ1	6,0	СМ1
25	40 см2	7,0	СМ1	6,3	СМ1

Продолжение таблицы 6 – Твердость на торцах прессовок

1	2	3	4	5	6
10	40 см2	5,3	CM1	5,8	CM1
10	40 см2	2,8	CT1	2,6	CT1
10	40 см2	5,0	CM1	3,9	C1
25	40 см2	5,2	CM1	5,2	CM1
50	40 см2	4,6	CM2	5,3	CM1
25	40 см2	6,8	CM1	6,5	CM1
50	40 см2	4,7	CM2	6,0	CM1
50	25 см1	5,1	CM2	5,5	CM2
50	25 см1	2,6	CM2	2,8	CM2
25	25 см1	3,0	CM2	2,6	CM2
25	25 см1	3,0	CM2	2,8	CM2
10	25 см1	5,4	CM2	5,5	CM2
10	25 см1	3,2	CT1	3,7	C2
10	25 см1	6,0	CM1	5,7	CM1
25	25 см1	6,0	CM1	5,4	CM2
50	25 см1	5,0	CM2	5,9	CM1
50	16 ст1	2,9	CT2	3,4	CT1
50	16 ст1	2,8	CT2	3,9	C2
50	16 ст1	2,9	CT2	4,0	C2
25	16 ст1	3,3	CT1	3,1	CT2
25	16 ст1	3,7	C2	3,7	C2
25	16 ст1	3,7	C2	3,7	C2
10	16 ст1	3,4	CT1	4,0	C2
10	16 ст1	2,7	CT3	2,5	CT3
10	16 ст1	3,2	CT1	3,2	CT1
50	40 с1	3,2	C2	4,2	CM2
50	40 с1	3,3	C2	5,1	CM1
50	40 с1	3,6	C1	4,3	CM2
25	40 с1	3,7	C1	3,8	C1
25	40 с1	4,4	CM2	4,6	CM2

Продолжение таблицы 6 – Твердость на торцах прессовок

1	2	3	4	5	6
25	40 c1	3,4	C2	3,7	C1
10	40 c1	3,6	C1	3,3	C2
10	40 c1	4,0	C1	3,8	C1
10	40 c1	4,5	CM2	4,8	CM2
50	25 c1	3,2	CT1	4,8	C1
50	25 c1	3,3	CT1	4,3	C1
50	25 c1	3,3	CT1	4,7	C1
25	25 c1	4,5	C1	3,6	CT1
25	25 c1	4,2	C2	4,2	C2
25	25 c1	4,1	C2	3,6	CT1
10	25 c1	3,8	C2	3,4	CT1
10	25 c1	4,1	C2	4,0	C2
10	25 c1	4,4	C1	4,5	C1
50	40c1	2,1	CT3	3,8	C1
50	40c1	2,5	CT2	3,7	C1
50	40c1	2,5	CT2	3,5	C2
25	40c1	2,8	CT1	2,5	CT2
25	40c1	2,8	CT1	2,6	CT1
25	40c1	3,6	C1	3,3	C2
10	40c1	2,6	CT1	2,4	CT2
10	40c1	2,0	CT3	1,9	CT3
10	40c1	3,1	C2	2,7	CT1
50	25c1	2,5	CT3	3,2	CT1
50	25c1	2,7	CT3	3,3	CT1
50	25c1	2,7	CT3	3,5	CT1
25	25c1	3,0	CT2	3,2	CT1
25	25c1	3,3	CT1	3,2	CT1
25	25c1	3,1	CT2	2,7	CT3
10	25c1	3,0	CT2	3,1	CT2
10	25c1	2,0	T2	2,2	T1

Продолжение таблицы 6 - Твердость на торцах прессовок

1	2	3	4	5	6
10	25ст1	1,6	BT	1,6	BT
50	16 с1	4,5	C1	4,7	C1
50	16 с1	4,2	C2	5,0	CM2
50	16 с1	4,3	C1	4,8	C1
25	16 с1	4,5	C1	4,4	C1
25	16 с1	4,1	C2	4,8	C1
25	16 с1	4,4	C1	4,0	C2
10	16 с1	2,0	T2	2,0	T2
10	16 с1	2,7	CT3	2,6	CT3
10	16 с1	2,9	CT2	2,7	CT3
50	16 см1	5,5	CM2	6,2	CM1
50	16 см1	2,6	CM2	2,9	CM2
50	16 см1	6,0	CM1	6,4	CM1
25	16 см1	2,9	CM2	2,6	CM2
25	16 см1	2,9	CM2	2,7	CM2
25	16 см1	6,4	CM1	5,4	CM2
10	16 см1	3,2	CM2	3,3	CM1
10	16 см1	5,4	CM2	5,5	CM2
10	16 см1	5,7	CM1	6,0	CM1
50	16 см1	5,6	CM2	5,7	CM2
50	16 см1	5,7	CM1	6,0	CM1
50	16 см1	5,4	CM2	6,0	CM1

Таблица 7 - Таблица измерения твердостей для заготовки высотой 10мм

10мм		Зернистость		
		16	25	40
Твердость	CT	16CT1	25CT1	40CT1
	C	16C1	25C1	40C1
	CM	16CM1	25CM1	40CM2

Таблица 8 - Таблица измерения твердостей для заготовки высотой 25мм

25мм		Зернистость		
		16	25	40
Твердость	СТ	16СТ1	25СТ1	40СТ1
	С	16С1	25С1	40С1
	СМ	16СМ1	25СМ1	40СМ2

Таблица 9 - Таблица измерения твердостей для заготовки высотой 50мм

50мм		Зернистость		
		16	25	40
Твердость	СТ	16СТ1	25СТ1	40СТ1
	С	16С1	25С1	40С1
	СМ	16СМ1	25СМ1	40СМ2

2.3 Выводы по главе

1. Выполненный анализ отношений размеров заготовок позволяет обоснованно выбрать способ и устройство для прессования с учетом относительных обжатию: для крупнозернистых смесей, равных $T_n/T_3 = 1,6-1,8$, и мелкозернистых смесей, равных $T_n/T_3 = 2,5-2,8$.

2. Выполнен анализ известных исследований процессов прессования заготовок из абразивных смесей. Приведена связь геометрии инструмента со способом прессования смеси. Показана связь характеристики абразивного инструмента с параметрами исходной смеси и прессования из нее.

3. Разработана и изготовлена опытная пресс-форма, снабженная измерительными приборами - мездозами и тензометрической аппаратурой, установленная на формовочном прессе усилием 490кН опытно-промышленного участка цеха №5 ЧАЗа. На этой пресс-форме выполнены исследования по

прессованию заготовок из электрокорундовых смесей на керамической связке с твердостями СМ1, СМ2, С1, СТ1. В качестве шлифовального материала использовался белый электрокорунд зернистостями 16, 25 и 40.

Анализ результатов экспериментов показал, что плотность укладки смеси зависит в значительной степени от зернистости шлифовального материала. Усилие прессования определяется коэффициентом прессования, плотностью укладки смеси, его зернистостью и твердостью, что подтверждается таблицей и графиками. Боковое усилие в матрице достигает в ряде случаев и даже превышает 30% от усилия на верхнем пуансоне. Усилие трения определялось экспериментально, а также по методу М.Ю. Бальшина, когда оно приближенно приравнивалась усилию выталкивания прессовки из матрицы.

Получены зависимости усилий прессования от высоты заготовки и получаемой твердости, удельных усилий прессования, бокового усилия при различных высотах заготовки и получаемой твердости, коэффициента бокового давления.

Проведено измерение твердости на торцах обожженных прессовок и сделан вывод о границе применимости одностороннего прессования. Результат говорит о том, что двустороннее прессование или прессование с подпрессовкой требуется при $0,06 \leq \frac{D_3}{T_3} \leq 2$ для заготовок твердостей С1 и выше и зернистостей 25 и выше.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

3.1 Поверхностное взаимодействие при прессовании порошков

3.1.1 Анализ известных исследований

При прессовании заготовок абразивных кругов большое внимание уделяется трению прессуемой смеси о стенки пресс-оснастки, поскольку для получения равномерных физических свойств заготовки необходимо ее одинаковое обжатие сверху и снизу. Кроме того, необходимо учитывать затраты энергии на преодоление этого трения.

В физике твердого тела известно большое количество работ, посвященных созданию теории поверхностного взаимодействия твердых тел. Например, для сухого взаимодействия поверхностей твердых тел наиболее полно разработана теория молекулярно-механического взаимодействия [67]. Согласно этой теории, сила трения F зависит от констант α и β , фактической площади контакта S_ϕ и приложенного нормального давления N

$$F = \alpha S_\phi + \beta N. \quad (6)$$

В обработке металлов давлением на поверхностях контактного взаимодействия со скольжением обрабатываемого материала по инструменту используется механическая теория сухого трения, согласно которой удельная сила трения f_τ является возрастающей функцией удельного нормального давления f_ν и скорости скольжения v_s [68]

$$f_\tau = f_\tau(f_\nu, v_s). \quad (7)$$

В обработке давлением порошковых материалов закон сухого трения может иметь вид [68]

$$f_{\tau} = f_{\tau}(f_v, v_s, \rho), \quad (8)$$

где ρ - плотность порошковой смеси.

3.1.2 Математическое моделирование поверхностного взаимодействия при прессовании порошков

В основу математического моделирования поверхностного взаимодействия абразивной смеси с инструментом из антифрикционного материала положим [69, 70] закон сухого трения в виде векторного функционала

$$f_{\tau} = f_{\tau}(f_v, u_s, \rho) \frac{\vec{u}_{\tau}}{u_{\tau}}, \quad (9)$$

где u_s - функция перемещения частиц абразивной смеси на поверхности скольжения с инструментом S_s ;

u_{τ} - функция перемещения частиц абразивной смеси в касательной плоскости к поверхности S_s в произвольной точке.

3.1.2.1 Функционал перемещений и напряжений

Для нахождения неизвестных функций $f_v = f_v(\sigma_{ij}(x, y, z))$, $u_s = u_s(x, y, z)$ и $\rho = \rho(x, y, z)$, используем вариационный метод теории пластичности [68], основанный на уравнениях классической теории пластичности и принципах виртуальных перемещений и напряжений. В соответствии с этими принципами действительные поля перемещений и напряжений, возникающие в очаге деформации при заданном шаге движения инструмента, доставляют минимум следующему функционалу:

$$\begin{aligned}
\mathcal{J}(\sigma'_{ij}, u'_i) = & \int_V \left[\int_0^{\Gamma'} \Gamma(\tau) d\tau + \int_0^{\Gamma'} T(\gamma) d\gamma + \int_0^{\sigma'} \varepsilon(\sigma) d\sigma + \int_0^{\varepsilon'} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right] dV - \\
& - \int_{S_f} f_i^* u'_i dS - \int_{S_n} f_i^* u'_i dS - \\
& - \int_{S_s} \left[f_{vi}' u_{vi}^* + f_{ti}' u_{ti}^* - \int_0^{u_{si}'} f_{ti}(u, p) du - \int_0^{f_{ti}'} u_{si}(f, p) df \right] dS,
\end{aligned} \tag{10}$$

где Γ' - степень деформации сдвига на виртуальном перемещении;

ε' - степень объемной деформации на виртуальном перемещении;

T' - интенсивность касательных напряжений на виртуальном поле напряжений;

σ' - среднее нормальное напряжение на виртуальном поле напряжений;

V - объем очага деформации;

σ'_{ij} - варьируемые компоненты тензора напряжения;

u'_i - варьируемые компоненты вектора перемещения.

Физические уравнения связи параметров напряженного и деформированного состояний $T = T(\rho_o, \Gamma)$, $\sigma = \sigma(\rho_o, \varepsilon)$ находим в результате экспериментального исследования абразивной смеси.

3.1.2.2 Допущения математической модели

При реализации математической модели приняты в качестве варианта приближенного решения следующие допущения:

- процесс прессования протекает при изотермических условиях;
- прессуемая смесь представляет собой квазисплошную уплотняемую квазиизотропную среду;
- массовые силы и силы инерции в очаге деформации незначительны и их влиянием на пластическое течение среды можно пренебречь;
- справедливы гипотезы коаксиальности и пропорциональности девиаторов тензоров напряжений и малых деформаций.

3.1.2.3 Параметры очага деформации

Вся внешняя поверхность деформируемой смеси $S = S_n \cup S_s \cup S_f$ (рисунок 25) включает S_n - поверхность прилипания, на которой поверхностный слой смеси и инструмент движутся с одинаковой скоростью; S_s - поверхность скольжения, на которой происходит проскальзывание смеси по инструменту и S_f - свободная поверхность.

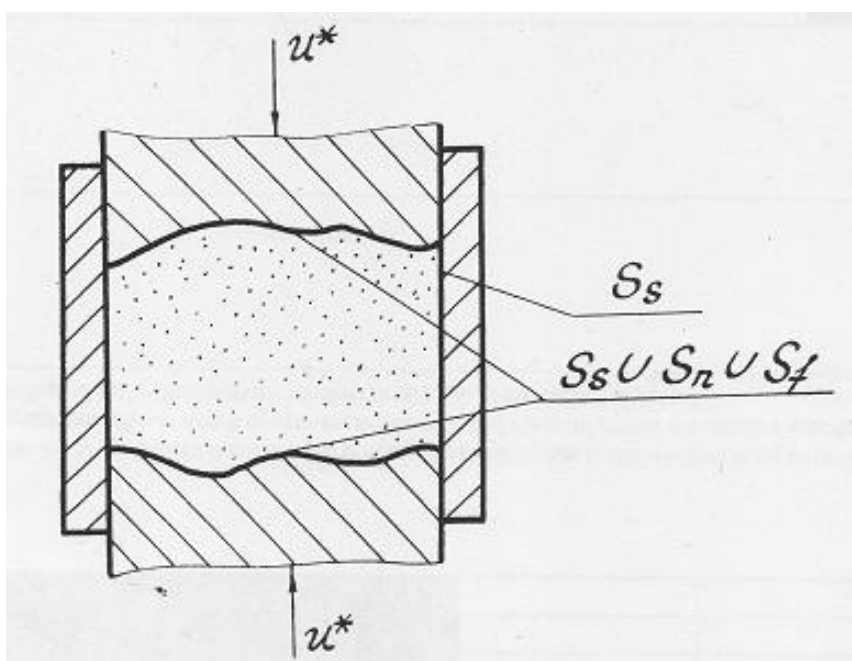


Рисунок 25 - Схема очага деформации в общем виде

Дополнительные граничные условия на этих поверхностях имеют вид:

$$\forall M \in S_n: \quad \vec{u} = \vec{u}^*; \quad (11)$$

$$\forall M \in S_s: \quad \vec{u}_v = \vec{u}_v^*; \quad (12)$$

$$\forall M \in S_f: \quad \vec{f}_l = \vec{f}_l^*, \quad (13)$$

где точка M принадлежит внешней поверхности деформируемой смеси;
 \vec{u}^* - вектор перемещения инструмента;
 ν - нормаль к поверхности S в точке M ;
 f_i^* - компоненты вектора поверхностного напряжения.

Граница между поверхностями S_n , S_s и S_f может не задаваться, в этом случае она войдет в функционал (10) в качестве дополнительных варьируемых функций и будет определяться в процессе его минимизации.

3.1.2.4 Функционал поля перемещений

Применим вариационный метод для нахождения поля перемещений. В этом случае функционал (10) примет вид:

$$J(u'_i) = \int_V^* \left[\int_0^{\Gamma'} T(\gamma) d\gamma + \int_0^{\varepsilon'} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right] dV - \int_{S_S}^* f_\tau \cdot u'_\tau dS \quad (14)$$

В соответствии с поставленной задачей и принятыми допущениями поле перемещений должно удовлетворять граничным условиям, зависящим от геометрических параметров очага деформации. Для матрицы прямоугольной формы и плоского пуансона при приложении усилия вдоль оси OZ граничные условия (рисунок 26) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{z/z=0} &= 0; & u_{z/z=h} &= -\Delta h; & u_{x/x=0, x=\pm c} &= 0 \\ u_{x/z=0, z=h} &= 0; & u_{y/y=0, y=\pm b} &= 0; & u_{y/z=0, z=h} &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\vec{u} = \{u_x, u_y, u_z\}$ - вектор перемещения частиц порошка;

Δh - перемещение пуансона;

h - высота прессовки;

$2b, 2c$ - соответственно ширина и длина полости матрицы.

Минимизируя функционал (14) на множество непрерывных и дифференцируемых функций, удовлетворяющим заданным граничным условиям, определяем действительное поле перемещений частиц абразивной смеси при заданном шаге движения инструмента. По найденному полю перемещений могут быть определены степень объемной деформации и степень деформации сдвига в каждой точке прессовки.

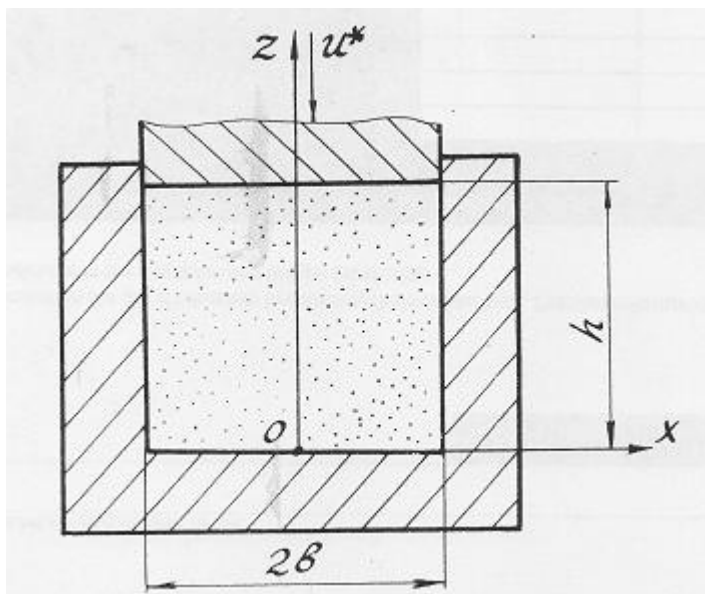


Рисунок 26 - Очаг деформации при прессовании в прямоугольной матрице

3.1.2.5 Уравнение плотности

Функция плотности в очаге деформации находится из условия неразрывности деформации в виде уравнения

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp(-\varepsilon) \quad (16)$$

Интенсивность касательных напряжений и среднее нормальное напряжение вычисляются на основе реологических уравнений связи напряженного и деформируемого состояния. Давление прессования для осуществления шага Δh

определяется из баланса работ сил, действующих внутри и на поверхности очага деформации.

Минимизация функционала (14) осуществляется одним из численных методов. На первоначальной стадии расчета, когда поле перемещений имеет достаточно много неопределенностей, удобно пользоваться методом Эйлера [71]. При этом исходная задача сводится к задаче минимизации функции нескольких переменных без ограничений. Недостатком этого численного метода является большое количество варьируемых параметров и, соответственно, значительные затраты машинного времени. Кроме этого, результаты расчетов в виде действительного поля перемещений и характера распределения плотности получаются в виде табличных значений в различных точках очага деформации, а не в виде аналитических функций. Однако предварительные расчеты по методу Эйлера позволяют получить информацию о характере поля перемещений и тем самым подтвердить или опровергнуть первоначальные представления о характере процесса деформации. На основании таких пробных расчетов строится семейство аналитических функций, способных описать действительное поле перемещений на всем протяжении процесса деформации или на некоторой его части. Наличие такого семейства функций позволяет затем метод Ритца [71] для минимизации функционалов. В этом случае задача также сводится к минимизации функции нескольких переменных, только с гораздо меньшим числом варьируемых параметров, чем в методе Эйлера. Метод Ритца приводит к значительному сокращению машинного времени при реализации математической модели. Действительно, поле перемещений при использовании метода Ритца может быть получено в аналитическом виде.

3.1.3 Результаты реализации модели

Для решения задачи по методу Эйлера заготовка разбивалась по высоте на m плоских сечений ($m=100$). Перемещение u_z и степень объемной деформации ε

частиц абразивной смеси в каждом i -том плоском сечении, перпендикулярном направлению движения инструмента, задавалась в виде:

$$u_{z1}=0; u_{zi}=x_i; u_{zm}=-\Delta h; \quad (17)$$

$$\varepsilon_{zi}=(u_{z+1}-u_z)/(z_{i+1}-z_i); \quad i=1 \dots, m-1,$$

где x_i - варьируемый параметр;

z_i - координата i -того сечения.

Действительное поле перемещений и характер распределения плотности, полученные по методу Эйлера, изображены на рисунках 27 и 28 пунктирными линиями 1-6, которые соответствуют первому, второму, третьему, пятому, седьмому и девятому шагам инструмента. Как видно из рисунков 27 и 28, во время прессования в процессе уплотнения вовлекаются все новые и новые слои смеси.

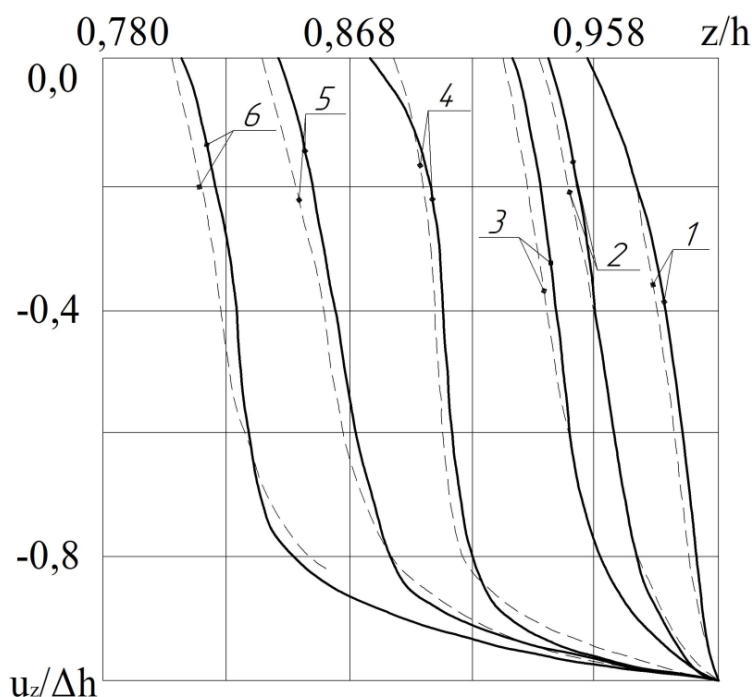


Рисунок 27 - Поле перемещений частиц абразивной смеси при формовании

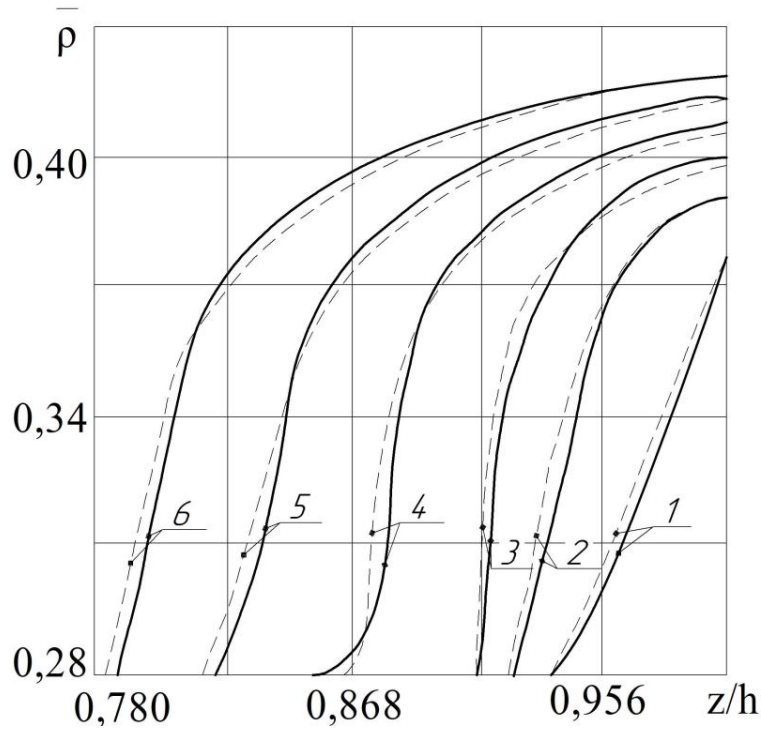


Рисунок 28 - Распределение относительной плотности в заготовке

Минимизация функционала по методу Ритца осуществлялась на следующем семействе функций:

$$u_z(z) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq z < a_1; \\ -a_6[(z - a_1)/(a_4 - a_1)]^{a_2^2+1}, & \text{при } a_1 \leq z < a_4; \\ (-\Delta h - a_6)[1 - (z - a_4)/(h - a_3 - a_4)]^{a_2^2+1}, & \text{при } a_4 \leq z < h - a_3; \\ -\Delta h, & \text{при } h - a_3 \leq z \leq h, \end{cases} \quad (18)$$

каждая из которых представляет собой сплайн четырех функций, двух степенных и двух линейных, причем в точках стыка совпадают не только значения функций, но и значения их первых производных (рисунок 29). Построенное поле имеет 5 независимых параметров a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 . Шестой параметр определяется из условия равенства производных в точке А

$$a_6 = \frac{(a_5^2 + 1)(a_4 - a_1)}{(h - a_3 - a_4)(a_2^2 + 1) + (a_4 - a_1)(a_5^2 + 1)} \quad (19)$$

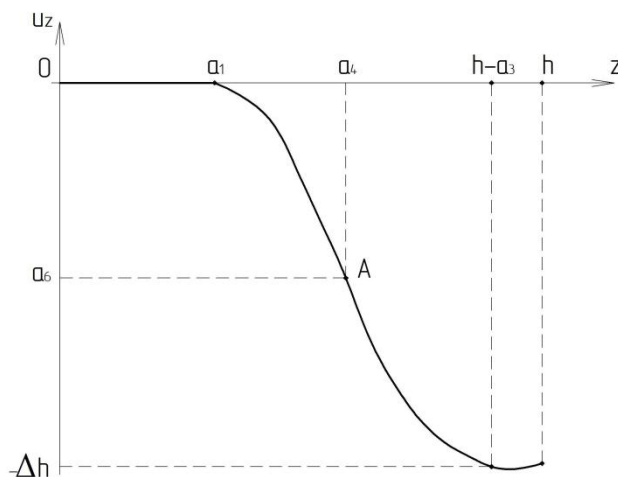


Рисунок 29 - К определению параметра функций перемещения

Указанная функция в зависимости от значений параметров может гибко изменять свой вид: иметь участки выпуклости и (или) вогнутости, изменять кривизну линий, менять положение точек сопряжения различных участков сплайна. Семейство функции (17) способно описывать процесс деформации как на начальной стадии, когда уплотняются преимущественно только верхние слои заготовки, так и при развитых деформациях, когда под пуансоном образуется слой смеси, находящийся в состоянии, близком к пределу уплотняемости. Действительное поле перемещений и распределение плотности, полученные по методу Ритца после первого, второго, третьего, пятого, седьмого и девятого шага инструмента, изображены на рисунках 27 и 28 сплошной линией (линии 1-6). Как видно из рисунков 27 и 28, результаты, полученные по методу Эйлера и Ритца, практически не отличаются.

На рисунке 28 изображено распределение плотности по очагу деформации при различных напряжениях трения на поверхности скольжения (кривая 1 - $f_{\tau} = 7,5$ МПа, 2 - $f_{\tau} = 15$ МПа, 3 - $f_{\tau} = 22,5$ МПа). При значительных напряжениях трения наблюдается появление зоны высокой плотности, находящейся непосредственно под пуансоном. Снижение напряжений трения приводит к увеличению объема смеси, вовлеченного в процесс деформации, и снижению разноплотности получаемой заготовки. Кривая 1 на рисунке 30 характеризует

распределение относительной плотности заготовки, полученной в твердосплавной пресс-форме, а кривые 2 и 3 характеризуют распределение относительной плотности заготовок, полученных в стальных пресс-формах.

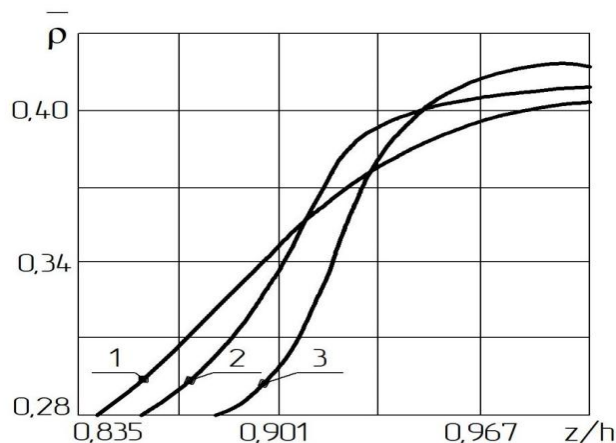


Рисунок 30 - Характер распределения относительной плотности при разных условиях трения

3.2 Осевое сжатие сплошных и полых цилиндрических заготовок

Уложенная смесь в пресс-форму подвергается дальнейшей обработке давлением с целью уплотнения, улучшения сцепления компонентов и получения требуемых размеров.

Возможность выбора вариантов прессования нуждается в критериях их оценки. На этапе слабой изученности механизма сцепления и расслоения компонентов критерием выбора способов может служить неоднородность деформации по объему. При этом важно, чтобы математические модели всех сравниваемых вариантов были разработаны в рамках единого подхода и одинаковых допущений [72].

Для вариантов, предусматривающих осевое сжатие, предлагаются единые зависимости для поля скоростей, удовлетворяющего условию несжимаемости при любых значениях константа a_i :

$$v_r = -\frac{1}{2}vR_H\frac{\gamma}{h}\left(a_1 + \frac{1}{2}a_2\gamma^2 + 3a_3\beta^2 + \frac{1}{3}a_4\gamma^4 + \frac{3}{2}a_5\gamma^2\beta^2 + 5a_6\beta^4\right) + \frac{f(z)}{\gamma R_H}, \quad (20)$$

$$v_z = v\beta(a_1 + a_2\gamma^2 + a_3\beta^2 + a_4\gamma^4 + a_5\gamma^2\beta^2 + a_6\beta^4), \quad (21)$$

где v_r и v_z -радиальная и осевая составляющая вектора скорости и перемещения материала;

$\gamma = \frac{r}{R_H}$ -относительная радиальная координата; $\beta = \frac{z}{h}$ -относительная высотная

координата; v - скорость перемещения инструмента в осевом направлении; h - половина высоты заготовки; a_i и $f(z)$ - параметры, подлежащие определению из граничных условий конкретной задачи или (в случае недостаточности последних) из условия экстремума соответствующего функционала.

3.2.1 Двухстороннее (симметричное) осевое сжатие

Во всех случаях двухстороннего осевого сжатия имеем:

$$v_{z|\beta=\pm 1} = -v, \quad v_{z|\beta=0} = 0,$$

с учетом чего из (5) и (6) следует:

$$a_1 = -(a_3 + a_6 + 1), \quad a_2 = -a_5, \quad a_4 = 0.$$

Подстановка последних результатов в (20) и (21) приводит уравнение к виду:

$$v_r = \frac{1}{2}v\frac{R_H}{h}\gamma\left[1 + (1 - 3\beta^2)\left(a_3 + \frac{1}{2}a_5\gamma^2\right) + a_6(1 - 5\beta^4)\right] + \frac{f(\beta)}{R_H\gamma}, \quad (22)$$

$$v_z = -v\beta\left[1 + (a_3 + a_5\gamma^2)(1 - \beta^2) + a_6(1 - \beta^4)\right], \quad (23)$$

Для сплошного цилиндра (см. рисунок 31а) $v_{r|\gamma=0} = 0$, что дает $f(\beta) = 0$.

При деформации полого цилиндра по схеме (см. рисунок 31б) в общем случае может иметь место как одностороннее, так и двустороннее относительно инструмента течение материала. Смена знака радиальной скорости течения материала происходит при заранее не известном, так называемом критическом радиусе $r = R_k \left(\gamma_k = \frac{R_k}{R_H} \right)$. В этом случае функция $f(\beta)$ может быть определена из

условия $v_{r|\beta=1, \gamma=\gamma_k} = 0$:

$$f(\beta) = \frac{1}{2} v \frac{R_k^2}{h} \left(4a_6 + a_5 \frac{R_k^2}{R_H^2} + 2a_3 - 1 \right), \quad (24)$$

При осевом сжатии полого цилиндра в контейнере (см. рисунок 31в), когда $v_{r|\gamma=1} = 0$, из (22) следует

$$f(\beta) = \frac{1}{2} \frac{v}{h} R_H^2 \left[1 + (1 - 3\beta) \left(a_3 + \frac{1}{2} a_5 \right) + a_6 (1 - 5\beta^4) \right], \quad (25)$$

При осевом сжатии полого цилиндра с оправкой (см. рисунок 31г) в общем случае деформация может происходить как с отрывом материала от оправки, так и без отрыва. Отрыв материала от оправки, очевидно, будет при одностороннем течении материала, сопровождающемся увеличением внутреннего и наружного радиусов заготовки ($R_k < R_b$). В этой ситуации деформация с оправкой по понятным причинам теряет смысл. Если же при деформации без оправки наблюдалось двустороннее течение $\left(R_b < R_k < \frac{R_b + R_H}{2} \right)$, то при наличии оправки будет одностороннее ($R_k = R_b$). В этом случае располагаем граничным условием $v_{r|(r=R_b(\gamma=R_k/R_b))} = 0$, из которого следует

$$f(\beta) = \frac{1}{2} \frac{\nu}{h} R_b^2 \left[1 + (1 - 3\beta^2) \left(a_3 + \frac{1}{2} a_5 \frac{R_b^2}{R_H^2} \right) + a_6 (1 - 5\beta^4) \right], \quad (26)$$

Таким образом, при наличии оправки предварительно должен быть найден критический радиус при сжатии полого цилиндра без оправки. Если в результате получается, что $R_k \geq R_b$, то решение следует повторить, определяя $f(\beta)$ по уравнению (26).

При условии прилипания на контакте с подвижным инструментом во всех рассмотренных случаях $v_{r(\beta=\pm 1)} = 0$. С учетом этого из (22) получим:

$$a_5 = 0, \quad a_3 = \frac{1}{2} - 2a_6. \quad (27)$$

Имея в виду (12) можно записать полученные формулы для случая $f(\beta)$ прилипания. При этом $f(\beta)$ автоматически принимает нулевое значение, и параметр R_k , теряющий смысл в условиях прилипания, исчезает из уравнений.

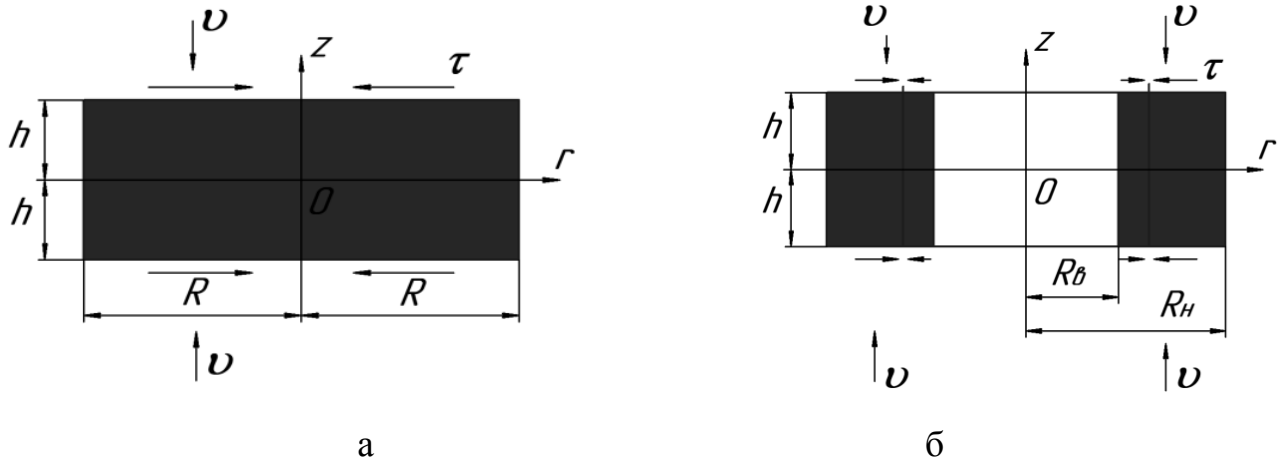
Приведем без доказательств результирующие зависимости для кинематически возможных скоростей в условиях осевого симметричного сжатия с прилипанием.

Двустороннее осевое сжатие сплошного (см. рисунок 31,а) и полого (см. рисунок 31,б) цилиндров:

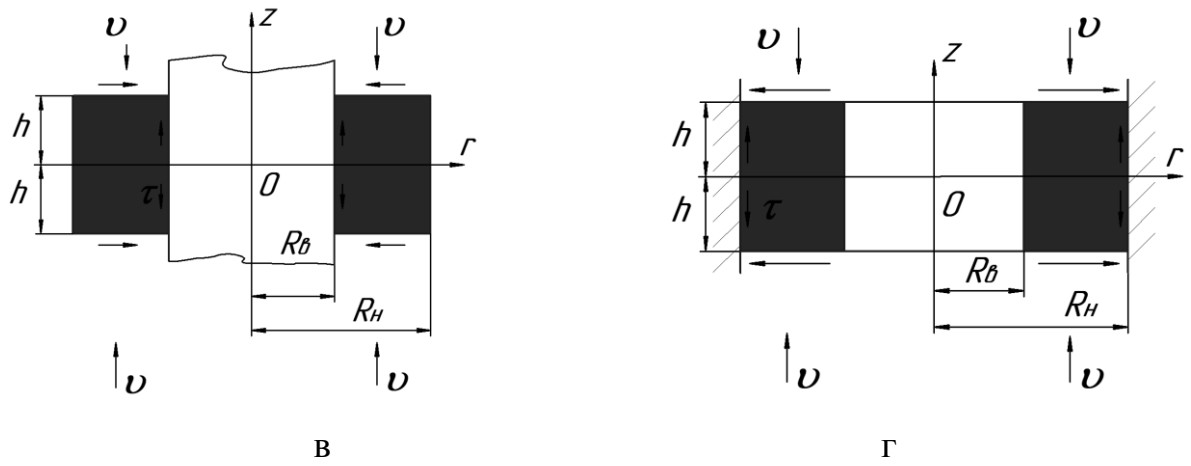
$$v_r = \frac{1}{2} \nu \frac{R_H}{h} \gamma \left[\frac{3}{2} (1 - \beta) + a_6 (6\beta^2 - 5\beta^4 - 1) \right], \quad (28)$$

$$v_z = -\nu \beta \left[\frac{1}{2} (3 - \beta^2) - a_6 (1 - \beta)^2 \right], \quad (29)$$

Двустороннее осевое сжатие сплошного и полого цилиндров



Двустороннее осевое сжатие полого цилиндра в контейнере и с оправкой



Одностороннее осевое сжатие полого цилиндра в контейнере и с оправкой

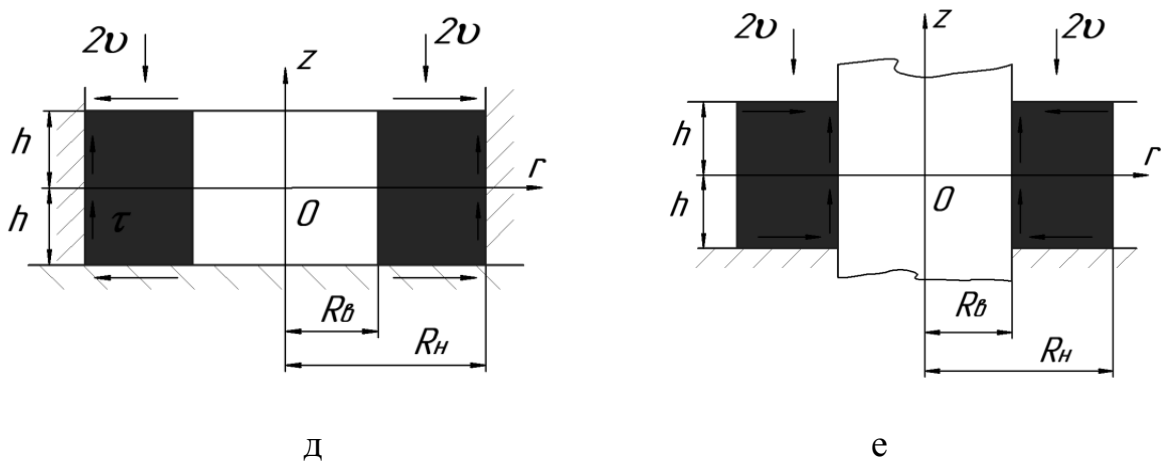


Рисунок 31 - Возможные варианты осевого сжатия

Двустороннее осевое сжатие полого цилиндра в контейнере (см. рисунок 31,в)

$$v_r = \frac{1}{2} v \frac{R_H}{h} \gamma (1 - \gamma^{-2}) \left[\frac{3}{2} (1 - \beta^2) + a_6 (6\beta^2 - 5\beta^4 - 1) \right], \quad (30)$$

Составляющая скорости v_z определяется по (29).

Двустороннее осевое сжатие полого цилиндра с оправкой (см. рисунок 31,г)

$$v_r = \frac{1}{2} v \frac{R_H}{h} \gamma \left(1 - \frac{R_b^2}{R_H^2} \gamma - 2 \right) \left[\frac{3}{2} (1 - \beta^2) + a_6 (6\beta^2 - 5\beta^4 - 1) \right], \quad (31)$$

Составляющая скорости v_z определяется по (29).

При наличии прилипания для всех рассмотренных схем деформации поле скоростей содержит один неизвестный параметр a_6 .

Рассмотрим некоторые простейшие частные случаи, которые используются в дальнейшем в качестве меры сравнения анализируемых вариантов деформации.

Полагая в (28) и (29) $a_6=0$, получаем известные формулы [68], используемые для анализа формоизменения средних (по высоте) цилиндров в условиях прилипания:

$$v_r = \frac{3}{4} v \frac{R_H}{h} \gamma (1 - \beta^2), \quad v_z = -\frac{1}{2} v \beta (3 - \beta^2). \quad (32)$$

Приняв в (22) и (23) $a_3=a_5=a_6=0$, получаем поле скоростей, описывающее однородную деформацию сплошного цилиндра:

$$v_r = \frac{1}{2} v \frac{R_H}{h} \gamma, \quad v_z = -v\beta. \quad (33)$$

Приняв в (22), (23) и (24) $a_3 = a_5 = a_6 = 0$, получаем поле скоростей, описывающее однородную деформацию полого цилиндра при наличии контактного трения:

$$v_r = \frac{1}{2} \nu \frac{R_H}{h} \gamma \left(1 - \frac{R_k^2}{R_H^2} \gamma^{-2} \right), \quad v_z = -\nu \beta. \quad (34)$$

Известны частные случаи, вытекающие из (22) и (23), свидетельствуют о достаточной общности и возможностях предложенного кинематически возможного поля скоростей.

3.2.2 Одностороннее (несимметричное) осевое сжатие

Одностороннее осевое сжатие приводит к несимметричным относительно радиальной оси условиям деформации лишь при наличии «бокового» трения, то есть при осадке в контейнере либо при осадке с оправкой. В остальных случаях схемы осевого двустороннего и одностороннего сжатий будут адекватны с точки зрения напряженно-деформированного состояния.

С учетом особенностей при одностороннем сжатии (см. рисунок 31 д, е) граничных условий ($v_{z|\beta=-1} = 0$, $v_{z|\beta=\pm 1} = -2\nu$) получены следующие зависимости для скоростей, удовлетворяющие условию несжимаемости при любых значениях констант c_i :

$$v_r = -\frac{1}{2} \gamma R_H \frac{\nu}{h} \left[-1 + 2c_1 \beta + c_2 (3\beta^2 - 1) + 4c_3 \beta^3 \right] + \frac{f(\beta)}{\gamma R_H}, \quad (35)$$

$$v_z = -\nu \left[1 + \beta - (\beta^2 - 1)(c_2 \beta + c_1) - c_3 (\beta^4 - 1) \right]. \quad (36)$$

При осадке в контейнере (см. рисунок 31, д) из условия $v_{z|\gamma=1} = 0$ находим:

$$f(\beta) = \frac{1}{2} \frac{\nu}{h} R_H^2 [-1 + 2c_1\beta + c_2(3\beta^2 - 1) + 4c_3\beta^3]. \quad (37)$$

При осадке с оправкой (см. рисунок 31,е) из условия $\nu_{z|\gamma=\gamma_b} = 0$ следует:

$$f(\beta) = \frac{1}{2} \gamma^2 R_H^2 \frac{\nu}{h} [-1 + 2c_1\beta + c_2(3\beta^2 - 1) + 4c_3\beta^3]. \quad (38)$$

При наличии прилипания в обоих рассматриваемых случаях, когда $\nu_{z|\beta=\pm 1} = 0$, константы таковы:

$$c_1 = -2c_3, \quad c_2 = \frac{1}{2}. \quad (39)$$

С учетом (24) при сжатии в контейнере и прилипании итоговые зависимости будут следующими:

$$\nu_r = -\frac{3}{4} \nu \frac{R_H}{h} \gamma \left[(\beta^2 - 1) \left(1 - \frac{8}{3} c_3 \beta \right) \right] (1 - \gamma^{-2}), \quad (40)$$

$$\nu_z = -\nu \left[1 + \frac{3}{2} \beta - 0,5\beta^3 - c_3(\beta^2 - 1) \right]. \quad (41)$$

При деформации с оправкой и прилипании

$$\nu_r = -\frac{3}{4} \frac{\nu}{h} R_H \gamma \left(1 - \frac{\gamma_b^2}{\gamma^2} \right) \left[(\beta^2 - 1) \left(1 + \frac{3}{8} c_3 \beta \right) \right], \quad (42)$$

а ν_z определяется зависимостью (41).

3.3 Статистическая математическая модель

3.3.1 Постановка задачи для создания математической модели статистическим методом

На основании полученных результатов экспериментальных исследований процесса прессования заготовок абразивных кругов на керамической связке создадим математическую модель этого процесса.

Ее необходимость и актуальность заключается в том, что всегда можно с ее применением спрогнозировать и посчитать давление прессования в зависимости от исходных данных.

В соответствии с методами планирования экспериментов [73-94], для построения модели необходимо для начала определиться с переменными (факторами X), влияющими на конечный результат Y . И с самим конечным результатом - основным вычисляемым параметром. Схематически это показано на рисунке 32.

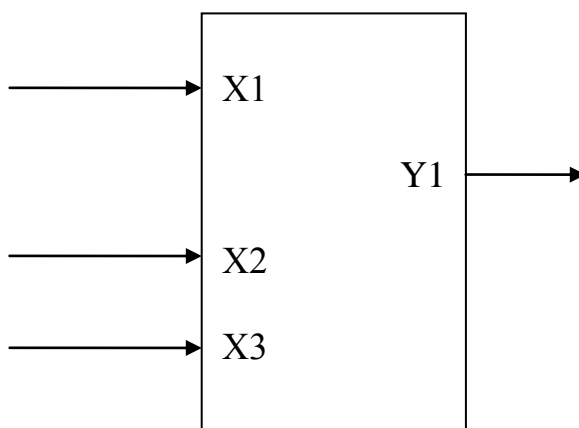


Рисунок 32 - Схема входящих и исходящих параметров

3.3.2 Исходные факторы и критерий исследования

Для получения достоверного результата при минимальном числе экспериментов необходимо определиться с входными переменными, которые прямо влияют на получаемый результат.

В качестве искомого результата выберем давление прессования P как обобщающую переменную, характеризующую весь процесс прессования в целом. Кроме того, давление прессования P позволяет просчитать силовые и энергетические параметры прессования.

В качестве исходных факторов возьмем зернистость, твердость и высоту прессуемой заготовки, поскольку они напрямую влияют на давление прессования. С увеличением зернистости падает давление прессования. С увеличением твердости давление прессования возрастает так же, как и при увеличении высоты прессуемой заготовки. Следовательно, приходим к следующей зависимости:

$$P=f(\text{зернистость, твердость, геометрия})$$

Другие вводные условия:

- 1) эксперимент пассивный, что означает, что производятся традиционные опыты с поочередным варьированием каждого элемента;
- 2) факторы - зернистость, твердость, геометрия;
- 3) объект исследования - прессовка диаметром 50, материал 25А;
- 4) численный критерий исследования (Y) - давление прессования.

Зернистость - 16, 25, 40.

Твердость - СМ, С, СТ.

Геометрия (высота прессовки) - 10, 25, 50.

Фактор X_1 , зернистость, примем как он есть, с неравным интервалом варьирования.

Фактор X_2 , твердость, для удобства оперирования, представим не в виде букв, а в виде дробей, исходя из таблицы 10. Степени твердостей во внимание принимать не будем. Общее количество принятых твердостей - 9.

Фактор X_3 , высоту прессовки, представим в виде отношения высоты прессовки к ее диаметру h/d , также с неравным интервалом варьирования.

Таблица 10 - Кодирование твердости

1	ЧМ	1/9
2	ВМ	2/9
3	М	3/9
4	СМ	4/9
5	С	5/9
6	СТ	6/9
7	Т	7/9
8	ВТ	8/9
9	ЧТ	9/9

3.3.2.1 Поле эксперимента

Ни одно из представленных средних значений не является алгебраически средним. Следовательно, возникает необходимость по разбивке поля эксперимента на участки, как на рисунке 33. Таких полей у нас будет три, поскольку в эксперименте прессовали заготовки трех высот. Затем строим таблицу с записью факторов эксперимента. Для построения таблицы с факторами эксперимента необходимо составить таблицы значений факторов. Таблицы значений факторов приведены в таблицах 11-18.

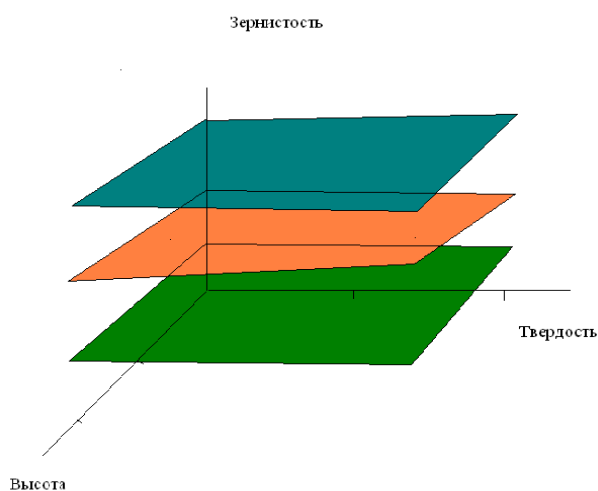


Рисунок 33 - Графическое отображение поля эксперимента

Таблица 11 - Значения факторов

x1	16	25	40
	-	+	
x2	см	с	ст
	-	+	
x3	10	25	50
	-	+	

Таблица 12 - Значения факторов

x1	16	25	40
	-	+	
x2	см	с	ст
	-	+	
x3	10	25	50
		-	+

Таблица 13 - Значения факторов

x1	16	25	40
		-	+
x2	см	с	ст
	-	+	
x3	10	25	50
	-	+	

Таблица 14 - Значения факторов

x1	16	25	40
		-	+
x2	см	с	ст
	-	+	
x3	10	25	50
		-	+

Таблица 15 - Значения факторов

x1	16	25	40
	-	+	
x2	см	с	ст
		-	+
x3	10	25	50
	-	+	

Таблица 16 - Значения факторов

x1	16	25	40
	-	+	
x2	см	с	ст
		-	+
x3	10	25	50
		-	+

Таблица 17 - Значения факторов

x1	16	25	40
		-	+
x2	см	с	ст
		-	+
x3	10	25	50
	-	+	

Таблица 18 - Значения факторов

x1	16	25	40
		-	+
x2	см	с	ст
		-	+
x3	10	25	50
		-	+

3.3.2.2 Реализация модели

Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в таблице 19. В данной таблице рассматриваются следующие факторы: $X_1 = 16, 25$; $X_2 = \text{СМ, С}$; $X_3 = 10\text{мм, } 25\text{мм}$.

Таблица 19 - Интервалы кодирования факторов

Факторы	X_1 , зернистость	X_2 , отношение твердости	X_3 , отношение h/d
Основной уровень (X_{i0})	20,5	9/18	0,35
Интервал варьирования (ΔX_i)	4,5	1/18	0,15
Верхний уровень ($X_{i=1}$)	25	5/9	0,5
Нижний уровень ($X_{i=-1}$)	16	4/9	0,2

Кодированные значения факторов (x_i) связаны с натуральными (X_i) соотношениями:

$$x_i = (X_i - X_{0i})/\Delta X_i, \quad (43)$$

отсюда:

$$x_1 = (X_1 - 20,5)/4,5; \quad x_2 = (X_2 - 9/18)/(1/18); \quad x_3 = (X_3 - 0,35)/0,15 \quad (44)$$

Также возьмем во внимание парные взаимодействия факторов $x_1 x_2$, поскольку модель, судя по составленным ранее графикам, не является линейной.

3.3.2.3 Уравнение регрессии

Математическую модель процесса будем искать в виде:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_j x_i x_j, \quad (45)$$

где b_0 и b_i - коэффициенты математической модели.

Количество опытов имеем из экспериментального исследования процесса прессования.

Для задания исходных данных составим план факторного эксперимента в натуральном (таблица 20) и в кодовом масштабах (таблица 21).

Таблица 20 - План факторного эксперимента в натуральном масштабе

Номер опыта	Натуральный масштаб				Функция отклика, Р, кН
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1		16	4/9	0,2	31,36
2		16	4/9	0,5	37,44
3		16	5/9	0,2	46,55
4		16	5/9	0,5	43,71
5		25	4/9	0,2	46,55
6		25	4/9	0,5	29,99
7		25	5/9	0,2	45,57
8		25	5/9	0,5	42,53

Таблица 21 - План факторного эксперимента в кодовом масштабе

Номер опыта	Кодовый масштаб					Функция отклика, Р, кН
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	Y
1	+	-	-	-	+	31,36
2	+	-	-	+	+	37,44
3	+	-	+	-	-	46,55
4	+	-	+	+	-	43,71
5	+	+	-	-	-	46,55
6	+	+	-	+	-	29,99
7	+	+	+	-	+	45,57
8	+	+	+	+	+	42,53

Получаем систему уравнений:

- 1) $b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 31,36$;
- 2) $b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 37,44$;
- 3) $b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 46,55$;
- 4) $b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 43,71$;
- 5) $b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 46,55$;
- 6) $b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 29,99$;
- 7) $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 45,57$;
- 8) $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 42,53$.

Рассчитаем коэффициенты:

$$b_0 = (\sum x_0 Y_i) / n; \quad b_i = (\sum x_i x_j Y_i) / n, \quad (46)$$

Таким образом, после реализации факторного эксперимента получаем коэффициенты регрессии (таблица 22),

Таблица 22 - Коэффициенты регрессии

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Y	40,96	0,07	0,42	-0,21	-0,13

и уравнение регрессии:

$$Y = 40,96 - 0,07x_1 + 0,42x_2 - 0,21x_3 - 0,13x_1x_2, \quad (47)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 1,35X_1 + 78,58X_2 - 5,33h/d - 2,94X_1X_2 - 30,33, \quad (48)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем по всем строкам плана эксперимента:

а) определим среднее значение по строкам

$$Y_u = (\sum Y_{ug})/r_u, Y_u = 40,46; \quad (49)$$

б) отклонение значений функций отклика:

$$\Delta Y_{ug} = Y_{ug} - Y_u; \quad (50)$$

в) дисперсии:

$$S^2 = (\sum \Delta Y_{ug}^2)/(r_u - 1); \quad (51)$$

г) среднеквадратичные отклонения:

$$SY_u = \sqrt{S^2 Y_u} \quad (52)$$

д) расчетные значения критерия Стьюдента:

$$t_{ug} = \Delta Y_{ug} / SY_u \quad (53)$$

Для пунктов б, д составим таблицу 23 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365. Полученное значение показывает, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 23 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
31,36	-9,10	-1,35
37,44	-3,02	-0,45
46,55	6,09	0,90
43,71	3,25	0,48
46,55	6,09	0,90
29,99	-10,47	-1,56
45,57	5,11	0,76
42,53	2,07	0,31

Составим таблицу погрешности (таблица 24).

Таблица 24 - Таблица погрешности

	Давление по эксперименту, кН	Расчетное давление, кН	Процент погрешности
1	31,36	36,46	14,0
2	37,44	32,34	15,8
3	46,55	47,24	1,5
4	43,71	43,12	1,4
5	46,55	40,38	15,3
6	29,99	36,26	17,3
7	45,57	46,06	1,1
8	42,53	41,94	1,4

Средний процент погрешности составляет 8,5 %.

В соответствии с таблицами значений факторов (таблицы 11-18), составим планы факторного эксперимента и найдем уравнение давления прессования для остальных участков массива.

Факторы: $X_1 = 16,25$; $X_2 = \text{СМ, С}$; $X_3 = 25\text{мм, } 50\text{мм}$.

Таблица 25 - Интервалы кодирования факторов

Факторы	X_1 , зернистость	X_2 , отношение твердости	X_3 , отношение h/d
Основной уровень (X_{i0})	20,5	9/18	0,75
Интервал варьирования (ΔX_i)	4,5	1/18	0,25
Верхний уровень ($X_i=1$)	25	5/9	1,0
Нижний уровень ($X_i=-1$)	16	4/9	0,5

Таблица 26 - План факторного эксперимента в натуральном масштабе

Номер опыта	Натуральный масштаб				Функция отклика, Р, кН
	X_0	X_1	X_2	X_3	Y
1		16	4/9	0,5	37,44
2		16	4/9	1,0	50,67
3		16	5/9	0,5	43,71
4		16	5/9	1,0	50,86
5		25	4/9	0,5	29,99
6		25	4/9	1,0	35,08
7		25	5/9	0,5	42,53
8		25	5/9	1,0	63,41

Таблица 27 - План факторного эксперимента в кодовом масштабе

Номер опыта	Кодовый масштаб					Функция отклика, Р, кН
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	Y
1	+	-	-	-	+	37,44
2	+	-	-	+	+	50,67
3	+	-	+	-	-	43,71
4	+	-	+	+	-	50,86
5	+	+	-	-	-	29,99
6	+	+	-	+	-	35,08
7	+	+	+	-	+	42,53
8	+	+	+	+	+	63,41

Получаем систему уравнений:

- 1) $b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 37,44$;
- 2) $b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 50,67$;
- 3) $b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 43,71$;
- 4) $b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 50,86$;
- 5) $b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 29,99$;
- 6) $b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 35,08$;
- 7) $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 42,53$;
- 8) $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 63,41$.

Получаем коэффициенты регрессии (таблица 28),

Таблица 28 - Коэффициенты регрессии

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Y	44,20	-0,15	0,60	0,59	0,44

и уравнение регрессии:

$$Y = 44,20 - 0,15x_1 + 0,60x_2 + 0,59x_3 + 0,44x_1x_2, \quad (54)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 16,45 - 0,91X_1 - 25,28X_2 + 3,93h/d + 1,76X_1X_2, \quad (55)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем значения критерия Стьюдента и составим таблицу 29 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365. Полученное значение показывает, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 29 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
37,44	-6,77	-0,64
50,67	6,46	0,61
43,71	-0,50	-0,05
50,86	6,65	0,63
29,99	-14,22	-1,34
35,08	-9,13	-0,86
42,53	-1,68	-0,16
63,41	19,20	1,81

Составим таблицу погрешности (таблица 30).

Таблица 30 - Таблица погрешности

	Давление по эксперименту, кН	Расчетное давление, кН	Процент погрешности
1	37,44	38,32	2,3
2	50,67	49,88	1,6
3	43,71	41,45	5,4
4	50,86	53,02	4,1
5	29,99	26,75	12,1
6	35,08	38,32	8,4
7	42,53	47,14	9,8
8	63,41	58,70	8,0

Средний процент погрешности составляет 6,5%.

Факторы: $X_1 = 25, 40$; $X_2 = \text{СМ, С}$; $X_3 = 10\text{мм, } 25\text{мм}$.

Таблица 31 - Интервалы кодирования факторов

Факторы	X_1 , зернистость	X_2 , отношение твердости	X_3 , отношение h/d
Основной уровень (X_{i0})	32,5	9/18	0,35
Интервал варьирования (ΔX_i)	7,5	1/18	0,15
Верхний уровень ($X_i=1$)	40	5/9	0,5
Нижний уровень ($X_i=-1$)	25	4/9	0,2

Таблица 32 - План факторного эксперимента в натуральном масштабе

Номер опыта	Натуральный масштаб				Функция отклика, Р, кН
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1		25	4/9	0,2	46,55
2		25	4/9	0,5	29,99
3		25	5/9	0,2	45,57
4		25	5/9	0,5	42,53
5		40	4/9	0,2	43,51
6		40	4/9	0,5	31,36
7		40	5/9	0,2	22,25
8		40	5/9	0,5	19,21

Таблица 33 - План факторного эксперимента в кодовом масштабе

Номер опыта	Кодовый масштаб					Функция отклика, Р, кН
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	Y
1	+	-	-	-	+	46,55
2	+	-	-	+	+	29,99
3	+	-	+	-	-	45,57
4	+	-	+	+	-	42,53
5	+	+	-	-	-	43,51
6	+	+	-	+	-	31,36
7	+	+	+	-	+	22,25
8	+	+	+	+	+	19,21

Получаем систему уравнений:

$$1) b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 46,55;$$

$$2) b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 29,99;$$

$$3) b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 45,57;$$

$$4) b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 42,53;$$

$$5) b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 43,51;$$

$$6) b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 31,36;$$

$$7) b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 22,25;$$

$$8) b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 19,21.$$

Получаем коэффициенты регрессии (таблица 34),

Таблица 34 - Коэффициенты регрессии

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Y	35,08	-0,62	-0,28	-0,44	-0,57

и уравнение регрессии:

$$Y = 35,08 - 0,62x_1 - 0,28x_2 - 0,44x_3 - 0,57x_1x_2, \quad (56)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = X_1 + 41,70X_2 - 2,93h/d - 2,28X_1X_2 - 13,42, \quad (57)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем значения критерия Стьюдента и составим таблицу 35 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365. Полученное значение показывает, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 35 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
46,55	11,43	1,05
29,99	-5,13	-0,47
45,57	10,45	0,96
42,53	7,41	0,68
43,51	8,39	0,77
31,36	-3,76	-0,35
22,25	-12,87	-1,19
19,21	-15,91	-1,47

Составим таблицу погрешности (таблица 36).

Таблица 36 - Таблица погрешности

	Давление по эксперименту, кН	Расчетное давление, кН	Процент погрешности
1	46,55	42,63	9,2
2	29,99	34,01	11,8
3	45,57	48,31	5,7
4	42,53	39,69	7,2
5	43,51	41,65	4,5
6	31,36	33,03	5,0
7	22,25	24,99	11,0
8	19,21	16,37	17,4

Средний процент погрешности составляет 9,0%.

Факторы: $X_1 = 25, 40$; $X_2 = \text{СМ, С}$; $X_3 = 25\text{мм, } 50\text{мм}$.

Таблица 37 - Интервалы кодирования факторов

Факторы	X_1 , зернистость	X_2 , отношение твёрдости	X_3 , отношение h/d
Основной уровень (X_{i0})	32,5	9/18	0,75
Интервал варьирования (ΔX_i)	7,5	1/18	0,25
Верхний уровень ($X_i=1$)	40	5/9	1,0
Нижний уровень ($X_i=-1$)	25	4/9	0,5

Таблица 38 - План факторного эксперимента в натуральном масштабе

Номер опыта	Натуральный масштаб				Функция отклика, P, кН
	X_0	X_1	X_2	X_3	Y
1		25	4/9	0,5	29,99
2		25	4/9	1,0	35,08
3		25	5/9	0,5	42,53
4		25	5/9	1,0	63,41
5		40	4/9	0,5	31,85
6		40	4/9	1,0	29,79
7		40	5/9	0,5	19,21
8		40	5/9	1,0	24,30

Таблица 39 - План факторного эксперимента в кодовом масштабе

Номер опыта	Кодовый масштаб					Функция отклика, P, кН
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	Y
1	+	-	-	-	+	29,99
2	+	-	-	+	+	35,08
3	+	-	+	-	-	42,53
4	+	-	+	+	-	63,41
5	+	+	-	-	-	31,85
6	+	+	-	+	-	29,79
7	+	+	+	-	+	19,21
8	+	+	+	+	+	24,30

Получаем систему уравнений:

$$1) b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 29,99;$$

$$2) b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 35,08;$$

$$3) b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 42,53;$$

$$4) b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 63,41;$$

$$5) b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 31,85;$$

$$6) b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 + b_3x_3 - b_4x_1x_2 = 29,79;$$

$$7) b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 - b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 19,21;$$

$$8) b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 = 24,30.$$

Получаем коэффициенты регрессии (таблица 40),

Таблица 40 - Коэффициенты регрессии

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Y	34,50	-0,84	0,29	0,37	-0,75

и уравнение регрессии:

$$Y = 34,50 - 0,84x_1 + 0,29x_2 + 0,37x_3 - 0,75x_1x_2, \quad (58)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 1,31X_1 + 66,72X_2 - 2,47h/d - 3X_1X_2 - 26,87, \quad (59)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем значения критерия Стьюдента и составим таблицу 41 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365.

Полученное значение показывает, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 41 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
29,99	-4,53	-0,33
35,08	0,56	0,04
42,53	8,01	0,59
63,41	28,89	2,13
31,85	-2,67	-0,20
29,79	-4,73	-0,35
19,21	-15,31	-1,13
24,30	-10,22	-0,75

Составим таблицу погрешности (таблица 42).

Таблица 42 - Таблица погрешности

	Давление по эксперименту, кН	Расчетное давление, кН	Процент погрешности
1	29,99	28,91	3,7
2	35,08	36,16	3,0
3	42,53	49,29	13,7
4	63,41	56,55	12,1
5	31,85	27,15	17,3
6	29,79	34,40	13,4
7	19,21	18,13	5,9
8	24,30	25,38	4,2

Средний процент погрешности составляет 9,2 %.

На примере вышеприведенных расчетов сделаем вычисления для остальных интервалов модели.

Факторы: $X_1 = 16, 25$; $X_2 = C, CT$; $X_3 = 10\text{мм}, 25\text{мм}$.

Уравнение регрессии:

$$Y = 50,67 - 0,02x_1 + 0,87x_2 + 0,01x_3 + 0,28x_1x_2, \quad (60)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 87,12 - 0,564X_1 - 7,30X_2 - 0,07h/d + 1,12X_1X_2, \quad (61)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем значения критерия Стьюдента и составим таблицу 43 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365. Полученное значение показывает, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 43 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
46,55	-6,76	-0,64
43,71	-9,60	-0,91
54,69	1,38	0,13
69,87	16,56	1,56
45,57	-7,74	-0,73
42,53	-10,78	-1,02
66,83	13,52	1,28
56,71	3,40	0,32

Средний процент погрешности составляет 12,9 %.

Факторы: $X_1 = 16, 25$; $X_2 = C, CT$; $X_3 = 25\text{мм}, 50\text{мм}$.

Уравнение регрессии:

$$Y = 57,23 - 0,14x_1 + 0,73x_2 + 0,41x_3 - 0,43x_1x_2, \quad (62)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 0,83X_1 + 48,40X_2 + 2,73h/d - 1,72X_1X_2 - 18,68, \quad (63)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем значения критерия Стьюдента и составим таблицу 44 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365. Полученное значение показывает, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 44 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
43,71	-13,52	-1,25
50,86	-6,37	-0,59
69,87	12,64	1,17
70,01	12,78	1,19
42,53	-14,70	-1,36
63,41	6,18	0,57
56,71	-0,52	-0,05
60,76	3,53	0,33

Средний процент погрешности составляет 5,5%.

Факторы: $X_1 = 25, 40$; $X_2 = C, CT$; $X_3 = 10\text{мм}, 25\text{мм}$.

Уравнение регрессии:

$$Y = 45,08 - 0,80x_1 + 1,30x_2 - 0,38x_3 + 0,39x_1x_2, \quad (64)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 46,22 - 0,96X_1 - 8,58X_2 - 2,53h/d + 1,56X_1X_2, \quad (65)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем значения критерия Стьюдента и составим таблицу 45 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365. Исходя из этого, видим, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 45 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
45,57	0,50	0,03
42,53	-2,54	-0,15
66,83	21,76	1,27
56,71	11,64	0,68
22,25	-22,82	-1,34
19,21	-25,86	-1,51
60,37	15,30	0,90
47,09	2,02	0,12

Средний процент погрешности составляет 5,9%.

Факторы: $X_1 = 25, 40$; $X_2 = C, CT$; $X_3 = 25\text{мм}, 50\text{мм}$.

Уравнение регрессии:

$$Y = 45,18 - 1,09x_1 + 0,80x_2 + 0,39x_3 + 0,51x_1x_2, \quad (66)$$

Получим уравнение с действительными коэффициентами для расчета усилия:

$$P = 22,38 - 1,26X_1 - 27,42X_2 + 2,60h/d + 2,04X_1X_2, \quad (67)$$

Для выявления грубых ошибок и проверки значимости результатов рассчитаем значения критерия Стьюдента и составим таблицу 46 проверки значимости результатов.

Уровень значимости примем в пределах $0,1 \dots 0,05$. Степень свободы примем равным 7. Критерий Стьюдента по таблице в таком случае будет равен 2,365. Полученное значение показывает, что грубых ошибок в результатах эксперимента нет, поскольку все полученные значения t_{ug} меньше 2,365.

Таблица 46 - Проверка значимости результатов

Y_{ug}	ΔY_{ug}	t_{ug}
42,53	-2,67	-0,16
63,41	18,21	1,12
56,71	11,51	0,71
60,76	15,56	0,96
19,21	-25,99	-1,61
24,30	-20,90	-1,29
47,09	1,89	0,12
47,60	2,40	0,15

Средний процент погрешности составляет 7,0 %.

Средний процент погрешности по модели в целом составляет 8,1 %, что позволяет сказать, что полученные уравнения регрессии с достаточной точностью описывают процесс прессования.

3.3.2.4 Анализ полученной математической модели и результатов

В качестве проверки просчитаем соответствие расчетного давления прессования, измеренному, на примере прессовки с параметрами 16СМ50, со смазкой. Смазка, как показывает лабораторное исследование, уменьшает давление прессования на 10 % (таблица 3). Применим полученное уравнение:

$$P=16,45-0,91X_1-25,28X_2+3,93h/d+1,76X_1X_2;$$

$$P=56,74\text{кН.}$$

С учетом применения смазки уменьшим полученный результат на 10 %, получим 50,96 кН. Измеренное усредненное давление прессования составляет 45,57 кН. Разница между просчитанным и измеренным значениями составляет 10,6%, что позволяет оценить полученную модель как годную к применению.

Относительная степень влияния факторов на давление прессования изображена на рисунках 34-42.

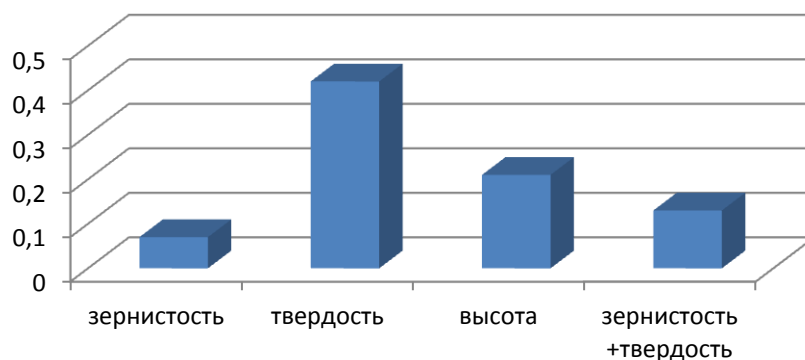


Рисунок 34 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P, интервалы 16-25; СМ-С; 10-25

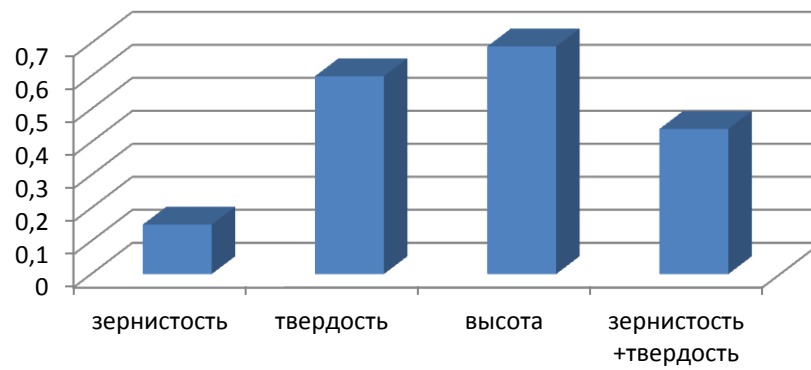


Рисунок 35 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , интервалы 16-25; SM-C; 25-50

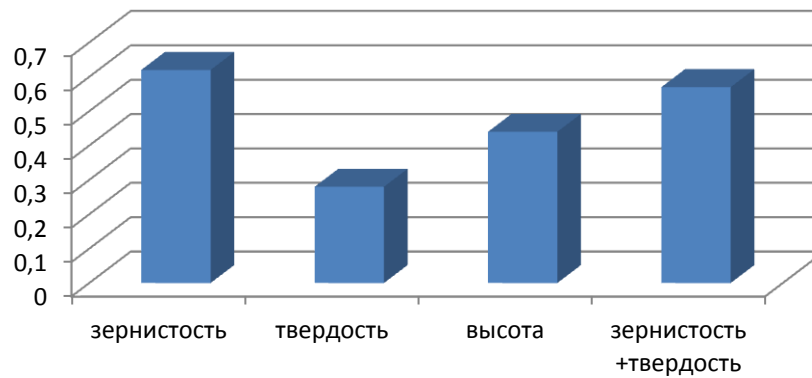


Рисунок 36 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , интервалы 25-40; SM-C; 10-25

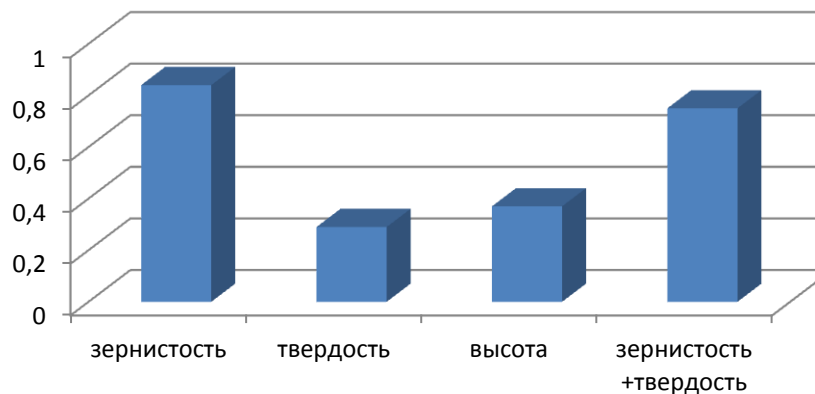


Рисунок 37 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , интервалы 25-40; SM-C; 25-50

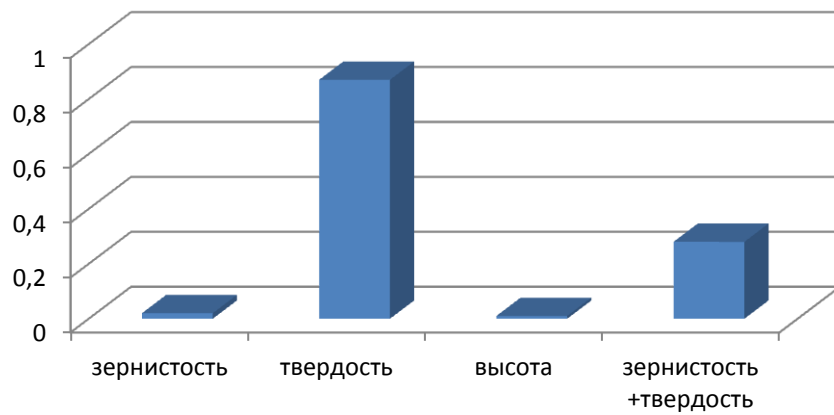


Рисунок 38 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , интервалы 16-25; С-СТ; 10-25

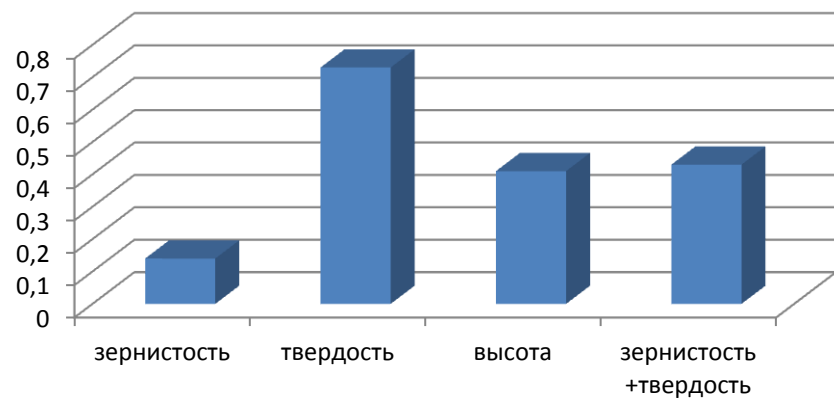


Рисунок 39 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , интервалы 16-25; С-СТ; 25-50

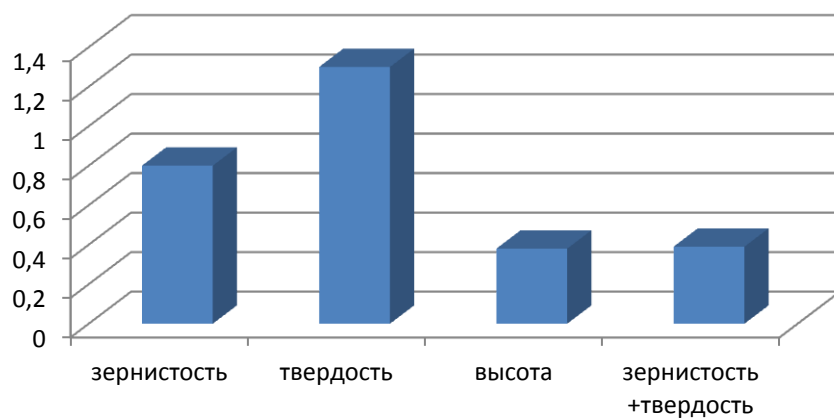


Рисунок 40 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , интервалы 25-40; С-СТ; 10-25

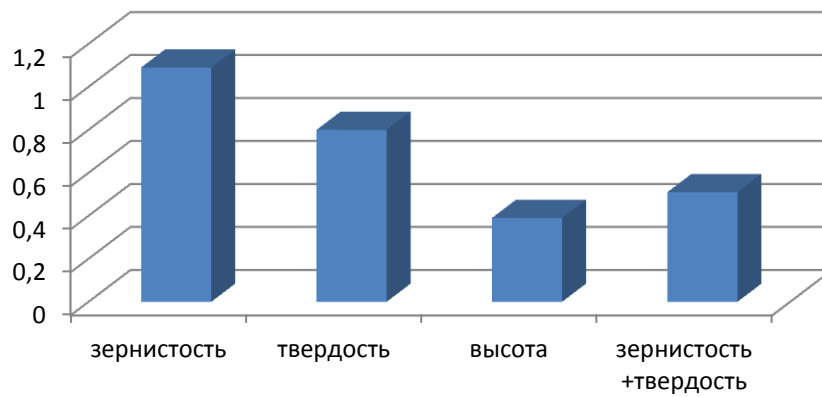


Рисунок 41 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , интервалы 25-40; C-ST; 25-50

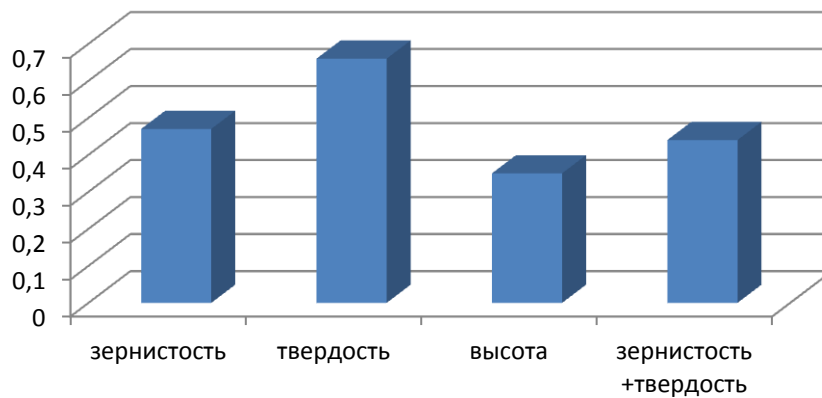


Рисунок 42 - Относительная степень влияния факторов на давление прессования P , средние значения по модели по всем интервалам

Из анализа представленных диаграмм выявлено, что наибольшее влияние на величину давления прессования оказывает планируемая твердость заготовки, затем зернистость основного материала, затем их совокупный фактор, а только потом высота прессуемой заготовки.

Зная, как рассчитывается материальный состав заготовки, можно сказать, что это соответствует действительности, поскольку для получения каждой последующей степени твердости инструмента добавляют по 2 % связки, которая работает как снижающий трение материал.

Зернистость также имеет большое значение, поскольку с уменьшением размера зерна увеличивается количество режущих граней в объеме инструмента,

что увеличивает давление прессования, которое необходимо приложить для преодоления сил трения всех частиц.

После твердости и зернистости, на давление прессования оказывает влияние высота прессовки, что тоже предполагаемо, так как с увеличением высоты увеличивается площадь контактного трения на стенках инструмента и межчастичное трение в заготовке.

На рисунках 43-45 представлены графики зависимостей давления прессования от зернистости при одинаковых высотах и твердостях, полученные по результатам моделирования.

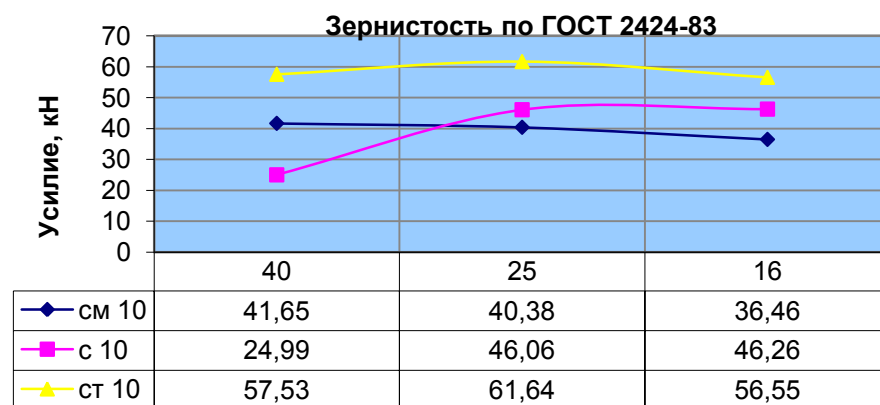


Рисунок 43 - График зависимости давления прессования от зернистости при высотах 10 и твердостях СМ, С, СТ

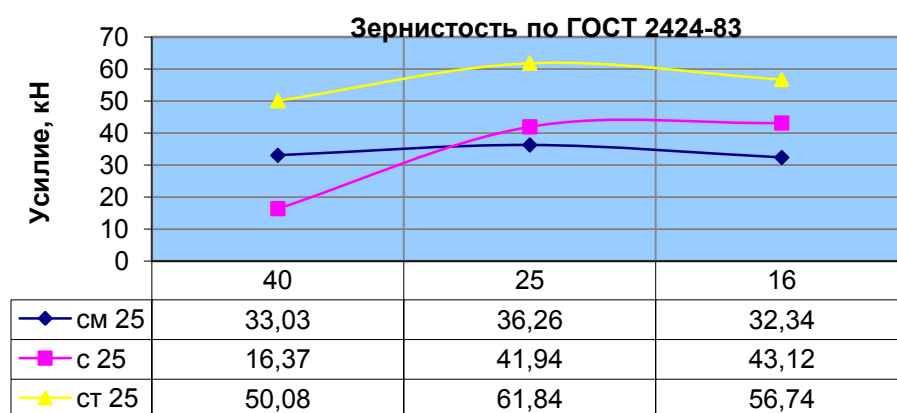


Рисунок 44 - График зависимости давления прессования от зернистости при высотах 25 и твердостях СМ, С, СТ

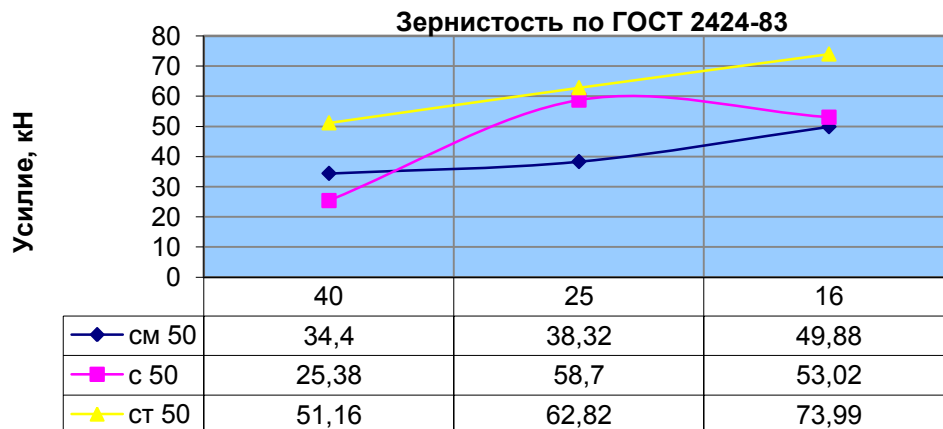


Рисунок 45 - График зависимости давления прессования от зернистости при высотах 50 и твердостях CM, C, CT

3.4 Выводы по главе

1. Разработана оригинальная математическая модель, учитывающая различный характер взаимодействия уплотняемой смеси с поверхностью инструмента. Предложенная модель позволяет исследовать влияние сил поверхностного взаимодействия среды и инструмента на напряженно-деформируемое состояние, возникающее внутри прессуемой заготовки. Модель дает возможность определить параметры процесса прессования, при которых весь объем прессуемого порошка вовлекается в процесс уплотнения, а также рассчитать напряженно-деформируемое состояние, которое следует сообщить уплотняемой смеси, чтобы получить изделие требуемых размеров. Разработанные алгоритмы и программы могут быть положены в основу оптимизации процесса холодного формования порошковых абразивных смесей при различных критериях оптимизации.

2. Представлены зависимости для поля скоростей для возможных вариантов осевого сжатия, с единым подходом.

3. На основании данных экспериментальных исследований процесса прессования, приведенных в главе 2, построены математические модели на

основании статистических методов, которые описывают процесс прессования заготовок абразивного инструмента на керамической связке.

Достигнутые результаты - погрешность математических моделей колеблется от 5,5 % до 12,9 % и в среднем составляет 8,1 %. Низкий процент погрешности результата говорит о том, модели соответствуют действительному положению производства и о том, что измеренные показания, снятые при прессовании образцов, соответствуют реальным заготовкам абразивных кругов.

Поскольку математических моделей для процесса прессования заготовок абразивного инструмента на керамической связке ранее никто не строил, то можно сказать, что подобные модели представлены впервые.

Как показывают коэффициенты уравнений модели, на величину давления прессования оказывают наибольшее влияние твердость получаемой заготовки и зернистость, из которой она прессуется. И только потом - высота самой заготовки.

В связи с допустимым процентом сходимости, полученные результаты можно применять на практике в производстве для планирования нагрузки на оборудование и пресс-оснастку при прессовании.

4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБОТКА НОВЫХ УСТРОЙСТВ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА

4.1 Технологии и устройства для равномерной укладки и разравнивания абразивной массы в пресс-форме

Как уже было указано выше, поскольку все абразивные смеси имеют малую текучесть, то выполнить их равномерную укладку в пресс-формы достаточно сложно. Даже незначительная неравномерность в укладке смеси приводит в полученных заготовках и готовых кругах к разности внутренних напряжений, неравномерной плотности и, как следствие, твердости, неравномерной структуре и дисбалансу массы кругов, что проявляется в их неуравновешенности в процессе эксплуатации [95].

Среди важных проблем совершенствования отечественной абразивной промышленности, как это указано в работе [96], опубликованной РАН в избранных трудах Российской школы, является совершенствование операций укладки и разравнивания абразивной смеси на керамической связке в пресс-форме перед прессованием.

В связи с этим на уровне изобретения предложено устройство для укладки и разравнивания абразивной смеси в пресс-форме.

Из загрузочного устройства смесь подается, укладывается и разравнивается послойно барабаном в виде усеченного конуса с ячеистой поверхностью. Каждый слой высотой от 1 до 3 мм одновременно заполняет все поперечное сечение полости пресс-формы, предназначенной, например, для получения круга типа 1.

Устройство новой конструкции, выполненное в соответствии с патентом [97] для подачи, укладки и разравнивания смеси в пресс-форме (рисунок 46 и рисунок 47), состоит из бункера 1 с наклонными боковыми стенками барабана 2, который выполнен в виде усеченного конуса. Вершина конуса направлена в сторону оси пресс-формы. Поверхность барабана 2 выполнена с равномерно

расположенными ячейками 3 (см. рисунок 48). Диаметры барабана d_1 и d_2 (см. рисунки 46, 49) пропорциональны расстоянию от оси пресс-формы R_1 и R_2 . Устройство снабжено приводом 4 вращательного движения барабана 2 вокруг своей оси по направляющим 5 вращательного движения вокруг оси пресс-формы бункера 1 и его возвратно-поступательного движения в радиальном направлении относительно оси пресс-формы.

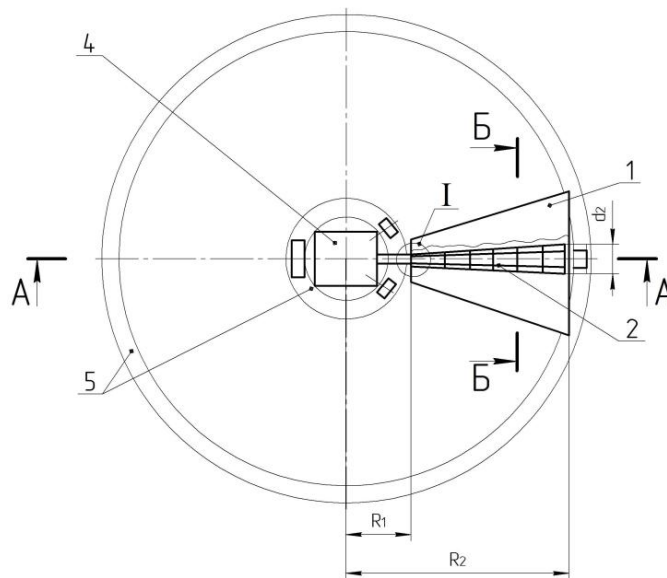


Рисунок 46 - Вид сверху на пресс-форму и устройство для укладки абразивной смеси: 1-бункер; 2-барабан; 4-привод; 5-направляющие

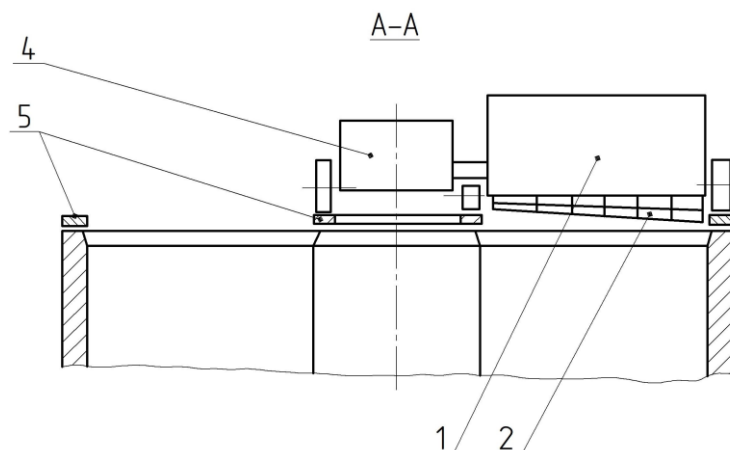


Рисунок 47 - Вид сбоку (сеч. А - А рис. 46) на пресс-форму и устройство для укладки абразивной смеси

Устройство работает следующим образом. В бункер 1, установленный над пресс-формой, засыпается абразивная масса. После включения привода 4 бункер 1 начинает вращаться вокруг оси пресс-формы и совершать возвратно-поступательные перемещения в радиальном направлении относительно неё по направляющим 5. Одновременно вокруг своей оси вращается конический барабан 2, который через ячейки 3 укладывает абразивную массу из бункера 1 (рисунок 46) в пресс-форму.

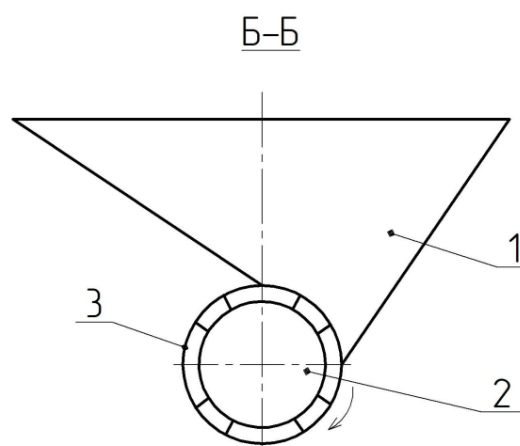


Рисунок 48 - Сечение Б - Б из рисунка 46

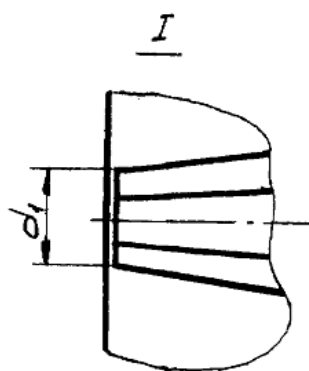


Рисунок 49 - Элемент барабана I из рисунка 46

Разработан рабочий проект и изготовлен опытный образец предлагаемого устройства для пресс-формы с наружным диаметром 403 мм и внутренним диаметром 128 мм. Минимальный диаметр барабана - 15 мм, максимальный - 47 мм. Длина барабана - 135 мм, высота бункера - 150 мм. Площадь поперечного

сечения бункера у наименьшего диаметра барабана - 5823,29 мм². Площадь поперечного сечения бункера у наибольшего диаметра барабана - 18246,31 мм². Ширина бункера у наименьшего диаметра барабана - 50 мм. Ширина бункера у наибольшего диаметра барабана - 181 мм. Глубина ячейки - 1 мм.

Предлагаемое устройство прошло опытно-промышленное опробование в промышленных условиях и может найти применение в абразивной промышленности России при изготовлении кругов из абразивной массы.

Результаты опытно-промышленного опробования показали, что новая конструкция более проста и менее металлоемка по сравнению с известными устройствами. За счет того, что поверхность барабана выполнена с равномерно расположенными ячейками, барабан имеет вид усеченного конуса, бункер наклонные стенки, а диаметры барабана и площади поперечного сечения бункера пропорциональны расстоянию от оси пресс-формы, повышается равномерность укладки абразивной массы в пресс-форму.

4.2 Устройство для формования в одной пресс-форме нескольких типоразмеров заготовок абразивных кругов

Известные пресс-формы включают основные и дополнительные рабочие детали. Так, на рисунке 8 показана пресс-форма, в которой между верхним пуансоном и верхней рабочей плитой 2 установлена дополнительная плита 4. Эта дополнительная плита в процессе прессования заготовки выполняет важную технологическую роль. На высоту дополнительной плиты можно уменьшить ход пуансона верхнего цилиндра пресса, что, естественно, увеличивает его производительность и снижает энергозатраты на процесс формования заготовок. Дополнительные плиты повышают износостойкость рабочих плит, так как имеют достаточно большую высоту (до 200 мм). Максимальный диаметр их часто превышает 1000 мм, поэтому их масса часто достигает нескольких сот кг. При сортаменте кругов только типа 1, выпускаемых абразивными предприятиями России, количество таких плит превышает несколько сот наименований. В связи с

этим возникают проблемы строительства помещений для хранения дополнительных плит. Возникают проблемы с их транспортировкой, с монтажом в пресс-форму и демонтажем после прессования.

Поскольку дополнительные плиты, изготовленные из стали, имеют большую массу и их сложно монтировать в пресс-форму, то в последние годы для кругов диаметром более 400 мм дополнительные плиты изготавливают из алюминиевых сплавов марок АЛ4 или АЛ9, что, конечно, увеличивает их стоимость.

Из ГОСТ 2424-83 видно, что многие круги (более 20) одного наружного диаметра имеют внутренние диаметры от 2-х до 5-ти разных размеров. Это означает, что пресс-форма одного диаметра матрицы имеет до 5 дополнительных плит одного наружного диаметра и разных внутренних диаметров.

В соответствии с патентом [98] предложено устройство для формования в одной матрице пресс-формы и одной дополнительной плитой несколько типоразмеров абразивных кругов одного наружного диаметра и разных внутренних диаметров.

Формование в пресс-форме с дополнительной плитой одного наружного диаметра прессовок разного внутреннего диаметра достигается за счет того, что внутренний диаметр дополнительной плиты выполнен регулируемым.

Устройство пресс-формы (рисунок 50), содержащее матрицу 1, сердечник 2, верхнюю 3 и нижнюю 4 формовочные плиты и дополнительную плиту 5 новой конструкции.

Конструкция дополнительной плиты (рисунок 51) выполнена в виде кольца 6, поворотных секторов 7 на осях 8 и механизмов поворота секторов.

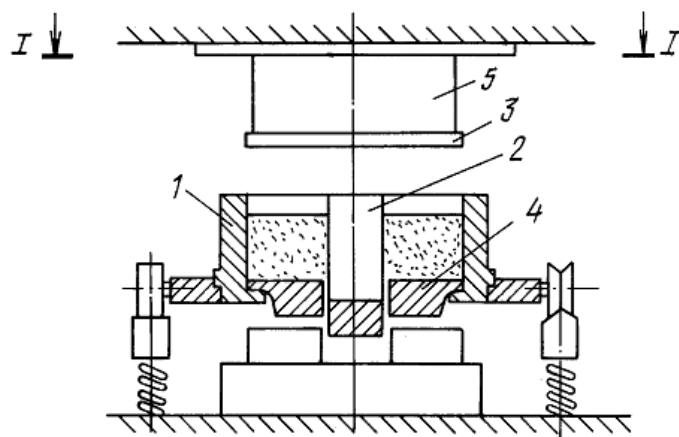


Рисунок 50 - Общий вид пресс-формы:

1 - матрица; 2 - сердечник; 3 и 4 - верхняя и нижняя формовочные плиты;
5 - дополнительная плита новой конструкции

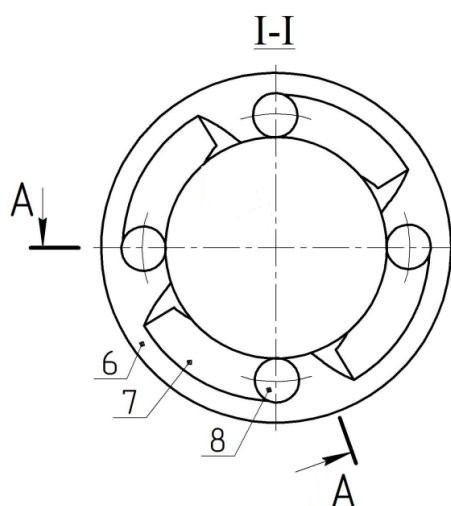


Рисунок 51 - Сечение I - I рис. 49, вид по стрелкам:

6 - кольцо плиты; 7 - поворотные сектора; 8 - оси поворотных секторов;
9 - пазы для размещения секторов

При повороте секторов 7 с помощью синхронных механизмов на плите может быть установлен любой заданный заранее внутренний диаметр с помощью сердечника пресс-формы (см. рисунок 52).

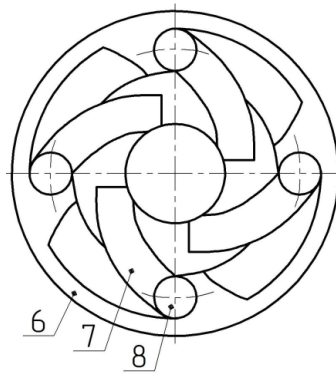


Рисунок 52 - Дополнительная плита с малым диаметром внутреннего отверстия

На рисунке 53 показан продольный разрез дополнительной плиты, на котором видны шестерня 9 и зубчатое колесо 10 механизма синхронного поворота секторов.

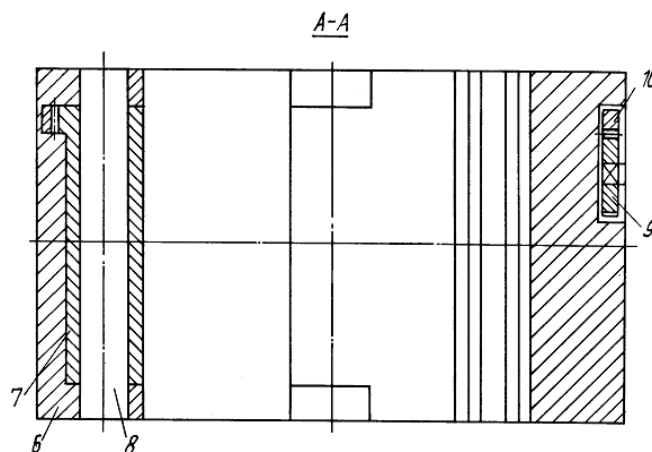


Рисунок 53 - Продольное сечение А - А рис. 50 дополнительной плиты

Спроектирован, изготовлен и опробован в работе опытный образец пресс-формы для получения заготовок абразивных кругов наружным диаметром 300 мм, высотой 200 мм и с отверстиями 127, 76 и 32 мм. На дополнительной плите пресс-формы установлены поворачивающиеся сектора со следующими характеристиками:

- количество секторов - 4, материал - Ст 45;
- сектора поворачиваются с диаметра 127 мм до диаметра 76 и 32 мм;
- оси вращения секторов диаметром 12 мм, материал - Ст45.

Полученные при помощи пресс-формы заготовки после операции формования подверглись контролю плоскостности торцов заготовки. Результаты контроля показали, что деформация по плоскости после операции формования отвечает требованиям стандарта.

Следует также отметить, что изобретение по пат. РФ №2216440 при его внедрении позволяет уменьшить массу пресс-формы, количество дополнительных плит, а стало быть, потребность в металле для их изготовления. Снижается также трудоемкость изготовления дополнительных рабочих деталей и сборки пресс-форм для операции формования заготовок.

4.3 Устройство к прессу общего назначения для двухстороннего прессования абразивных заготовок

Поскольку широко распространенные пресс-автоматы предназначены для получения порошковых изделий только малых размеров и малой массы, а уникальное оборудование для изостатического прессования имеет ограниченное применение вследствие высокой его сложности и стоимости, то наиболее рациональным можно считать для абразивных изделий небольшую реконструкцию прессов общего назначения с установкой устройства для двухстороннего прессования [54].

На уровне изобретения разработано устройство [99], позволяющие на оборудовании абразивных предприятий России получать двухсторонним прессованием заготовки повышенного качества с более однородными по высоте плотностью, твердостью, прочностью и структурой.

Суть устройства по патенту РФ №2156684, как видно из рисунка 54, заключается в следующем.

В исходном положении верхняя траверса гидравлического пресса 8 и пуансон 13 должны быть установлены в строго определенном положении, таком, чтобы расстояние от зеркала верхнего пуансона 13 до верхней формовочной плиты 4 было равно h_1 , где h_1 - ход верхнего пуансона 13 от исходного положения

(левая часть рисунка 46) до начального (правая часть рисунка 54). От исходного до начального положения пуансон 13 проходит путь, равный $2 h_1$, а корпус пресс-формы 1 вместе с верхней формовочной плитой 4 проходят путь, равный h_1 . При этом в исходном положении пресс-формы нижняя поверхность нижней формовочной плиты 5 должна находиться от опорной поверхности опоры 14 на расстоянии h_2 . При условии, когда $h_2 = h_1$, в начальный момент пресс-формы, нижняя формовочная плита 5 должна войти в контакт с поверхностью опоры 14.

С момента касания пуансоном 13 верхней формовочной плиты 4 и нижней формовочной плитой 5 упоров 14, начинается процесс двухстороннего прессования (рисунок 55).

При прессовании формовочная смесь 15 обжимается на величину Δh верхней формовочной плитой 4 при ее движении вниз вместе с пуансоном 13 и обжимается на величину Δh нижней формовочной плитой 5 за счет перемещения на эту величину Δh вниз корпуса 1 вместе с прессовкой 16. При этом пуансон 13 вместе с верхней формовочной плитой 4 проходит путь, равный $2\Delta h$.

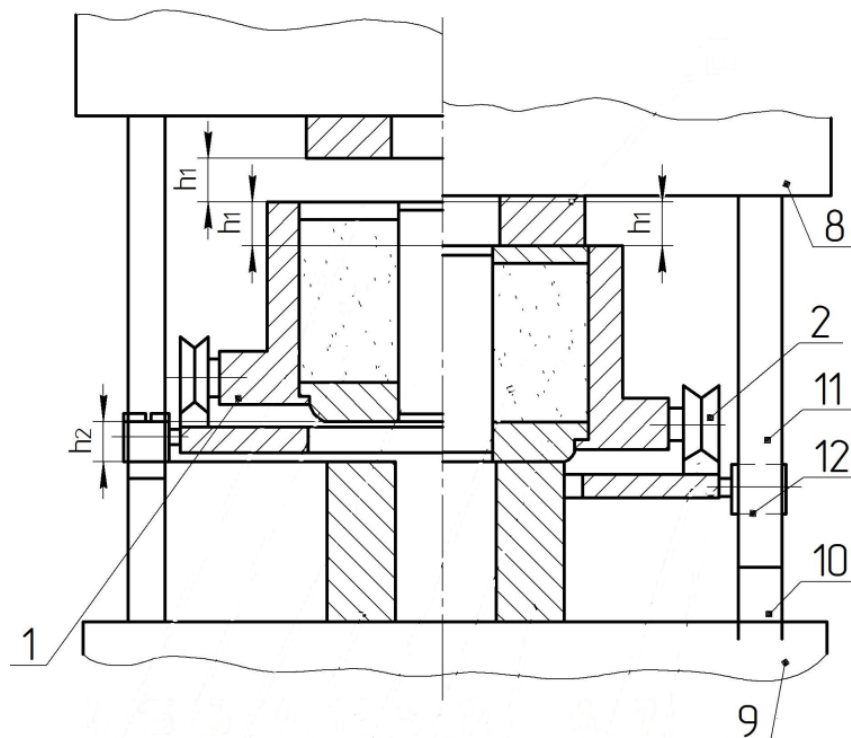


Рисунок 54 - Исходное и начальное перед прессованием положения пуансона пресса и пресс-формы для двухстороннего прессования (вид спереди)

После окончания операции прессования корпус 1 вместе с колесами 2, горизонтальными направляющими 6 и плитой 7 с помощью реек 10, 11 и шестерен 12 возвращаются в исходное положение за счет движения вверх траверсы 8. Затем по горизонтальным направляющим 6 корпус 1 на колесах 2 подается в положение выталкивания прессовки 16.

Устройство, в соответствии с изобретением [99], конструктивно совмещено с гидравлическим прессом. Для этого верхняя подвижная траверса пресса 8 (см. рисунки 54 и 55) снабжена зубчатыми рейками 11, а нижняя неподвижная траверса 9 - зубчатой рейкой 10. Между зубчатыми рейками 10 и 11 установлены шестерни 12, оси вращения которых соединяются с подвижной плитой 7, на которой закреплены рельсы 6, предназначенные для горизонтального перемещения корпуса пресс-формы 1. Вертикальное перемещение (вниз и вверх) корпуса пресс-формы 1 вместе с рельсами 6 и опорной плитой 7 выполняется с помощью механизма, образованного зубчатыми рейками 10, 11 и шестернями 12.

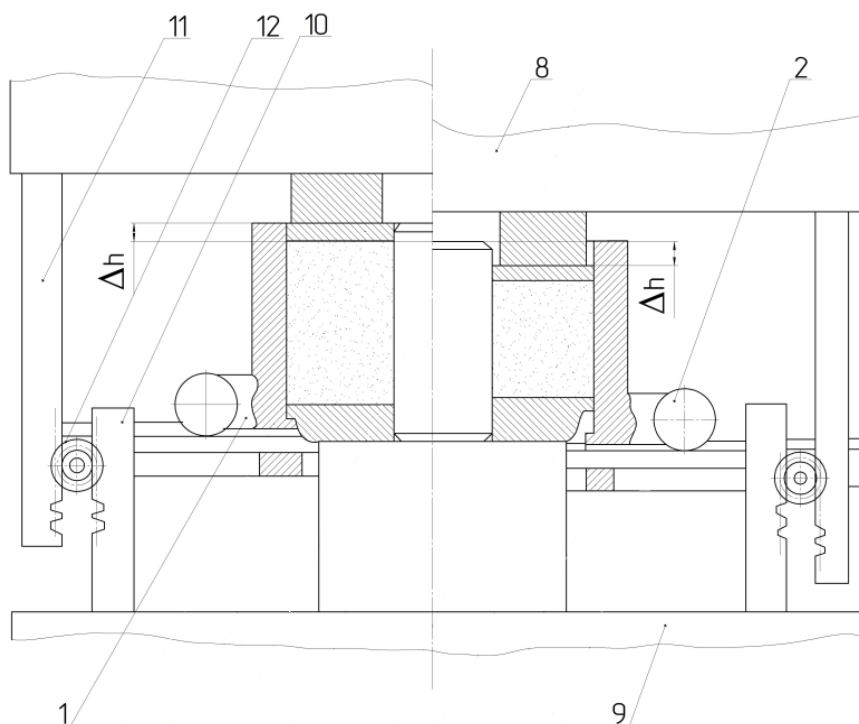


Рисунок 55 - Начальное и конечное положения пуансона пресса и пресс-формы в процессе двухстороннего прессования (вид сбоку)

То, что механизм вертикального перемещения корпуса с горизонтальными направляющими выполнен в виде двухречных зубчатых передач, позволяет связать перемещение верхней подвижной траверсы с перемещением вниз корпуса вместе с горизонтальными направляющими. Причем, как это следует из законов механики [100], пуансон устройства, закрепленный на верхней траверсе, и закрепленные на ней рейки будут двигаться вниз со скоростью в два раза большей скорости движения шестерен, а следовательно, и скорости движения корпуса устройства. Такое соотношение скоростей движения верхнего пуансона и корпуса вниз при условии задания одинакового расстояния между пуансоном и верхней формовочной плитой, а также между нижней формовочной плитой и упорами нижней формовочной плиты, установленными на нижней траверсе, обеспечит выполнение двухстороннего прессования абразивной смеси с равными обжатиями со стороны верхней и нижней плит. Двустороннее прессование со своей стороны обеспечит равноплотность заготовки, однородность ее механических свойств, а, следовательно, повысит качество полученных абразивных кругов.

Модернизированный пресс общего назначения с новым устройством (пресс-формой) для двухстороннего прессования с равным обжатием Δh абразивной смеси со стороны верхней и нижней формовочных плит работает следующим образом.

В кольцевую полость корпуса 1 в положении загрузки на нижнюю формовочную плиту 5 загружают формовочную смесь 15. Сверху на нее устанавливают верхнюю формовочную плиту 4. После этого по горизонтальным направляющим (рельсам) 6 корпус 1 задают в рабочую зону устройства (рисунок 55).

Включают привод пресса. При этом верхняя траверса 8 вместе с пуансоном 13 и рейками 11 начинают двигаться вниз. Одновременно, за счет взаимодействия реек 11 с шестернями 12 и рейками 10 начинают двигаться со скоростью, в два раза меньшей, чем траверса 8, пуансон 13 и рейки 11, перемещаться вниз шестерни 12, опорная плита 7, горизонтальные направляющие (рельсы) 6, колеса 2 и корпус 1.

От исходного положения (левая часть рисунка 54) до момента касания с верхней формовочной плитой 4 пуансон 13 проходит путь, равный $2h_1$, поскольку корпус 1 одновременно с пуансоном 13 опускается вниз. При этом корпус 1 устройства вместе с оправкой 3, верхней и нижней формовочными плитами 4 и 5 и абразивной смесью 15 проходят путь, равный h_1 . При $h_1 = h_2$, где h_2 - расстояние между нижней формовочной плитой 5 и опорами 14, то в этот момент плита 5 войдет в контакт с опорами 14.

С момента касания пуансоном 13 верхней формовочной плиты 4 и нижней формовочной плитой 5 упоров 14 начинается процесс двухстороннего прессования.

Выполнена модернизация прессы. Разработан и изготовлен образец устройства для прессования заготовок электрокорундовых абразивных кругов на керамической связке размерами $100 \times 80 \times 32$ мм (ГОСТ 2424-83). На прессе установлены двухреечные механизмы со следующими характеристиками:

- подвижные рейки имеют длину 800 мм с длиной реечной части 300 мм, их сечение 25×25 мм, материал 40Х;
- неподвижные рейки имеют длину 400 мм с длиной реечной части 300 мм, их сечение 25×25 мм, материал 40Х;
- шестерни имеют диаметр делительной окружности 80 мм, число зубьев равно 40, модуль зубьев равен 2 мм, материал 35Х;
- оси шестерен из стали 45 диаметром 25 мм приварены к опорной плите.

Полученные на модернизированном прессе заготовки после операции термической обработки подвергались контролю механических свойств по ГОСТ 25961-83. Твердость кругов определялась акустическим методом с помощью прибора «Звук 107-01». Результаты контроля показали, что твердость однородна по высоте кругов, а их качество после механической обработки отвечает требованиям стандарта. Предложенное устройство целесообразно использовать для изготовления высоких (высотой от 50 до 300 мм и более) шлифовальных кругов на керамической и других связках.

4.4 Пуансон с гидравлической подушкой пресс-формы для прессования заготовок абразивного инструмента

Для получения более равномерной по плотности заготовки абразивного круга на прессах используют пуансон с гидравлической подушкой [15]. Он содержит цилиндр, фланец, диафрагму, прижим и две плиты. Цилиндр, дном которого является диафрагма, заполняется водой. При прессовании заготовок пуансон может поворачиваться на некоторый небольшой угол, соответствующий непараллельной укладке массы в пресс-форме или перекосам, образовавшимся в самих деталях пресс-формы, что снижает равномерность плотности получаемых заготовок. Для повышения надежности эксплуатации, снижения трудоемкости изготовления и снижения числа уплотняющих элементов гидравлической подушки на уровне изобретения разработана конструкция [101], позволяющая упростить процесс заливки воды в гидравлическую подушку.

Предлагаемый пуансон с гидравлической подушкой пресс-формы проиллюстрирован на рисунке 56, где показан общий вид пуансона.

Пуансон содержит цилиндр 1, прижимной фланец 2, диафрагму 3, качающуюся плиту 4. На качающейся плите 4 закреплено само тело 5 пуансона. В цилиндре 1 смонтирован штуцер 6 с пробкой 7. В штуцере 6 соосно его внутреннему отверстию установлен клапан 8. Клапан 8 состоит из шарика 9, пружины 10 и резьбовой шайбы 11.

Пуансон с гидравлической подушкой пресс-формы для прессования заготовок абразивного инструмента работает следующим образом.

В штуцере 6 отвинчивают пробку 7 и подают под давлением воду. При этом шарик 9 клапана 8 под действием давления воды смещается, сжимая пружину 10. Давление устанавливают таким образом, что бы обеспечить необходимый ход качающейся плиты 5. Затем устанавливают в прежнее положение пробку 7. Перемещая резьбовую шайбу 11, регулируют усилие поджима шарика 9.

Включают привод пресса (на рисунке не показан). Цилиндр 1 вместе с качающейся плитой 4, диафрагмой 3 и телом 5 пуансона движется вниз. В момент

создания усилия на уложенную в матрице (на рисунке не показана) абразивную массу телом 5 пуансона качающаяся плита отрывается от фланца 2 и вместе с диафрагмой 3 компенсирует погрешности неравномерной укладки абразивной массы и люфтов в пуансоне.

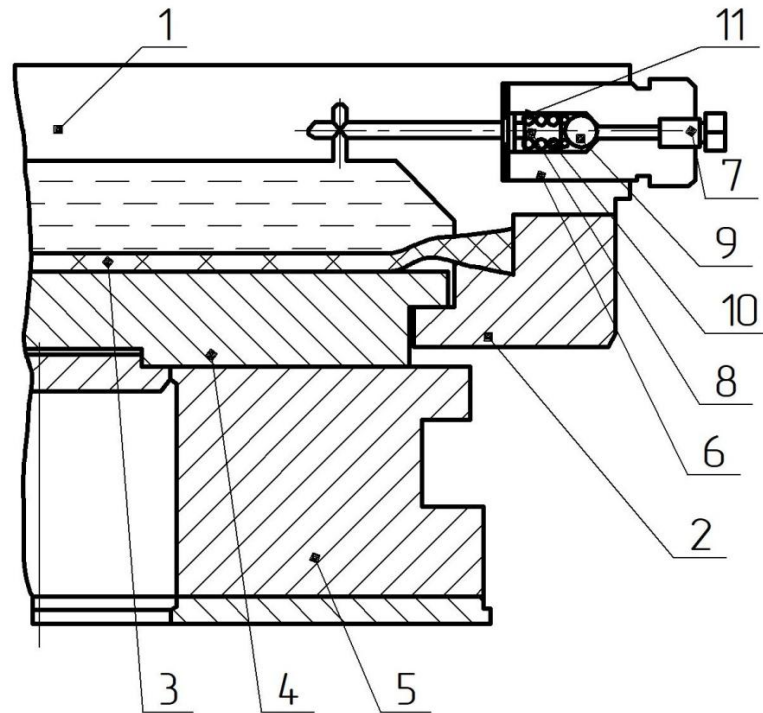


Рисунок 56 - Пуансон с гидравлической подушкой

Описанный пуансон был изготовлен на Челябинском абразивном заводе и использовался в технологии производства заготовок абразивных кругов размерами $300 \times 32 \times 76$ мм. Шарик имеет диаметр 8 мм, внутреннее отверстие клапана - 10 мм, пружина имеет наружный диаметр 8 мм. С использованием пуансона с гидравлической подушкой пресс-формы для прессования заготовок абразивного инструмента было произведено более 2000 заготовок кругов без ремонтов гидравлической подушки пуансона, что свидетельствует о повышении надежности работы заявляемого пуансона и снижении трудоемкости эксплуатации.

Предлагаемый пуансон с гидравлической подушкой может быть применен в абразивной промышленности, в пресс-формах для прессования заготовок абразивного инструмента на керамической и других связках.

4.5 Многоместная пресс-форма для прессования порошков

Предлагаемая многоместная пресс-форма для прессования порошков, согласно патенту [102], позволяющая получать изделия повышенного качества по сравнению с изделиями, получаемыми по существующим технологиям. Кроме того, повышается качество работы пресс-формы.

Поставленная задача решается тем, что в многоместной пресс-форме для прессования порошков, содержащей матрицу, верхний пуансон, выполненный в виде единой плоской плиты, обойму, комплект нижних пуансонов, комплект вкладышей средних, образующих полости для засыпки порошка, упругие элементы. Согласно предлагаемому решению, размеры плиты по наружному контуру равны наружным размерам матрицы. Матрица установлена в обойме с возможностью перемещения по внутренним поверхностям обоймы, при этом вкладыши выполнены за одно целое с матрицей, а упругие элементы размещены между торцевой поверхностью матрицы и обоймой.

Указанные конструктивные особенности пресс-формы создают одинаковые условия перемещения порошка с двух боковых сторон матрицы, что исключает появление анизотропии свойств изделий. Вкладыши не опираются на упругие элементы, а выполнены заодно с матрицей, что повышает надежность работы пресс-формы.

Многоместная пресс-форма проиллюстрирована на рисунке 57, где изображен общий вид пресс-формы в начальный момент прессования. Пресс-форма состоит из матрицы 1, верхнего пуансона 2, выполненного в виде единой плиты, обоймы 3. Вкладыши средние 4, образующие полости для засыпки порошка, выполнены за одно целое с матрицей 1. Между торцевой поверхностью

матрицы 1 и обоймой 3 установлены упругие элементы 5. Имеется комплект нижних пуансонов 6.

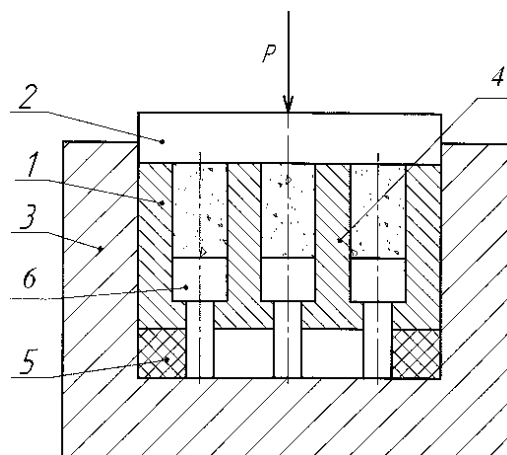


Рисунок 57 - Многоместная пресс-форма для прессования порошков

Многоместная пресс-форма работает следующим образом. Верхний торец матрицы 1 совмещают с верхней торцевой поверхностью обоймы 3. В образованные вкладышами 4 и обоймой 1 полости засыпают порошок. Включают привод пресса (на рисунке не показан). Верхний пуансон 2 начинает перемещаться под давлением P и перемещает вниз в обойме 3 матрицу 1, преодолевая сопротивление упругих элементов 5. При перемещении матрицы 1 комплект нижних пуансонов 6 неподвижен. В этот момент происходит прессование смеси. После прессования смеси верхний пуансон 2 отводят в верхнее положение, упругие элементы 5 возвращают матрицу 1 в исходное положение, когда ее верхняя торцевая поверхность совпадает с верхней торцевой поверхностью обоймы 3.

Согласно предлагаемому решению, были изготовлены абразивные хонинговальные бруски размером $20 \times 20 \times 100$ мм из электрокорунда белого марки 24А с керамической связкой марки К11. Прессование выполнялось при удельном давлении 80 МПа. После термической обработки брусков были выполнены измерения твердости на двух боковых сторонах брусков. Значения твердости близки.

Предлагаемая пресс-форма найдет свое применение в абразивной промышленности, порошковой металлургии, при прессовании изделий из металлических, а также и неметаллических порошков.

4.6 Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью из порошков

Устройство позволяет получать изделия из порошковых композиций. Основная задача устройства, предлагаемого по патенту [103], по сравнению с аналогами, - повышение качества изделий путем повышения их равномерности.

Поставленная задача достигается тем, что устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью из порошка, содержащее бункер, расположенный под ним питатель, установленный в продольных направляющих стола, матрицу, верхний и нижний пуансоны. Согласно предлагаемому решению, оно имеет по крайней мере два канала истечения порошка с наклонными под углом $30\div 40^\circ$ к вертикальной оси устройства стенками высотой $0,3\div 0,4$ высоты питателя.

Заявляемые конструктивные особенности устройства позволяют распределить засыпку порошка эквидистантно рельефной поверхности готового изделия. Это ведет к равным обжатиям при прессовании изделия по всему контуру рельефной поверхности, что повышает равномерность, снижает анизотропность механических и физических свойств.

Предлагаемое устройство проиллюстрировано на рисунках 58, 59, где на рисунке 58 показан общий вид устройства, а на рисунке 59 - сечение А-А рисунка 58.

Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью из порошка содержит бункер 1, расположенный под ним питатель с высотой H , стол 3, на котором расположена матрица 4. Устройство снабжено верхним 5 и нижним 6 пуансонами. Питатель 2 смонтирован на столе 3 в продольных направляющих 7 стола. Питатель 2 имеет по крайней мере два канала 8 истечения порошка. Число

каналов зависит от конфигурации рельефа изделия. Каналы 8 истечения порошка имеют выполненные под углом $30\div 40^\circ$ к вертикальной оси устройства стенки 9. Высота h стенок 9 равна $0,3\div 0,4$ высоты H питателя 2.

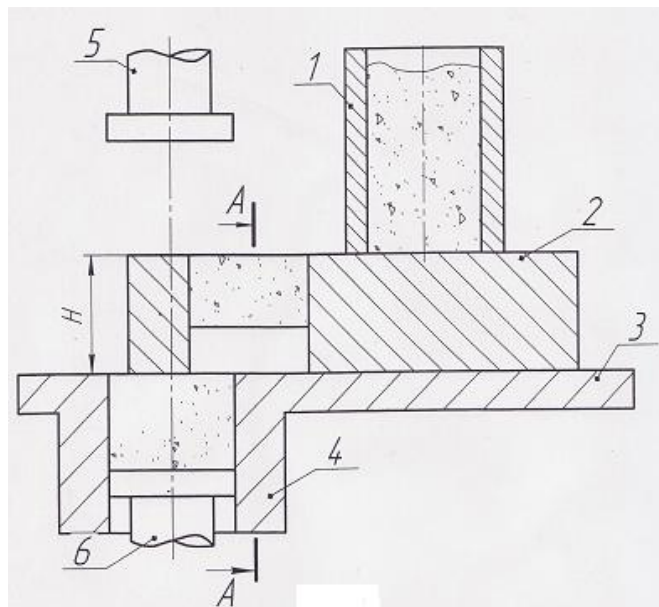


Рисунок 58 - Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью из порошков, общий вид

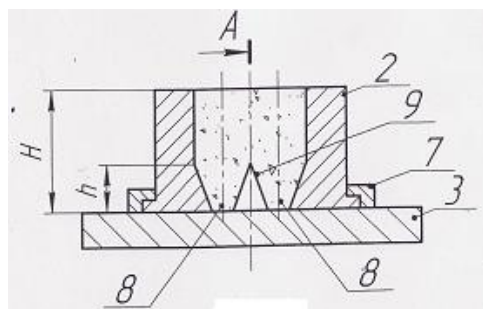


Рисунок 59 - Разрез по сечению А-А

Устройство работает следующим образом. Питатель 2 устанавливают под бункером 1. В бункер 1 засыпается порошок, который поступает в питатель 2 и заполняет полости, образованные стенками 9 каналов 8 и затем через каналы 8 поступает в матрицу 4. После заполнения матрицы 4 питатель 2 перемещают по направляющим 7 стола 3. При перемещении питателя 2 происходит разравнивание порошка. Затем включают привод пресса (на рисунке не показан).

Верхний пуансон 5, перемещаясь вниз, формует изделие, которое затем выталкивает нижний пуансон 6.

Согласно предлагаемому решению, изготовлен опытный образец для формования заготовки контактной вставки троллейбуса размером $86 \times 27 \times 19$ мм из порошковой композиции на основе углерода. Разница по высоте желоба и бортиков - 7мм. После прессования, как показали исследования, плотность желоба - $1,75 \text{ г/см}^3$, а бортиков - $1,74 \text{ г/см}^3$.

Предлагаемое устройство найдет применение при производстве изделий из порошковых композиций, в том числе и абразивных изделий.

4.7 Прокатная клетка для прокатки порошковых композиций

Устройство позволяет получать бруски из абразивной смеси с повышенной производительностью. Основная задача устройства по патенту [104] - получение брусков различного сечения.

Поставленная задача достигается тем, что в прокатной клетке для прокатки порошковых смесей, содержащих два вала равных диаметров, оси которых расположены в горизонтальной плоскости, бункер подачи порошковой смеси. Согласно предложенному решению, на бочках валков равномерно выполнены наклонные формующие выступы с углом наклона к проходящим через их вершины радиусами $\pi/4$, вершины которых расположены по радиусу $R_v = R_b + (0,93 \div 0,95)b_m$, где R_b - радиус бочки валков, b_m - минимальный зазор между бочками валков радиусом R_b .

Выполнение наклонных формующих выступов на бочках валков заявляемой формы и размеров позволит формировать несколько прокатных заготовок за один оборот валков при приложении в процессе прокатки сжимающих осевых усилий со стороны этих формующих выступов, а также увеличить высоту заготовок. Это расширит технологические возможности клетки.

Предлагаемая прокатная клетка проиллюстрирована на рисунках 60-61, где на рисунке 60 показан общий вид клетки, а на рисунке 61 - вид клетки сверху.

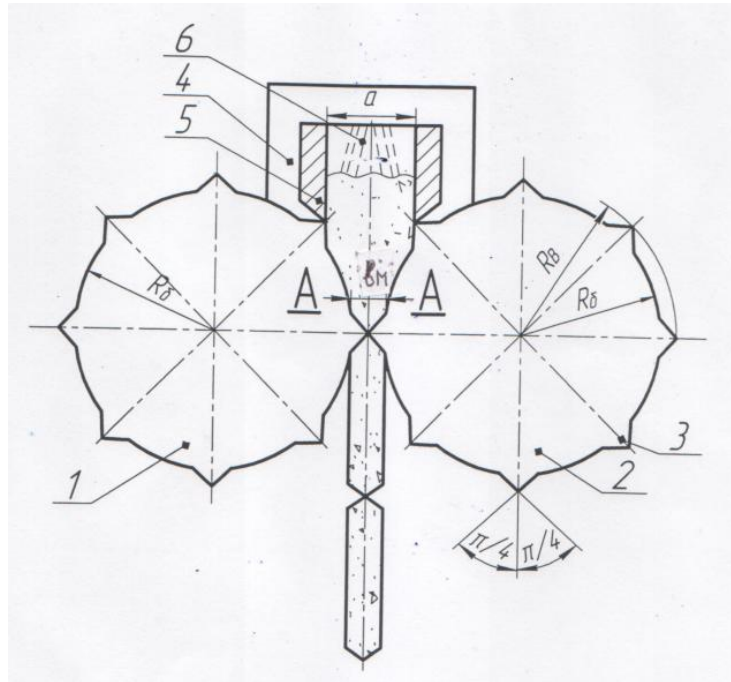


Рисунок 60 - Прокатная клетка для прокатки порошковых композиций

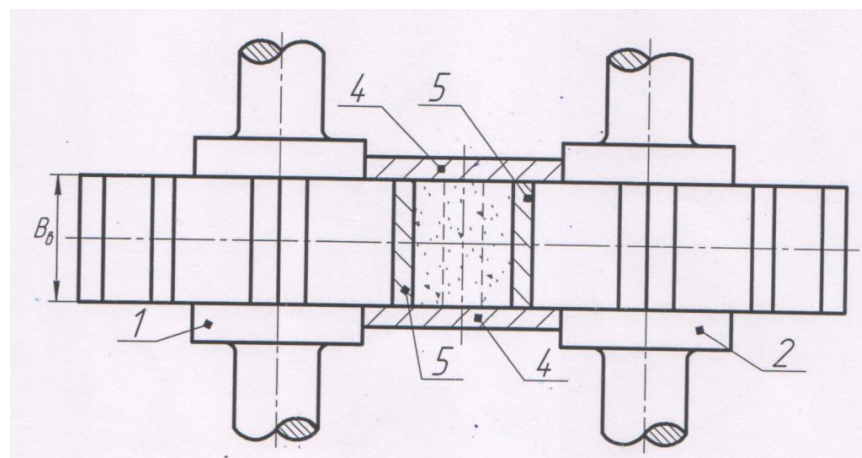


Рисунок 61 - Вид клетки сверху

4.8 Выводы по главе

Для совершенствования существующей на отечественных предприятиях абразивной промышленности технологии выполнен ряд разработок на уровне изобретений по новым процессам укладки и разравнивания абразивной массы в

пресс-формы, новым конструкциям пресс-форм, устройствам для двухстороннего прессования, устанавливаемым после небольшой реконструкции на прессах общего назначения с верхним подвижным пуансоном и новым пуансоном с гидравлической подушкой. Часть из них описана в источниках [105, 106].

1. Новое устройство для укладки, включающее оригинальные операции загрузки и подачи смеси для укладки и последующего разравнивания. Подача и укладка осуществляются послойно и разравниваются устройством в виде барабана, имеющего форму усеченного конуса с ячейками на поверхности. Каждый слой смеси от 1 до 3 мм одновременно заполняет все поперечные сечения пресс-формы при вращении устройства с помощью привода над пресс-формой и вращении усеченного барабана от своего привода. Автором разработан рабочий проект и изготовлен опытный образец устройства.

Результаты опытно-промышленного опробования устройства подтвердили работоспособность нового устройства и высокое качество укладки и разравнивания смеси.

2. Каждая пресс-форма для прессования заготовок кругов на керамической связке, кроме верхней рабочей формующей плиты, имеет дополнительную плиту высотой от 150 до 200 мм, устанавливаемую над рабочей формующей плитой. Эта дополнительная рабочая плита позволяет уменьшить рабочий ход ползуна пресса, увеличить производительность процесса прессования, а также повысить износостойкость и работоспособность формовочной плиты пресса. При широком сортаменте абразивных изделий необходим большой парк (от сотен до десятков тысяч штук) дополнительных плит массой от десятков до сотен кг (диаметр плит часто превышает 1000 мм). Во многих случаях дополнительные плиты одного наружного диаметра имеют разные (два, три, четыре или даже пять) внутренние диаметры.

Спроектирована, изготовлена и опробована в работе дополнительная плита новой конструкции наружным диаметром 300 мм, высотой 200 мм, под отверстия 127, 76 и 32 мм. Результаты испытаний положительны.

3. Одной из главных задач диссертации является разработка на уровне изобретения устройства для двухстороннего прессования, которое при минимальной реконструкции существующих в большом количестве прессов общего назначения может быть использовано на отечественных предприятиях абразивной промышленности.

Устройство (пресс-форма) по изобретению конструктивно совмещено с прессом общего назначения. Для этого верхняя подвижная и нижняя неподвижная траверсы пресса снабжены каждая двумя зубчатыми рейками, между которыми установлены шестерни. Оси этих шестерен приварены к подвижной плите, обеспечивающей перемещение пресс-формы в вертикальном направлении.

Выполнены проекты модернизации пресса и новой пресс-формы, которые реализованы в металле.

Новое устройство запущено в опытно-промышленную эксплуатацию. Получена партия абразивных кругов размерами 100x80x32. Полученные двусторонним прессованием заготовки подвергнуты термообработке и механическому контролю согласно НДТ ЧАЗа. Твердость контролировалась на приборе «Звук 107-01». Результаты показали, что она однородна по высоте изделия. Предложенное устройство целесообразнее всего использовать при получении высоких (высотой от 50 до 300 мм) шлифовальных кругов.

4. В процессе прессования для устранения погрешностей по параллельности укладки массы в пресс-форме или перекосам, образовавшихся в самих деталях пресс-формы, используют пуансон с гидравлической подушкой. Для повышения надежности эксплуатации, снижения трудоемкости изготовления и снижения числа уплотняющих элементов гидравлической подушки на уровне изобретения автором разработана конструкция, позволяющая упростить процесс заливки воды в гидравлическую подушку.

5. Предлагаемая многоместная пресс-форма для прессования порошков, позволяющая получать изделия повышенного качества по сравнению с изделиями, получаемыми по существующим технологиям. Кроме того, повышается качество работы пресс-формы.

6. Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью из порошков, позволяющее получать изделия из порошковых композиций, в том числе и абразивных изделий. Основная задача устройства по сравнению с аналогами - повышение качества изделий путем повышения их равномерности.

7. Прокатная клетка для прокатки порошковых композиций. Устройство позволяет получать бруски из абразивной смеси с повышенной производительностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ состояния производства абразивного инструмента в России и мире. Анализ показал, что существуют задачи по повышению характеристик абразивного инструмента. В частности, необходимо повышать равномерность готовых изделий по объему, что позволит получать круги класса неуравновешенности 1 и 2 вместо класса 3 и увеличение скорости вращения круга при шлифовании.

2. Проведены обоснования выбора способа прессования в зависимости от высоты, диаметра заготовки, величины обжата и других параметров. Выполнены экспериментальные исследования процесса прессования абразивной смеси на керамической связке. Установлена связь характеристики абразивного инструмента с параметрами прессования абразивной смеси.

3. Построена статистическая математическая модель прессования заготовок абразивного инструмента из белого электрокорунда для основных зернистостей (16, 25,40), твердостей (СМ, С, СТ) и геометрии, которая учитывает влияние вышеперечисленных факторов на давление прессования. Результаты показали достаточную сходимость с реальными данными прессования (около 92 %), что позволяет применять эту модель на практике.

Впервые разработана математическая модель поверхностного контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом в зависимости от геометрии пресс-формы, плотности материала, скорости скольжения частиц и силы трения, позволяющая рассчитать перемещение частиц и их напряженно-деформированное состояние, которая позволила спроектировать устройство для одновременного двустороннего прессования.

Разработаны единые уравнения для поля скоростей прессуемого материала при осевом сжатии цилиндрических заготовок в зависимости от возможных вариантов сжатия.

4. Исходя из теоретических предпосылок, разработан защищенный патентами РФ комплекс технических решений, позволяющий производить

заготовки с равномерной плотностью по всему объему. Кроме того, ряд патентов направлен на снижение трудоемкости при производстве. Экономический эффект от внедрения устройств на АО НПО «Южуралинструмент» составил 7,5 млн. рублей в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог абразивного инструмента на бакелитовой связке. - Златоуст: Изд-во Златоуста, 1992. - 30 с.
2. Павлов, В.А. Состояние производства абразивных материалов и инструмента на предприятиях России и Урала / В.А. Павлов, В.Н. Дятлов, Б.А. Чаплыгин // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. - Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. - С. 28-38.
3. Ковальчук, Ю.М. О состоянии абразивной продукции и алмазного инструмента в Российской Федерации / Ю.М. Ковальчук // Инструмент. - 1996. - №1. - С. 4-6.
4. Абразивные материалы и инструмент: Каталог-справочник / под ред. В.А. Рыбакова. - М.: НИИИ по машиностроению, 1976. - 390 с.
5. Довгаль, Э.Я. Петербургский абразивный завод «Ильич» - старейшее предприятие отрасли / Э.Я. Довгаль // Инструмент. - 1996. - №1. - С. 8-10.
6. Кремень, З.И. Абразивные инструменты: развитие и перспективы / З.И. Кремень // Инструмент. - 1996. - №1. - С. 12-14.
7. Основная номенклатура продукции АО «Абразивный завод Ильич»: Информационный листок. - Санкт-Петербург: Изд-во АЗ Ильич, 1995. - 5 с.
8. www.abrasives.ru. - Лужский АЗ, 2003.
9. www.vabz.ru. - Волжский абразивный завод, 2016.
10. Волжский абразивный завод. Рекламный проспект. - М: СП Офсет, 1996. - 6 с.
11. Абразивные заводы Урала. Абразивный инструмент. Рекламный проспект. - Челябинск: Изд. АЗУ, 2004. - 36 с.
12. Проспект Челябинского абразивного завода. - Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 2002. - 6 с.
13. kosulino.ru. - Косулинский абразивный завод, 2016.
14. abrasive.su. - Московский абразивный завод, 2016.

15. Любомудров, В.Н. Абразивные инструменты и их изготовление / В.Н. Любомудров, Н.Н. Васильев, Б.И. Фальковский. - М.: Машгиз, 1953. - 376 с.
16. Бакуль, В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / В.Н. Бакуль, Ю.И. Никитин, Е.Б. Верник и др. - М.: Машиностроение, 1975. - 296 с.
17. Гуревич, А.С. Оборудование для производства абразивных инструментов / А.С. Гуревич. - М.-Л.: Машиностроение, 1964. - 260 с.
18. Рыбаков, В.А. Оборудование и оснастка предприятий абразивной и алмазной промышленности. Учеб. пособие для машиностроительных техникумов / В.А. Рыбаков, В.В. Авакян, О.С. Масевич и др.; под общ. ред. В. А. Рыбакова. - Л.: Машиностроение, 1981. - 271 с.
19. Шумячер, В.М. Итоги международной научно-технической конференции «Шлифабразив-2011» / В.М. Шумячер, А.П. Бабичев. // Вестник ДГТУ. – 2012. - №4 (65). - С. 129-131.
20. Никифоров, И.П. Состояние и перспективы производства абразивных материалов [Электронный ресурс] / И.П. Никифоров // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Машиностроение - С. 265-270. Режим доступа: https://pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt153/wt153_10.pdf
21. Федорченко, И.М. Порошковая металлургия: справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысельский и др. - Киев: Наук. думка, 1985. - 624 с.
22. Плоткин, С.Я. Жизнь и деятельность выдающегося ученого XIX века / С.Я. Плоткин П.Г. Соболевский. - М.: Наука, 1966. - 127 с.
23. Барков, Л.А. Производство абразивных отрезных кругов на вулканитовой связке / Л.А. Барков, В.А. Павлов, Б.А. Чаплыгин и др. - Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. - 145 с.
24. Чаплыгин, Б.А. Производство вулканитовых абразивных кругов / Б.А. Чаплыгин, В.А. Павлов, В.Н. Дятлов и др. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. - 332 с.

25. Павлов, В.А. Теория и технология прокатки вулканитовых абразивных смесей / под ред. Л.А. Баркова. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. - 309 с.
26. Дятлов, В.Н. Исходные материалы для абразивного инструмента / В.Н. Дятлов // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. - Челябинск: ЧГТУ, 1997. - С.63-72.
27. Павлов, В.А. Состояние производства абразивных материалов и инструмента на предприятиях России / В.А. Павлов, В.П. Дятлов, Б.А. Чаплыгин // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. - Челябинск: ЧГТУ, 1997. - С. 28-38.
28. Павлов, В.А. Совершенствование технологии и оснастки для прокатки и вырубки заготовок абразивных отрезных кругов: автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 05.02.09 / Павлов Виктор Андреевич. - Челябинск, 1997. - 22 с.
29. Дятлов, В.Н. Разработка новых процессов и устройств для формования заготовок кругов из вулканитовых абразивных смесей: автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 05.02.09/ Дятлов Владимир Николаевич. - Челябинск, 1998. - 19 с.
30. Чаплыгин, Б.А. Создание прогрессивного производства вулканитового инструмента на основе моделирования процессов обработки давлением, новых способов и устройств: автореф. дисс. ...д-ра техн. наук: 05.02.09/ Чаплыгин Борис Александрович. - Челябинск, 1999. - 30 с.
31. Ковальчук, Ю.М. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глаговский и др. - М.: Машиностроение, 1984. - 288 с.
32. Проспект фирмы NORTON. Абразивы компании NORTON из циркония и алунда. США, 2004. - 24 с.
33. Проспект фирмы NORTON. Standard Products Catalogue. США, 2008. - 20 с.
34. Проспект фирмы NAXOS UNION. Германия, 2003. - 24 с.
35. Каталог фирмы EFESIS. Германия, 2008. - 16 с.
36. Проспект фирмы NORTON. Профиль компании NORTON, США, 2008. - 24 с.

37. <https://www.tyrolit.com/at-de>. Каталог фирмы TIROLIT. Австрия.
38. Каталог фирмы UNICORN ABRASIVES. Великобритания, 2006. - 18 с.
39. <https://us.pferd.com>. Каталог фирмы PFERD. Германия.
40. Каталог фирмы REICK. Германия, 2006. - 22 с.
41. NAXOS UNION INFORMATION. GERMANY, 2007. - 20 с.
42. INFORMATION OF EFESIS. GERMANY, 2005. - 16 с.
43. <https://www.sait-abr.com/en>. Каталог фирмы SAIT. Италия.
44. <https://www.abrasivi.it>. Каталог фирмы GRANDINETTI. Италия.
45. <http://molemab-express.ru/catalog>. Каталог фирмы MOLEMAВ. Италия.
46. <https://www.saint-gobain-surfacesolutions.com>. Каталог фирмы SAINT-GOBAIN.
47. Чаплыгин, Б.А. Абразивная промышленность России и Китая на рубеже столетий / Б.А. Чаплыгин // Теория, технология и оборудование для производства абразивного инструмента: Сб. науч. тр. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. - С. 6-12.
48. www.xinfaabrasives.com. - Shandong Xinfа Abrasives & Grinding tools Co., Ltd.
49. www.linyidapengchina.com. - Linyi Dapeng Hardware & Abrasives Co., Ltd.
50. www.iabrasive.com. - Linyi Hambo Trade Co., Ltd.
51. biz-harmony.net. - Zibo Bis-Harmony International Co., Ltd.
52. fareastabrasive.en.made-in-china.com. - Suzhou Far-East Abrasives Co., Ltd.
53. Пилинский, А. современные тенденции применения и развития процессов шлифования в США / А. Пилинский // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2012. - №4(22). - С. 191-196.
54. Дятлов, В.Н. Анализ известных способов и устройств для формования кольцевых заготовок абразивных кругов / В.Н. Дятлов, Л.А. Барков, А.А. Осинцев // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. - С. 72-81.

55. Дятлов, В.Н. Оснастка для формования заготовок абразивных кругов на керамической связке / В.Н. Дятлов, Л.А. Барков, А.А. Осинцев // Абразивный инструмент и металлообработка: Сб. науч. тр. - Челябинск: ТД «Абразивные заводы Урала», 2001. - С. 69-75.

56. Хюльзенберг, Д. Механизация процессов формования керамических изделий / Д. Хюльзенберг, Х. Крюгер, Х. Ретиг др. - М.: Стройиздат, 1984. - 263 с.

57. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. - М.: Металлургия, 1991. - 432 с.

58. Абразивные материалы и инструмент: Каталог / под ред. В.Н. Тыркова. - М.: ВНИИТЭМР, 1986. - 357 с.

59. Рогожина, Т.В. К вопросу о твердости абразивных керамических кругов / Т.В. Рогожина, А.В. Касьянов, А.А. Осинцев // Абразивное производство: Сб. науч. тр. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. - С. 117-121.

60. Рогожина, Т.В. Активация керамических связок измельчением / Т.В. Рогожина, А.В. Касьянов, В.Д. Сагдеева и др. // Теория, технология и оборудование для производства абразивного инструмента: Сб. науч. тр. - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2003. - С. 98-104.

61. Бальшин, М.Ю. Порошковая металлургия / М.Ю. Бальшин. - М.: Машгиз, 1948. - 286 с.

62. Кипарисов, С.С. Закономерности уплотнения порошковых материалов / С.С. Кипарисов, В.Е. Перельман, О.В. Роман // Порошковая металлургия, 1977. - № 12. - С. 39-47.

63. Григорьев, А.К. Деформация и уплотнение порошковых материалов / А.К. Григорьев, А.И. Рудской. - М.: Металлургия, 1992. - 192 с.

64. Друянов, Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел / Б.А. Друянов. - М.: Машиностроение, 1989. - 168 с.

65. Рудской, А.И. Уплотнение пористой упругопластической заготовки при обработке давлением / А.И. Рудской, А.А. Григорьев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. - 1984. - № 6. - С. 87-90.

66. Барков, Л.А. Абразивные материалы и инструмент ЧАЗа / Л.А. Барков, А.А. Осинцев, А.Б. Чаплыгин // Механика процессов управления. Серия. Технология и машины обработки давлением: Труды XXXIII Уральского семинара. - Екатеринбург: Изд. РАН, 2003. - С. 143-146.
67. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. - М.: Машиностроение, 1968. - 480с.
68. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением В.Л. Колмогоров. - М.: Металлургия, 1986. - 688 с.
69. Барков, Л.А. Моделирование взаимодействия порошковой гетерогенной среды с инструментом при формовании / Л.А. Барков, М.Н. Самодурова, А.А. Осинцев // М.: Металлы. - 2016. - №3. - С. 82-86.
70. Barkov, L.A. Simulation of the interaction of a powder heterogeneous medium with a tool during molding / L.A. Barkov, M.N. Samodurova, A.A. Osintsev // Russian Metallurgy (Metally). - 2016. - Vol. 5. - P. 467-471.
71. Эльсгольц, Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. - М.: Наука, 1969. - 424с.
72. Осинцев, А.А. Осевое сжатие сплошных и полых цилиндрических заготовок / А.А. Осинцев, М.Н. Самодурова, Л.А. Барков // Вестник машиностроения. - 2022. - №2. - С. 41-44.
73. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: Наука, 1976. - 279 с.
74. Блохин, А.В. Теория эксперимента. Часть 1 / А.В. Блохин. - Минск: БГУ, 2002. - 70 с.
75. Блохин, А.В. Теория эксперимента. Часть 2 / А.В. Блохин. - Минск: БГУ, 2003. - 67 с.
76. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента / Н.И. Сидняев, Н.Т.Вилисова. - М.: Издательство МГТУ, 2011. - 464 с.
77. Маслов, В.Е. Экспериментальное исследование процессов обработки металлов давлением / В.Е. Маслов, В.Н. Шаповал. - Киев: Головное издательство издательского объединения «Вища школа», 1983. – 232 с.

78. Блохин, А.В. Теория эксперимента [Электронный ресурс]: Курс лекций в двух частях: Часть 1. - Минск: Научно-методический центр «Электронная книга БГУ», 2003. – 70 с. - Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/254806>.

79. Блохин, А.В. Теория эксперимента [Электронный ресурс]: Курс лекций в двух частях: Часть 2. - Мн.: Научно-методический центр «Электронная книга БГУ», 2003. – 67 с. - Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/254806>.

80. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. – 463 с.

81. Горский, В.Г. Планирование промышленных экспериментов / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер, А.М. Талалай. - М.: Металлургия, 1978. – 112 с.

82. Налимов, В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. - М.: Наука, 1971. – 208 с.

83. Алалами, Р. Определение значимости факторов и их взаимодействия в многофакторном эксперименте / Р. Алалами, С.С. Торбунов // Электронный научно-образовательный журнал «Горизонты образования». - Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 2005. – 6 с.

84. Вольф, В.Г. Статическая обработка опытных данных / В.Г. Вольф. - М.: Колос, 1966. – 253 с.

85. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки инженерного эксперимента: Конспект лекций / Н.А. Спирин, В.В. Лавров Под общ. ред. Н.А. Спирина. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

86. Шевченко, К.И. Основы математических методов в теории обработки металлов давлением / К.И. Шевченко. - М.: Высшая школа, 1970. - 351 с.

87. Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. Сб. науч. тр. АН УССР. Институт проблем материаловедения. - Киев: Наук. Думка, 1985. - 164 с.

88. Перельман, В.Е. Теория прессования металлических порошков / В.Е. Перельман. - М.: Металлургия, 1979. - 232 с.

89. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. - Екатеринбург: Изд-во УрГТУ-УПИ, 2001. - 835 с.

90. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион. - М.: Мир, 1981. - 520 с.

91. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. - Минск: Изд-во БГУ, 1982. - 302 с.

92. Кузнецова, Е.В. Математическое планирование эксперимента: Учебно-методическое пособие для студентов очного и заочного обучения специальностей «Технология обработки металлов давлением», «Динамика и прочность машин», «Компьютерная механика», «Компьютерная биомеханика» / Е.В. Кузнецова. - Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. - 35 с.

93. Экк, Е.В. Математическое моделирование процессов выдавливания: Учебное пособие / Е.В. Экк // Южно-Уральский государственный университет. Кафедра компьютерные технологии в обработке материалов давлением, ЮУрГУ. - Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1999. - 36 с.

94. Осинцев, А.А. Математическое описание процесса прессования заготовок абразивного инструмента на керамической связке / А.А. Осинцев, М.Н. Самодурова // Вестник Южно-Уральского государственного университета, серия Металлургия. - 2017. – Т.17. - №2. - С. 119-126.

95. Осинцев, А.А. Об укладке абразивной массы на керамической связке / А.А. Осинцев, М.Н. Самодурова, Л.А. Барков // Фундаментальные и прикладные научные исследования в современном мире. V Международная научно-практическая конференция. Вестник науки. - 2024. - № К-483. - С. 110-117.

96. Осинцев, А.А. Проблемы производства абразивных кругов на керамической связке / А.А. Осинцев, Л.А. Барков, Б.А. Чаплыгин // Наука и технологии. Серия «Технологии и машины обработки давлением». Избранные труды Российской школы. - М.: РАН, 2005. - С. 171-174.

97. Осинцев, А.А. Патент № 2309036 С2 Российская Федерация, МПК В24Д 18/00. Устройство для укладки абразивной массы в пресс-форму: №

2005111440/02: заявл. 18.04.2005: опубл. 27.10.2007 / А.А. Осинцев, Л.А. Барков, А.Б. Чаплыгин [и др.]; заявитель ООО «Торговый Дом «Абразивные заводы Урала».

98. Барков, Л.А. Патент № 2216440 С2 Российская Федерация, МПК 7В24D 18/00. Пресс-форма для формования заготовок абразивных кругов: 2002103587 заявл. 08.02.2002 опубл. 20.11.2003 / Л.А. Барков, А.А. Осинцев, В.Н. Дятлов [и др.]; заявитель ООО «Торговый Дом «Абразивные заводы Урала».

99. Осинцев, А.А. Патент № 2156684 С1 Российская Федерация, МПК 7В24D 18/00. Устройство для прессования заготовок абразивных кругов: № 99113420: заявл. 24.06.1999: опубл. 27.09.2000 / А.А. Осинцев, Л.А. Барков, В.И. Трусовский [и др.]; заявитель ООО «Торговый Дом «Абразивные заводы Урала».

100. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Часть 1. / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. - М.: Высшая школа, 1977. – 234 с.

101. Осинцев, А.А. Патент № 142883 U1 Российская Федерация, МПК В22F 3/03. Пуансон с гидравлической подушкой пресс-формы для прессования заготовок абразивного инструмента: № 2014107260/02: заявл. 24.02.2014: опубл. 10.07.2014 / А.А. Осинцев, М.Н. Самодурова, Л.А. Барков [и др.]; заявитель ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет).

102. Барков, Л.А. Патент №150979 Российская Федерация, МПК В22F 3/03. Многоместная пресс-форма для прессования порошков: № 2014134195/02: заявл. 20.08.2014: опубл. 10.03.2015 / Л.А. Барков, А.А. Осинцев, М.Н. Самодурова; заявитель ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет).

103. Самодурова, М.Н. Патент № 151700 U1 Российская Федерация, МПК В22F 3/03. Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью из порошков: № 2014140407/02: заявл. 07.10.2014: опубл. 10.04.2015 / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, А.А. Осинцев; заявитель ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет).

104. Самодурова, М.Н. Патент № 146905 U1 Российская Федерация, МПК В22F3/18. Прокатная клетка для прокатки порошковых композиций: 2014129079/02: заявл. 15.07.2014: опубл. 20.10.2014 / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, А.А. Осинцев; заявитель ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет).

105. Самодурова, М.Н. Устройства и процессы обработки давлением порошковых композиционных материалов / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, А.А. Осинцев и др. // XVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, Monografie Nr 48, Częstochowa, 2015. - P. 222-229.

106. Осинцев, А.А. Новые конструкции устройств и пресс-форм для формования абразивного инструмента / А.А. Осинцев, Л.А. Барков, М.Н. Самодурова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2014. –Т.14. – №2. – С. 64-71.

ПРИЛОЖЕНИЕ



АО «НПО «Южуралинструмент»

454139, г. Челябинск, ул. Хлебозаводская 15. Тел./факс (3512) 53-66-17, 55-16-37, 55-43-74.
Р/счет № 40702810700120002102 в АКБ "Челябинвестбанк", г. Челябинск
ИНН 7449020206, БИК 047501779, К/счет 30101810400000000779, ОКПО 42494022, ОКОНХ 14253
e-mail: zuichel@mail.ru

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Данный акт подтверждает, что материалы диссертационной работы «Совершенствование технологии и оборудования для изготовления абразивных кругов на керамической связке на основе моделирования процесса прессования» соискателя Осинцева А.А. внедрены в производственную деятельность предприятия.

Апробация результатов проводилась при производстве абразивных кругов типа 1 (ПП).

Экономический эффект от внедрения составляет 7,5 млн. рублей в год.

Зам. директора по снабжению



Пальниченко А.Н.