

На правах рукописи



ОСИНЦЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск  
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

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

Официальные оппоненты: **Логачева Алла Игоревна**,  
доктор технических наук, начальник  
отделения металлических материалов и  
металлургических технологий  
АО «Композит», г. Королев

**Крючков Денис Игоревич**,  
кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник Молодежной лаборатории тех-  
нологии материалов института машино-  
ведения им. Э.С. Горкунова Уральского  
отделения РАН, г. Екатеринбург

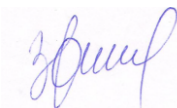
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Южно-Российский государст-  
венный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита состоится «23» мая 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного  
совета 24.2.324.04 на базе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» по адресу:  
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ  
им. Г.И.Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Звягина Елена Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертации.** 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 разработанности темы исследования.** 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 натурального 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 впервые 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 натурного 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. Разработаны: устройство, позволяющее производить равномерную укладку абразивной массы в пресс-форму, защищенное патентом РФ №2309036, реализация которого позволило повысить равномерность заготовки на 20 %; 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.

**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.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований внедрены при модернизации технологии производства абразивных кругов на АО НПО «Южуралинструмент». Экономический эффект от внедрения устройств на АО НПО «Южуралинструмент» составил 7,5 млн. рублей в год за счет производства кругов с более высокими характеристиками.

**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.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, ее научная новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

**В первой главе** проанализированы технологии производства абразивного инструмента на керамической связке в России и за рубежом.

При анализе состояния производства 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 обжата смеси со стороны верхнего и нижнего пуансонов разные, то и полученные заготовки отличаются разноплотностью по высоте. Это приводит к разнотвердости, разноточности и неоднородности физико-механических свойств инструмента.

Изучение доступных публикаций и технических данных зарубежных фирм позволило косвенно оценить состояние производства абразивного инструмента, по таким показателям, как рабочая скорость, класс неуравновешенности, класс точности и сформулировало направление работы в сторону повышения эксплуатационных характеристик получаемого инструмента.

На основе выводов первой главы сформулированы цель и задачи, приведенные в общей характеристике работы.

**Во второй главе** выполнен анализ отношений размеров кругов, позволяющий обоснованно выбрать способ и устройство для прессования с учетом относительных обжатий.

Для получения данных об усилиях, возникающих при прессовании в отдельных элементах пресс-оснастки, в зависимости от объема и состава абразивной смеси, были проведены экспериментальные исследования, которые выполнялись на опытном участке цеха №5 Челябинского абразивного завода и в условиях АО НПО «Южуралинструмент».

По результатам данных этих исследований построены графики зависимостей усилий прессования от высоты, зернистости и планируемой твердости заготовок (рисунок 1), график полученных давлений прессования (рисунок 2) и другие. Анализ графических зависимостей показывает, что снижение размеров зерен абразивного материала для заготовок высотой 25 и 50 мм приводит к увеличению усилия прессования, особенно на заготовках наибольшей высоты. Это объясняется тем, 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 смеси достаточно сложный: при изменении зернистости от 40 до 25 по ГОСТ 3647-80 наблюдается монотонное увеличение усилия, а при зернистости, равной 16 по ГОСТ 3647-80, усилие резко падает. Согласно ГОСТ 3647-80 зернистость шлифзерна обозначают как 0,1 размера стороны ячейки сита в свету в микрометрах, на котором задерживаются зерна



основной фракции. Можно допустить, что в этом случае резкое снижение усилия связано со снижением сил трения, а также с более однородной плотностью прессовки.

С целью определения прогрессовываемости (передачи давления) были проведены замеры твердостей на торцах прессовок, результаты которых приведены в таблице 1. Красным в таблице выделены смеси, требующие подпрессовки, зеленым – не требующие.

Таблица 1. Результаты измерения твердости для заготовки высотой 50 мм

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

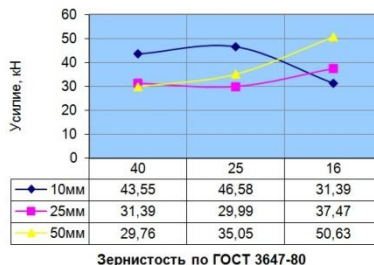


Рисунок 1. Зависимость усилия прессования от высоты заготовки и зернистости при твердости СМ1

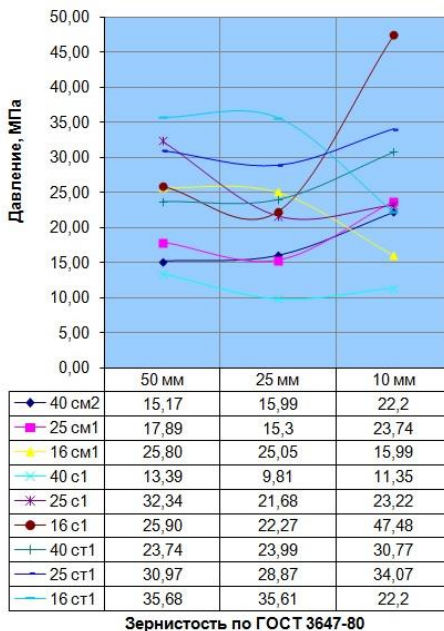


Рисунок 2. График полученных давлений прессования

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 приравнивалось 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  $0,06 \leq \frac{D_s}{T_s} \leq 2$  для заготовок твердостей С1 и выше и зернистостей 25 и выше.

Результаты эксперимента так же свидетельствуют о необходимости снижения сил межчастичного трения в объеме прессовки и трения частиц о стенки пресс-формы, и позволяют судить о том, как проявляется трение в зависимости от параметров исходной массы.

**В третьей главе** на основании данных экспериментальных исследований процесса прессования, приведенных в главе 2, построена статистическая модель.

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

Математическая модель процесса строится в виде линейного уравнения регрессии:

$$Y = 40,96 - 0,07x_1 + 0,42x_2 - 0,21x_3 - 0,13x_1x_2, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, x_3, x_1x_2$  – зернистость, твердость, высота, и совокупный фактор двух последних в кодированном масштабе.

Количество повторений прессовок берется из экспериментального исследования процесса прессования. Эксперимент пассивный, количество переменных – три, выборка 81 прессовка.

Процент расхождения давления прессования по модели с результатами эксперимента составляет около 8 %, что позволяет сказать, что полученные уравнения регрессии с достаточной точностью описывают процесс прессования.

Уровень значимости примем в пределах 0,1...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  $t_{\text{уг}}$  меньше 2,365. Исходя из этого, видим, что расчетные значения критерия Стьюдента  $t_{\text{уг}}$  меньше 4,30, что говорит о приближенности модели к реальным условиям.

Таким образом, полученные результаты можно применять на практике в производстве для планирования нагрузки на оборудование и пресс-оснастку при прессовании.

В процессе прессования заготовок абразивных кругов большое внимание уделяется трению прессуемой смеси о стенки пресс-формы, 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 основу математического моделирования поверхностного взаимодействия абразивной смеси на керамической связке с инструментом положен закон сухого трения в виде векторного функционала

$$f_{\tau} = f_{\tau}(f_v, u_s, \rho) \frac{\overline{u_{\tau}}}{u_{\tau}}, \quad (2)$$

где  $u_s$  – функция перемещения частиц смеси на поверхности скольжения с инструментом  $S_s$ ;  $u_{\tau}$  – функция перемещения частиц смеси в касательной плоскости к поверхности  $S_s$  в произвольной точке.

Для нахождения неизвестных функций  $f_v = f_v(\sigma_{ij}(x, y, z))$ ,  $u_s = u_s(x, y, z)$  и  $\rho = \rho(x, y, z)$  используется вариационный метод применяемый в теории пластичности, 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 (3):

$$\begin{aligned} J(\sigma'_{ij}, u'_i) = & \int_V \left[ \int_0^{\tau'} \Gamma(\tau) d\tau + \int_0^{\gamma'} T(\gamma) d\gamma + \int_0^{\sigma'} \varepsilon(\sigma) d\sigma + \int_0^{\varepsilon'} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right] dV - \int_{S_f} f_i^* u'_i dS - \\ & - \int_{S_n} f_i^* u'_i dS - \int_{S_s} \left[ f_{vi}' u_{vi}^* + f_{ti}' u_{ti}^* - \int_0^{u_{si}'} f_{ti}(u, p) du - \int_0^{f_{ti}'} u_{si}(f, p) df \right] dS, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $\Gamma'$  – степень деформации сдвига на виртуальном перемещении;

$\varepsilon'$  – степень объемной деформации на виртуальном перемещении;

$T'$  – интенсивность касательных напряжений на виртуальном поле напряжений;

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

Применим вариационный метод для нахождения поля перемещений. В этом случае функционал примет вид (4):

$$\mathcal{J}(u_i) = \int_V^* \left[ \int_0^{\Gamma'} T(\gamma) d\gamma + \int_0^{\varepsilon'} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right] dV - \int_{S_s}^* f_\tau \cdot u_i' dS. \quad (4)$$

Минимизируя функционал на множество непрерывных и дифференцируемых функций, удовлетворяющих заданным граничным условиям, было определено действительное поле перемещений частиц уплотняемой среды при заданном шаге движения инструмента. По найденному полю перемещений определяются степень объемной деформации и степень деформации сдвига в каждой точке прессовки. Минимизация функционала осуществлялась методом Эйлера.

Для этого заготовка разбивалась по высоте на  $m$  плоских сечений ( $m=100$ ). Действительное поле перемещений и характер распределения плотности, полученные по методу Эйлера изображены на рисунках 3 и 4 пунктирными линиями 1-6, которые соответствуют первому, второму, третьему, пятому, седьмому и девятому шагам инструмента. Как видно из рисунков 3 и 4 во время прессования в процессе уплотнения вовлекаются все новые и новые слои смеси.

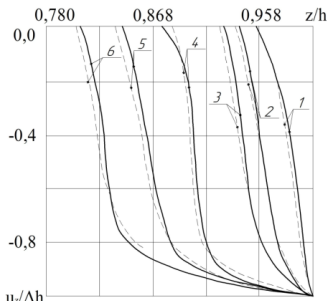


Рисунок 3. Поле перемещений частиц абразивной смеси при формовании

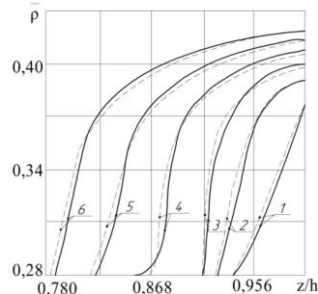


Рисунок 4. Распределение относительной плотности в прессовке

С целью единого подхода и одинаковых допущений различных вариантов прессования, в которых критерием выбора способов может служить неоднородность деформации по объему предложены единые зависимости для поля скоростей, при любых значениях констант  $a_i$  (5, 6):

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

$$v_z = v\beta(a_1 + a_2\gamma^2 + a_3\beta^2 + a_4\gamma^4 + a_5\gamma^2\beta^2 + a_6\beta^4), \quad (6)$$

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.

На основании данных, полученных из глав 2 и 3, разработаны устройства, позволяющие получать заготовки абразивных кругов с более равномерной плотностью по объему посредством равномерной укладки смеси и уменьшения объема прессования.

**В четвертой главе** приведены новые или усовершенствованные технологии и устройства. Выполненный на уровне изобретений ряд разработок новых устройств укладки и разравнивания абразивной смеси в пресс-формы, новых конструкций пресс-форм, устройств для двустороннего прессования, устанавливаемых после небольшой реконструкции на прессах общего назначения с верхним подвижным пуансоном для совершенствования существующей на отечественных предприятиях абразивной промышленности технологии. Цель разработки всех этих устройств – увеличение равномерности плотности по объему изделия.

1. Укладка и разравнивание абразивной смеси в матрице пресс-формы перед прессованием являются значимыми операциями, поскольку влияют на равномерность, равнопрочность, равнотвердость абразивного инструмента.

Новое устройство укладки (рисунок 5) включает 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 (патент РФ №2309036).

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. Во многих случаях дополнительные плиты одного наружного диаметра имеют несколько разных (два, три, четыре или даже пять) внутренних диаметров.

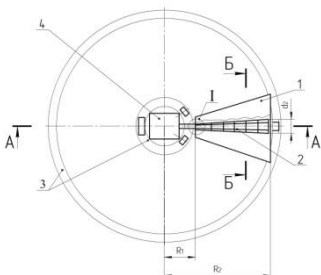


Рисунок 5. Устройство укладки абразивной массы: 1-бункер, 2-барабан, 3-направляющие, 4-привод

Спроектирована дополнительная плита новой конструкции (рисунок 6) наружным диаметром 300 мм, высотой 200 мм с поворотными секторами под отверстия 127, 76 и 32 мм (патент РФ №2216440).

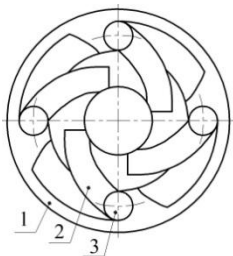


Рисунок 6. Дополнительная плита: 1-кольцо плиты, 2-поворотные сектора, 3-оси поворотных секторов

3. Одной из задач диссертации является разработка новых элементов оборудования, в данном случае 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 (рисунок 7). Для этого верхняя подвижная и нижняя неподвижная траверсы пресса снабжены каждая двумя зубчатыми рейками, между которыми установлены шестерни, оси этих шестерен прикреплены к подвижной плите, обеспечивающей перемещение пресс-формы в вертикальном направлении (патент РФ №2156684).

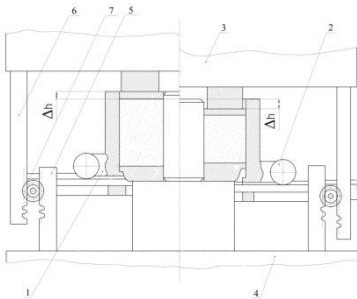


Рисунок 7. Пресс-форма с зубчатыми рейками:  
1-корпус, 2-колеса, 3-верхняя траверса пресса,  
4-нижняя траверса пресса, 5,6 – зубчатые рейки,  
7-шестерня

Выполнен проект модернизации пресса и проект новой пресс-формы, проекты реализованы в металле на опытном участке ОАО «Челябинского абразивного завода».

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 смеси 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 разработана конструкция (рисунок 8), позволяющая упростить процесс заливки воды в гидравлическую подушку (патент РФ №142883).

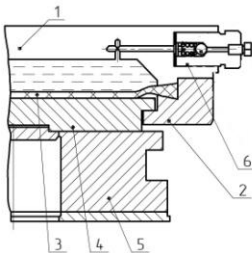


Рисунок 8. Пуансон с гидравлической подушкой:  
1-цилиндр, 2-фланец, 3-диафрагма, 4-качающаяся  
плита, 5-тело пуансона, 6-пробка

5. Предлагаемая многоместная пресс-форма (рисунок 9) для прессования брусков из абразивной смеси позволяет получать изделия с более равномерно распределенной плотностью по сравнению с изделиями, получаемыми по существующим технологиям (патент РФ №150979).

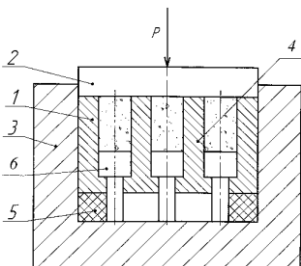


Рисунок 9. Многоместная пресс-форма: 1-матрица,  
2-верхний пуансон, 3-обойма, 4-вкладыш, 5-упругий  
элемент, 6-нижний пуансон

6. Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью (рисунок 10). Позволяет получать изделия из порошковых композиций, в том числе и абразивных изделий. Основная задача устройства, по сравнению с аналогами – повышение равномерности физических свойств изделий путем повышения их равноплотности (патент РФ №151700).

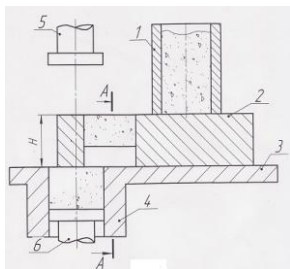


Рисунок 10. Устройство для прессования изделий с рельефной поверхностью:  
1-бункер, 2-питатель, 3-стол, 4-матрица, 5-верхний пуансон, 6-нижний пуансон

7. Прокатная клетка (рисунок 11) для прокатки порошковых композиций. Позволяет получать бруски из абразивного материала с повышенной производительностью (патент РФ №146905).

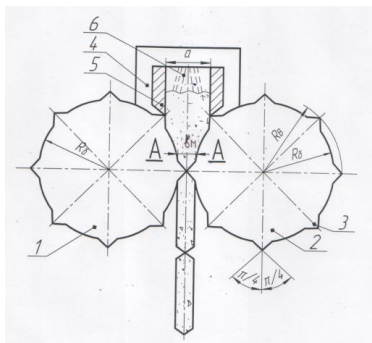


Рисунок 11. Прокатная клетка:  
1, 2-бочки валков, 3-выступы, 4-щеки, 5-перегородка, 6-загрузочная емкость

## 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 равноплотность 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 обжатия 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 «Южурал-инструмент» составил 7,5 млн. рублей в год.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ:**

##### ***Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК РФ:***

1. 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.

2. Барков, Л.А. Моделирование взаимодействия порошковой гетерогенной среды с инструментом при формовании / Л.А. Барков, М.Н. Самодурова, А.А. Осинцев // Металлы. – 2016. - №3. – С. 82 – 86.

##### ***Изобретения, программы, защищенные охранными документами РФ:***

3. Пат. РФ №151700. 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 «ЮУрГУ» (НИУ).

4. Пат. РФ №150979. МПК В22F 3/03. Многоместная пресс-форма для прессования порошков: № 2014134195/02: заявл. 20.08.2014; опубл. 10.03.2015 / А.А. Осинцев, М.Н. Самодурова, Л.А. Барков; заявитель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

5. Пат. РФ №146905. МПК В22F3/18. Прокатная клеть 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 «ЮУрГУ» (НИУ).

6. Пат. РФ № 142883. 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, В.А. Иванов; заявитель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

7. Пат. РФ №2309036. МПК В24D 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, В.В. Дятлов; заявитель ООО «Торговый Дом «Абразивные заводы Урала».

8. Пат. РФ № 2216440. Пресс-форма для формования заготовок абразивных кругов: № 2002103587/02: заявл. 08.02.2002; опубл. 20.11.2003 / Л.А. Барков, А.А. Осинцев, В.Н. Дятлов, А.Б. Чаплыгин; заявитель ООО «Торговый дом «Абразивные заводы Урала».

9. Пат. РФ № 2156684. Устройство для прессования заготовок абразивных кругов: № 99113420/02: 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».

#### *Публикации в других изданиях:*

10. Осинцев, А.А. Об укладке абразивной массы на керамической связке / А.А. Осинцев, М.Н. Самодурова // *Фундаментальные и прикладные научные исследования в современном мире: Сб. науч. ст. по материалам V Международной научно-практической конференции, Уфа, 20 сентября 2024 года.* – Уфа: ООО «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2024. – С. 110-117.

11. 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: Metallургия.* – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 119-126.

12. 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: Metallургия.* – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 64-72.