Министерство образования и науки Российской Федерации
Волжский политехнический институт (филиал)
ГОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи

КРЮКОВ Сергей Анатольевич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор Шумячер Вячеслав Михайлович

Волжский – 2018

Содержание

Введение …… 5

1. Влияние характеристик и состава шлифовальных кругов на керамическом связующем на показатели абразивной обработки..……. 17

1.1. Зерновые составы абразивных материалов и наполнителей…… 18

1.2. Особенности структурных дефектов компонентов инструментов и влияние их на механические свойства …….. 34

1.3. Функционально-эксплуатационные характеристики инструментов в зависимости от воздействия СОЖ, термообработки и импрегнирования …… 41

1.4. Анализ способов импрегнирования инструментов расплавом серы 49

1.5. Выводы и задачи исследований..…… 53

2. Процессы структурообразования при изготовлении абразивных инструментов …….. 56

2.1. Феноменологическая модель контактных взаимодействий частиц в формовочной смеси..……. 56

2.2. Феноменологическая модель процесса смешивания компонентов формовочной смеси……..…… 65

2.3. Феноменологическая модель процесса формования шлифовальных кругов..…… 69

2.4. Феноменологическая модель процессов термообработки шлифовальных кругов на керамической связке ……..... 74

2.5. Исследование внутренних напряжений в черепке инструментов в процессе термообработки…… 85

2.6. Выводы …….. 92

3. Исследование плотности упаковок зерен, пористости и определение параметров поверхности инструментов …… 94

3.1. Исследование плотности упаковок зерен разных размеров и их распределения в формовках ……. 94

3.2. Зависимость координационного числа зерен от плотности их упаковки и характеристик инструментов ……. 104
3.3. Исследование объемно-размерных характеристик порового пространства черепка инструментов …… 110
3.4. Аналитическое определение параметров рабочей поверхности инструментов…… 118
3.5. Выводы …… 135
4. Теоретические основы и практика совершенствования абразивных инструментов ……..…….. 137
4.1. Теоретико-экспериментальные исследования по созданию высокоэффективных абразивных инструментов …… 137
4.1.1. Совершенствование инструментов с помощью мелкодисперсного абразивного наполнителя….. …… 137
4.1.2. Совершенствование инструментов с помощью прочного и огнеупорного порообразующего наполнителя..…… 151
4.1.3. Совершенствование инструментов с помощью смесей абразивов из различных зернистостей …… 156
4.2. Экспериментальная проверка эффективности и качества шлифования опытными инструментами …….. 164
4.2.1. Высокопористые круги с мелкодисперсным наполнителем .. 164
4.2.2. Высокопористые круги с «закрытой» пористостью …….. 169
4.2.3. Шлифовальные круги из смеси абразивных материалов различной зернистости …… 171
4.3. Определение содержания связки в формовочных смесях для стандартных и опытных инструментов ……. 176
4.4. Выводы …….. 185
5. Влияние внешней среды и воздействий на механические свойства и износостойкость абразивных инструментов…..……. 187
5.1. Феноменологическая модель механизма влияния внешних факторов на прочность абразивного композита …… 187

5.2. Экспериментальная проверка влияния внешних факторов на прочность абразивных зерен и черепка инструментов..…….. 198
5.3. Исследование влияния внешних факторов на износостойкость инструментов.……..…….. 208
5.4. Выводы……... 215
6. Технологические основы процессов импрегнирования и термообработки инструментов на керамической связке……. 216
6.1. Исследование процесса пропитывания абразивных инструментов импрегнаторами..……. 216
6.2. Влияние термообработки на кинетику и качество пропитывания инструментов расплавом серы …….. 228
6.3. Экспериментальная оценка свойств и показателей инструментов, импрегнированных по заводской и предлагаемой технологиям.. 236
6.4. Исследование термостойкости абразивных инструментов на керамической связке….. …… 242
6.5. Моделирование режимов термообработки инструментов на керамической связке…….. 254
6.6. Выводы…….. 259
7. Методология разработки технико-технологических решений при создании эффективных абразивных инструментов…..……. 261
7.1. Определение оптимальной последовательности в выборе характеристик инструментов для их совершенствования…….. 261
7.2. Основные положения методики системно-комплексного подхода к созданию эффективных инструментов …… 265
7.3. Технико-технологические принципы совершенствования характеристик и показателей инструментов …… 272
7.4. Выводы ……. 285
Заключение…….. …… 286
Литература ……. 289
Приложения ……... 322

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс на предприятиях машиностроительной, подшипниковой, станкостроительной, авиационной и ряда других отраслей промышленности во многом определяется техническим уровнем металлообрабатывающих производств. Возрастающая потребность промышленности в изделиях высокой точности и качества представляет все более высокие требования к технологиям и оборудованию абразивной обработки.

В условиях современного рынка, конкуренции и ограниченных финансово-экономических ресурсах предприятий важное место принадлежит совершенствованию существующих абразивных инструментов (АИ) и повышению их качества, эффективности. Это обусловлено тем, что существующие методы и технологии получения новых видов абразивных материалов и изготовление из них инструментов связаны с большими финансовыми и энергетическими затратами и представляют, как правило, экологическую опасность окружающей среде.

В настоящее время накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал по абразивной обработке, созданию и совершенствованию АИ. Значительная часть исследовательских работ проводилась во ВНИИАШ и его филиалах, а также в ведущих учебных заведениях: МГТУ, НГТУ, СамГТУ, СГТУ, УлГТУ и др. Большой вклад в развитие науки и практики в этой отрасли внесли такие ученые, как А.П. Бабичев, А. К. Байкалов, Г. В. Бокучава, Д. Б. Ваксер, Н.И. Веткасов, П. Е. Дьяченко, Ю. М. Зубарев, Г. М. Ипполитов, А. В. Королев, А. И. Коротков, С. Н. Корчак, В. И. Курдюков, Г. Б. Лурье, Е. Н. Маслов, В.А. Носенко, Н. В. Носов, В. И. Островский, Ю. Н. Полянчиков, С. А. Попов, С. Г. Редько, А. Н. Резников, В. К. Старков, М.А.Тамаркин, Л. Н. Филимонов, Л. В. Худобин, В. М. Шумячер, П. И. Ящерицын и др.. За рубежом абразивной обработкой занимались К. Ватанабэ, К. Иокогава, С. Мацуи, Ву Насирпур, С. Окадо, А. О. Окамура, Д. Петерс, К. Сато, К. Танако и др. Вышеперечисленными учеными разработаны теорети-

ческие основы процессов абразивной обработки, исследованы и выявлены основные закономерности взаимодействия АИ с обрабатываемыми поверхностями изделий из различных материалов, созданы технологии производства как абразивных материалов, так и инструментов разнообразных по форме, типоразмерам, зернистости, твердости и структуре. Разработаны различные модели управления процессами шлифования, формирования качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Однако, мало уделялось внимания вопросам оптимального проектирования зерновых составов абразивных материалов и формовочных смесей с различными наполнителями для изготовления шлифовальных кругов и изыскания оптимальных путей их совершенствования, а также недостаточно освещены вопросы, касающиеся механизмов влияния внешних воздействий и среды на свойства и показатели работы серийных инструментов. При отсутствии теоретических работ в данном направлении существуют сложности в повышении эффективности, стабильности и качества абразивной обработки.

В связи с этим возникает необходимость и усиливается целесообразность проведения системных и комплексных исследований по обозначенным выше вопросам.

Задачи создания теоретических основ, разработки методик, расчетных моделей и технологий по совершенствованию существующих АИ путем регулирования их структурно-механических характеристик до сих пор является актуальной и значительной научной проблемой, имеющей и важное хозяйственное значение.

Решение этой проблемы расширяет функциональные возможности АИ и позволяет целенаправленно производить их совершенствование, а также регулировать и стабилизировать их характеристики и показатели процесса шлифования за счет реализации больших резервов, заложенных в существующих шлифовальных кругов.

Целью данной работы является повышение эффективности функционирования абразивных инструментов путем совершенствования их структурно-механических характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– теоретически и экспериментально исследовать процессы структурообразования при формировании черепка АИ;

– разработать теоретические основы, методики и расчетные модели составления рациональных зерновых составов формовочных смесей с использованием наполнителей и смесей абразивов различной зернистости и провести экспериментальную проверку эффективности и качества шлифования опытными инструментами;

– теоретически и экспериментально исследовать влияние внешней среды и других воздействий на прочностные свойства и износостойкость АИ и разработать технологические основы регулирования структурно-механических характеристик АИ путем их термообработки и импрегнирования.

– на основе системного подхода разработать методологию и технико-технологические принципы проектирования и изготовления высокоэффективных АИ путем совершенствования их структур и механических характеристик.

Объектом исследования являются АИ на керамическом связующем и их структурно-механические свойства и эксплуатационные показатели.

Предмет исследования – научные, методологические и прикладные аспекты повышения эффективности АИ при совершенствовании их структур и регулирования механических характеристик.

Научная новизна работы заключается в разработке:

– теоретических основ структурообразования и формирования внутреннего строения АИ на всех стадиях технологии их изготовления в свете современных физико-механических представлений;

– теоретических зависимостей для определения плотности упаковки абразивных зерен и частиц наполнителей с учетом их объемного содержания и распределения по размерам;

– теории и моделей процессов совершенствования структур АИ с помощью введения в формовочную массу наполнителей и составления зерновых смесей абразивов разной зернистости;

– технологических основ и моделей процессов импрегнирования и термообработки готовых АИ с регламентированным обеспечением заданных их функциональных свойств;

– научно обоснованной методологии системного подхода к совершенствованию АИ и технико-технологических принципов регулирования структурно-механических характеристик для повышения эффективности инструментов.

Теоретическая значимость работы:

Разработаны теоретические основы процессов структурообразования на всех стадиях изготовления абразивных инструментов.

Разработана контактно-капиллярная теория связности между компонентами формовочной смеси при ее увлажнении и обжиге, позволяющая делать обоснованный выбор зерновых составов абразивных зерен, частиц связки и частиц наполнителей по их размерам, форме и объемному содержанию в смеси.

Разработана многофакторная статистическая модель для прогнозирования и расчета давления прессования заготовок инструментов.

Разработаны математические модели внутренних напряжений в черепке инструментов с «открытыми» и «закрытыми» порами при использовании жаропрочных наполнителей.

Практическая значимость

Разработаны методики и алгоритмы расчета оптимальных размеров частиц наполнителей и рационального их содержания в зависимости от нормируемых ГОСТом структурных характеристик АИ. Для изготовления АИ из

смесей абразивов разных зернистостей разработаны расчетные зависимости для определения их регламентированного содержания в формовочных массах.

Разработана и запатентована новая технология пропитывания шлифовальных кругов расплавом серы на основе совмещения термообработки и импрегнирования.

Разработана методика расчета параметров технологии и режимов термообработки готовых инструментов в зависимости от их размеров, пористости, зернистости, вида укладки шлифовальных кругов в печь.

Разработаны новые технические решения в области совершенствования АИ, защищенные патентами, которые включают в себя способы изготовления и повышения эксплуатационных свойств АИ, составы и способы пропитки инструментов.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования являлся системный анализ. Теоретические исследования проводились на основе положений теории абразивной обработки материалов, работ по технологии композиционных материалов и совершенствованию АИ, теории консолидации и спекания порошковых материалов, физико-химической механики материалов и термопрочности материалов.

Для проведения исследований использовались как стандартные, так и оригинальные методики, а также математико-статистические методы планирования экспериментов и обработки их результатов.

Основными положениями работы, выносимые на защиту, *являются*: научные основы и практика создания высокоэффективных АИ, включающие:

– совокупность математических моделей процессов и механизмов структурообразования и формирования АИ при их изготовлении, позволяющие определять пути и способы совершенствования их структур;

– теоретические основы совершенствования структур АИ путем рационализации зерновых составов абразивных материалов и формовочных смесей

и результаты экспериментальной оценки эффективности и качества шлифования;

– результаты теоретико-экспериментальных исследований влияния внешних воздействий и среды на прочностные свойства абразивных зерен и черепка инструментов;

– технологические основы процессов регулирования механических характеристик готовых инструментов путем их термообработки и импрегнирования, обеспечивающие стабильность в работе и повышение их эксплуатационных показателей.

Степень достоверности результатов работы

Достоверность результатов работы была обеспечена современными методами теоретико-экспериментальных исследований и методиками измерений и обработки результатов. Лабораторные и производственные исследования проводились на аттестованных в Испытательном центре абразивов и шлифования ВНИИАШ ВПИ. Контрольно-измерительная аппаратура и приборы перед их использованием подвергались обязательной поверке и тарировке.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и сделанных выводов обеспечивалась математической и статистической обработкой данных лабораторно-экспериментальных и производственных исследований, сравнительным анализом результатов расчетов и экспериментальных данных, установлением корреляций между полученными результатами исследований.

Апробация работы

Основные положения и разработки по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях, семинарах, ученых советах, выставках. В их числе: на Международной науч.-техн. конференции «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». Шлифабразив, Волжский, 1997 – 2014 гг.; Международной технической конференции ТАП-97, Пенза, 1997 г.; Межвузовской конференции

по региональной программе «Научно-технические и экологические проблемы г. Волжского», Волгоград, 1999 г.; Международной конференции и Российской научной школы «Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий, Москва, 1999; Межвузовской науч.-практ. конференции «Прогрессивные технологии в машиностроении», Волгоград, 2001 г.; Международной науч.-техн. конференции «Современные материалы и технологии», Пенза, 2002 г.; Международной науч.-техн. конференции «Современные тенденции развития транспортного машиностроения и материалов», Пенза, 2004 г.; Всероссийской науч.-техн. конференции «Материалы и технологии XXI века», Пенза, 2001 г.; 34-ой Международной выставке изобретений, новой техники и продукции, Женева, 2006 г.; Российской Национальной выставке в Китайском центре международной торговли, Пекин, 2006 г.; 23-ей Международной выставке изобретений и новых технологий «ITEX'12», Куала-Лапур, Малайзия, 2012 г.; V-ой Всероссийской выставки НТТМ-2005, Москва, ВВЦ, 2005 г.; Сеульской Международной выставке «FAIR 2010», Сеул, 2010 г.; Международной промышленной ярмарке, Ханой, 2009 г.; 99 Международном салоне изобретений, Париж, 2009 г.; Ежегодной национальной выставке ВУЗПРОМЭКСПО-2013, 2014, 2016 Москва; лауреат премии Волгоградской области в сфере науки и техники «За достижения в научных и технических исследованиях и опытно-конструкторских разработках, завершившихся применением в производстве новых технологий, техники, приборов, оборудования, материалов и веществ» Волгоград 2017 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 70 печатных работ и 4 монографии, в том числе 20 статей в издательствах, рекомендованных ВАКом, и в описаниях к 8 патентам.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, 7 глав основной части, заключения, списка литературы, включающего

339 наименований. Общий объем работы 360 страниц машинописного текста, 69 рисунков, 32 таблицы и 58 страниц приложений.

В заключительной части диссертации представлены сведения о практической реализации результатов работы в промышленности и инновационных проектах Волгоградской области.

Диссертация имеет следующую структуру и основное содержание работы.

В первой главе дан обзор и анализ современного состояния проблемы совершенствования АИ. Рассмотрено влияние зерновых составов абразивных материалов и специальных наполнителей, вводимых в формовочные смеси, на характеристики и показатели инструментов. Установлено, что отсутствуют научно обоснованные методики и рекомендации по составлению рационально-оптимальных составов абразивных и формовочных смесей для изготовления инструментов с регламентированными структурно-механическими характеристиками под заданные процессы шлифования. Одной из основных причин этого является то, что до сих пор нет обобщенной теоретической модели конструкции внутреннего строения инструментов.

Далее рассмотрены вопросы по особенностям строения компонентов инструмента и их структурных дефектов, а также изменчивость их свойств при воздействии внешних факторов. Дан анализ влияния на прочность абразивных зерен и керамической связки адсорбционного эффекта и расклинивающего действия влаги, попавшей в структурные дефекты. Подробно рассмотрены вопросы изменчивости функционально-эксплуатационных характеристик инструментов от воздействия смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), термообработки и импрегнирования. Выявлено, что в настоящее время недостаточно учитываются физико-химические свойства как компонентов инструмента, так и внешней среды, условия и сроки хранения инструментов, а также внешние воздействия в виде термообработки и импрегнирования черепка инструмента. Все это затрудняет разработку научно обоснованных принципов регулирования и стабилизации структурно-механических

свойств инструментов, что особенно важно при их использовании в автоматизированных производствах.

Во второй главе по теории формирования внутреннего строения черепка АИ представлены следующие разработки и исследования. Феноменологические модели процессов структурообразования при изготовлении инструментов, начиная с процесса смешивания компонентов формовочной смеси, прессования для формования заготовок инструмента, их сушки и заканчивая процессами обжига и охлаждения. Исследовались напряжения в черепке инструмента в процессе обжига и охлаждения заготовок с использованием теории упругости и методов механики неоднородных тел.

В третьей главе представлены результаты исследований плотности упаковок и распределения зерен в формовочных заготовках. Установлена зависимость координационного числа зерен от их плотности упаковок и характеристик инструментов. Представлены результаты исследований объемно-размерных параметров порового пространства черепка и профиля рабочей поверхности инструментов. Полученные результаты рекомендуется использовать при разработке научных основ совершенствовании существующих или проектировании новых АИ.

Четвертая глава посвящена технико-технологическим разработкам и исследованиям по созданию высокоэффективных АИ на основе использования оптимальных зерновых составов абразива с наполнителями и формовочных смесей из зерен разных зеьрнистостей. Для обеспечения целенаправленного изменения структурных исполнений АИ с целью повышения их эффективности разработаны научные основы, соответствующие методики и расчетные зависимости процессов совершенствования при использовании мелкодисперсного упрочняющего наполнителя, порообразующего прочного и огнеупорного наполнителя и абразивных смесей из зерен разных номеров зернистостей. Экспериментальным путем показана эффективность и качество шлифования модернизированными инструментами.

В пятой главе работы разработана феноменологическая модель механизма влияния внешних воздействий и среды на прочность абразивного композита. Показано, что в рамках положений физико-химической механики материалов прочность абразивных зерен и связки или в целом черепка инструмента зависит от трех основных групп факторов: дефектности структуры изучаемых материалов, физико-химического взаимодействия материалов с внешней средой и физико-механических воздействий в виде термообработки и импрегнирования. Проведена экспериментальная проверка влияния внешних факторов на прочностные свойства абразивных зерен и черепка инструмента. Установлено, что прочность в зависимости от состава среды может как повышаться, так и понижаться, и эти изменения носят обратимый характер. Полученные результаты теоретико-экспериментальных исследований указывают на необходимость разработки технологических мероприятий по защите инструментов от негативного воздействия внешней среды и позволяют создавать АИ с регламентированными и стабильными во времени функциональными характеристиками.

Шестая глава диссертации посвящена теоретическим разработкам технологических основ процессов импрегнирования и термообработки инструментов для совершенствования их характеристик и показателей. В результате исследования процесса пропитывания черепка инструмента разработана структурная схема влияния внешних факторов на этот процесс, позволяющая выявлять наиболее существенные регулирующие воздействия и составлять рациональные комбинации их под свойства черепка инструмента и импрегнатора.

Термостойкость черепка инструмента при его термообработке зависит не только от структурных особенностей инструмента, но в большей степени от режимов термического воздействия. Разработана имитационная модель для исследования и расчета температурно-временных режимов термообработки инструментов. Установлен обобщающий критерий термостойкости, в

котором косвенно учтены зависимости его от зернистости, твердости, структуры и пористости инструмента.

Экспериментальным путем дана оценка влияния термозакалки черепка инструмента на кинетику и качество пропитывания его расплавом серы. Важное значение имеет рациональная величина температуры нагрева, позволяющая полностью удалять адсорбционную влагу и очищать поровое пространство от органических загрязнений. Установлено, что температура должна быть в пределах 400 – 500 ^{o}C. Скорость и качество пропитывания инструмента импрегнатором при этом существенно повышаются. На основании полученных результатов разработана новая технология пропитывания и запатентован способ повышения эксплуатационных свойств АИ, основанного на совмещении термообработки и импрегнирования.

В седьмой главе представлена методология технико-технологических решений при совершенствовании АИ. Представлены основные положения методики системно-комплексного подхода к модифицированию и модернизации инструментов. Разработаны структурные и функциональные схемы для подсистемы «инструмент» и системы «инструмент – среда», позволяющие обеспечивать комплексные технико-технологические решения при модернизации или модифицировании инструментов.

Анализ и систематизация внешних воздействий, их комбинаций и сочетаний позволили разработать классификацию способов и научно обоснованные принципы регуляции и стабилизации характеристик и показателей инструментов. Даны примеры использования разработанных принципов для повышения эффективности, надежности и качества абразивных инструментов.

Далее дана практическая реализация результатов работы. Отдельные разработки и методики прошли производственные испытания и внедрены на ряде заводов и предприятий. Запатентованные технические решения модернизированных и модифицированных АИ выставлялись на пяти Международных выставках. Отдельные положения и результаты теоретико-экспериментальных и технологических исследований используются в учеб-

ном процессе для подготовки специалистов в области подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и оборудования, а также композиционных порошков, материалов и покрытий.

В приложениях к диссертационной работе представлены технологические регламенты по изготовлению шлифовальных кругов и приводятся акты производственных испытаний и внедрений, модернизированных и модифицированных АИ на различных операциях финишной обработки изделий различного назначения.

Глава 1. ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И СОСТАВА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОМ СВЯЗУЮЩЕМ НА ПОКАЗАТЕЛИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

В настоящее время повышение эффективности АИ ведется по нескольким направлениям, обусловленными как возрастающими требованиями потребителей, так и условиями и технологиями их производства, с целью получения инструментов различного назначения и повышения их качества и эффективности. Наиболее распространенными путями повышения эффективности инструментов являются разработки способов управления их структурно-механическими свойствами и эксплуатационными показателями за счет рационального выбора физико-механических и структурных характеристик, определенных соотношением зерна, связки и пор [26, 34, 54, 58, 67, 82, 312, 318, 320]; разработка новых видов инструментов таких как высокопористые, композиционные для скоростного шлифования и др. [3, 89, 104, 192, 214, 267, 277, 317]; термообработка и импрегнирование различными составами [74, 79, 84, 91, 111, 112, 117, 216]; варьирование рецептуры [59, 81, 212, 320] и т.д.

Несмотря на большой объем теоретико-экспериментальных работ по совершенствованию АИ, вопросы управления их характеристиками и показателями еще недостаточно изучены. Требует решения вопрос механизма трещинообразования в черепке инструментов на основе анализа внутренних полей напряжений. Повышение эффективности кругов их термообработки и импрегнирования реализуется эмпирическим путем в отсутствии обоснованных температурно-временных режимов, а также технологических принципов и методов их регулирования. Кроме этого, недостаточно изучены принципы изменения характеристик и параметров АИ под воздействием внешней среды, что существенно влияет на показатели шлифования, особенно в автоматизированном производстве [142, 170, 301, 316, 318].

Одним из перспективных путей повышения эффективности инструментов и качества шлифования является обоснование выбора зернового состава

абразивных материалов. Однако, в настоящее время, этому вопросу уделяется также недостаточное внимание. В экспериментальных исследованиях, как правило без учета наличия мелких фракций испытуемых инструментов, что может приводить к противоречивым выводам по результатам исследований. Содержание отдельных фракций зернового состава и их соотношение между собой оказывают непосредственное влияние на структурно-механические характеристики инструмента и на показатели процесса шлифования, определяя съем металла, качество обрабатываемой поверхности, износ и стойкость инструмента. Между тем при выборе характеристик инструмента для заданной операции шлифования эти решающие факторы для процесса обработки учитываются не в полной мере. В научной литературе по вопросам шлифования влияние зернового состава шлифматериалов на характеристики и показатели инструментов, несмотря на свою первоочередную значимость, не получило должной оценки. В связи с этим необходимо рассмотреть вопрос по влиянию гранулометрии и характеристик зерновых составов абразивных материалов на показатели инструментов и параметры процессов шлифования.

1.1. Зерновые составы абразивных материалов и наполнителей

Особенности гранулометрии шлифматериалов заключаются в том, что они представляют собой полидисперсные системы зерен, различающихся размерами и формой.

Основная фракция является преобладающей по массе, объему или числу зерен, а размер зерен этой фракции определяет номер зернистости абразивного материала или инструмента. Минимальное процентное содержание основной фракции по массе определено стандартом. Смежная с основной и превышающая ее по размерам называется крупной фракцией. Стандарт определяет максимальное содержание этой фракции. Смежная с крупной фракцией, размеры зерен которой больше крупной, называется предельной. Предельной фракции не должно быть в составе шлифовального материала. В

мелкой фракции размеры зерен меньше размера зерен основной фракции. Мелкую фракцию в порядке уменьшения размеров зерен делят еще на две – мелкая 1 и мелкая 2. Фракция мелкая 1 входит в состав комплексной фракции и ее количество отдельно не регламентируется. Стандарт определяет суммарное содержание крупной, основной и мелкой фракций. Верхний предел размеров зерен фракции мелкая 2 задан в ГОСТ 3647–80, где она называется мелкой фракцией. Зерна, принадлежащие к этой фракции, должны пройти через последнее пятое сито и остаться на поддоне. Стандарт определяет их минимальное процентное содержание по массе. Комплексная фракция для шлифзерен и шлифпорошков состоит из трех фракций крупной, основной и смежной (дополнительной к основной); для микропорошков – из двух фракций: основной и смежной. Смежная (дополнительная к основной) фракция находится между основной и мелкой. Введен индекс качества абразивного материала в зависимости от процентного содержания основной фракции зернового состава, который позволяет изменять процентное содержание основной фракции зернового состава от гостированного (нормального) содержания в сторону увеличения для шлифзерна в 1,22 раза и уменьшения в 1,10 раза, а для микропорошков соответственно в 1,33 и в 1,05 раза.

В табл. 1.1 представлены данные по фактическому содержанию отдельных фракций зерновых составов, выпускаемых различными заводами и фирмами [25, 52, 68, 178].

Анализ этих данных показывает, что в зерновых составах отечественного производства рассмотренных номеров зернистостей, наиболее часто применяемых при шлифовании, содержание основных фракций соответствует норме и не выходит за пределы, допускаемые ГОСТом. В то же время предельные, крупные и мелкие фракции по отдельным видам шлифзерна значительно превосходят допускаемые пределы. Особенно это касается мелкой фракции, содержание которой может быть в 5,8 раза больше или в 15 раз меньше, чем предусмотрено ГОСТом. От таких колебаний значений содер-

жания крупных и мелких фракций следует ожидать существенных изменений в характеристиках и показателях инструментов.

Таблица 1.1

Фактическое процентное содержание отдельных фракций шлифзерна [52, 123]

Абразивный материал	Наименование фракций				
	предельная	крупная	основная	комплексная	мелкая
По ГОСТ 3647-80	0	не более 20 (15)	не менее 45 (55)	не менее 90 (95)	не более 3 (2)
24А; 25А	0,8 ÷ 1,1	16,5 ÷ 19,5	40,5 ÷ 47,0	87,9 ÷ 93,8	6,2 ÷ 14,5
54С; 53С	1,2 ÷ 4,0	15 ÷ 23,7	41,3 ÷ 46,5	79,6 ÷ 81,4	4,4 ÷ 17,4
64С; 63С	1,7 ÷ 2,2	18,9 ÷ 30,0	27,0 ÷ 52,9	66,3 ÷ 98,1	0,2 ÷ 9,8
NK (Нортон)	0	10,5	27,5	61,2	38,8

Следует отметить, что зерновой состав шлифзерна NK фирмы «Нортон», у которого содержание основной фракции зерна в два раза меньше, а мелкой фракции содержится в 8 ÷ 9 раз больше, чем у зерна марки 24А отечественного производства. Причем, в отдельных импортных шлифкругах присутствует дополнительная мелкодисперсная фракция в 5 – 6 раз меньше размеров зерен основной фракции. Приведенные данные свидетельствуют, что абразивные составы смесей отдельных зарубежных фирм значительно отличаются от отечественных зерновых составов. В рекламных проспектах зарубежных фирм не дается никаких объяснений по такому различию, но утверждается об эффективности инструментов, изготовленных из таких абразивных смесей. В отчетах ВНИИАШ (1979 г.) также приводятся сведения о том, что абразивные инструменты фирмы «Нортон» показывали значительно лучшие результаты, чем аналогичные отечественные шлифкруги.

Для аналитического описания распределения зерен и частиц измельченных материалов предложены различные эмпирические и теоретические формулы, обзор которых дан в работе [129].

На рис. 1.1 для шлифзерна зернистостью № 25 показаны основные способы графического описания зернового состава в виде гистограммы *1*, дифференциальной *2* и интегральной кривой *3*. Гистограмма и дифференциальная кривая наглядно характеризуют относительное содержание различных фракций зерна в шлифматериале. С другой стороны, интегральная кривая менее резко отражает изменения в гранулометрическом составе и об относительном содержании отдельных фракций приходится судить по наклону касательных к кривой. При этом отсутствие той или иной узкой фракции в шлифзерне вообще может остаться незамеченным, но зато интегральная кривая освещает более ясно общий характер зернового состава. Чем круче проходит интегральная кривая, тем меньше пределы, в которых изменяются размеры фракций шлифматериала, тем шлифзерно однороднее по размерам. Интегральные кривые удобны для сравнения на общем графике нескольких зерновых составов независимо от того, какие фракции определялись в каждом анализе.

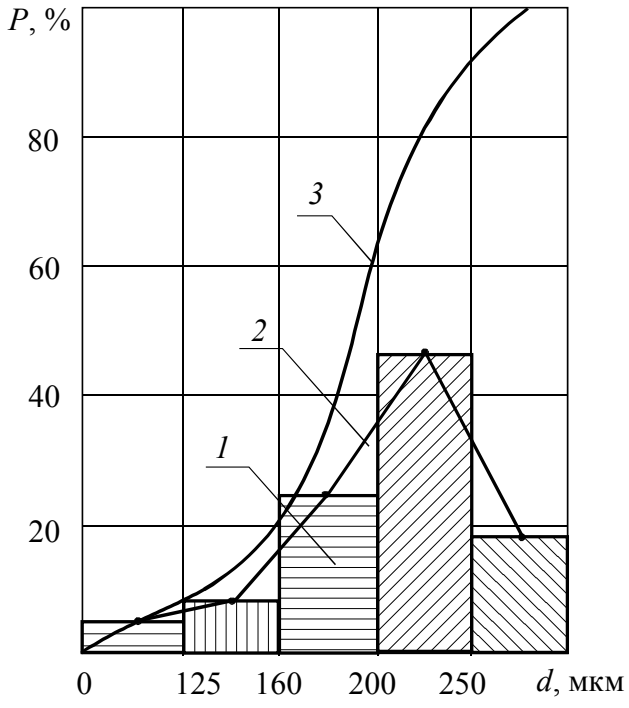


Рис. 1.1. Способы графического описания зернового состава шлифзерна

Для характеристики зернового (гранулометрического) состава широко используют так называемые коэффициенты сортированности, полидисперс-

ности или неоднородности [33, 72, 129, 299]. Они представляют собой отношение размеров зерен или частиц, соответствующих некоторым определенным точкам гранулометрической кривой. Эти точки различными авторами выбираются исходя из тех или иных представлений о том, какие именно частицы или зерна оказывают определяющее влияние на свойства и поведение исследуемых масс или смесей.

Для оценки дисперсности абразивных материалов и их смесей используют и такой показатель как средневзвешенный размер зерен по объему или, что то же самое, по массе. Существуют различные способы усреднения [33, 129], однако, чаще определяют этот показатель по формуле:

$$d_{\text{ср}}^{\text{об}} = \frac{\sum \Delta P d_{\text{ср}}^{\text{ф}}}{100}, \qquad (1.1)$$

где ΔP и $d_{\text{ср}}^{\text{ф}}$ – содержание узкой фракции и средний размер ее зерна соответственно.

Средний размер зерен абразивной смеси зависит от объемного содержания основной фракции и рассчитывается по данным зернового (гранулометрического) состава.

Рассмотренные выше особенности гранулометрии и основные характеристики и параметры зернового состава абразивных материалов показывают основные пути совершенствования инструментов путем целенаправленного изменения зернового состава и объемного содержания отдельных фракций формовочных смесей, а также рациональным подбором формы зерен, наиболее отвечающим заданному процессу шлифования.

Структурно-механические характеристики АИ определяются, в первую очередь, их строением (структурой) и зерновым составом. При проектировании инструментов должны учитываться оба фактора. Оптимальные характеристики инструментов можно достигнуть только при рациональном сочетании указанных факторов. Существенное влияние зернового состава абразивных материалов на эффективность инструментов показано в ряде работ [26, 30, 52, 58, 240 320, 326].

Основные структурные и физико-механические свойства АИ зависят, главным образом, от дисперсности (крупности) зерен и от их соотношения в зерновом составе. С уменьшением зернистости и оптимизации зернового состава свойства и показатели инструмента, как правило, улучшаются [26, 169, 317, 323].

Оптимизация зернового состава подразумевает получение абразивной смеси с узкой фракций зерна по размеру или набором разных фракций, но сравнительно одинаковым их соотношением в зерновом составе. На рис. 1.2 представлены образцы смесей с разными зерновыми составами. Под номером *1* изображен зерновой состав с однородным распределением зерен по размеру, практически, это однофракционный (узкофракционный) состав смеси, под номером *2* представлен зерновой состав, сравнительно однородный по объемному или весовому содержанию отдельных фракций зерна.

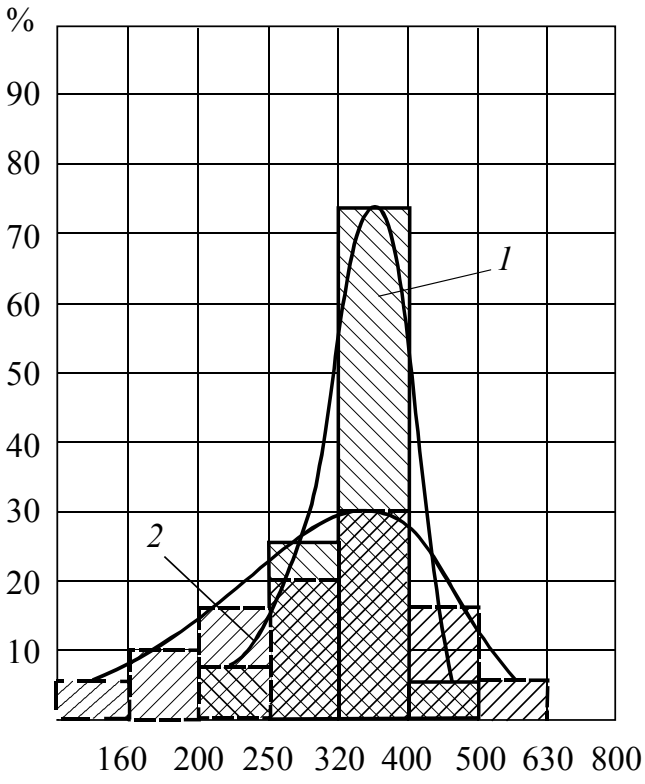


Рис. 1.2. Гистрограмма распределения зерен по размерам состава абразивных смесей: *1* – с однородным распределением по размеру зерна (содержание основной фракции зерна 73 %); *2* – с однородным по объемному (весовому) соотношению фракций зерна (содержание основной фракции зерна 30 %)

В первом случае (рис. 1.2) содержание основной фракции зерна размером от 320 мкм до 400 мкм составляет 73 %, а во втором случае – 30 %. Если теперь сравнить содержание смежных фракций с основной, то в первом зерновом составе соотношение содержания основной фракции к смежным составляет от 2,8 до 14,6, а во втором – от 1,5 до 2,0. В первом случае зерновой состав абразивной смеси однороден по размеру зерна и имеет большую неоднородность по соотношению фракций зерна, во втором случае наблюдается обратная картина – однородность по содержанию фракций и неоднородность по размеру зерна с одновременным уменьшением средневзвешенного размера зерна абразивной смеси.

В связи с этим одной из существенных проблем является изыскание новых и совершенствование существующих составов абразивных смесей различных характеристик, реализующие конкретные требования к инструментам по прочности, твердости, пористости и структуре.

В работе [52] показана эффективность шлифования кругами одного номера зернистости с содержанием основной фракции зерна от 42 % до 88,5 %. Круги были изготовлены из зерна 24А40 твердостью СМ2-С2 на керамической связке. Форма и размеры кругов – ПП400 х 40 х 127 мм. Шлифовались образцы из стали 45 (HRC 48 – 52). Режим шлифования: $V_к$ = 37 м/с, $V_и$ = 22 м/мин, $V_с$ = 10 мм/об. Полученные результаты испытаний кругов с различным содержанием зернового состава показали, что с повышением содержания основной фракции, т. е. степени однородности по размеру зерна, производительность повышается приблизительно в 1,2 раза, а износ круга уменьшается в 2,5 раза. Другие показатели процесса шлифования такие как мощность шлифования, шероховатость обработанной поверхности и др. также зависят от содержания основной фракции зерна.

В исследованиях [237] отмечается, что повышение степени однородности зернового состава в шлифкругах 24А40СМ16К5 способствует повышению режущих свойств кругов. Круг с 75%-ным содержанием основной фракции зерен имеет более высокую стойкость (до 30 – 37 %), меньший удель-

ный расход энергии (около 12 %), нормальную и тангенциальную составляющую силы резания (около 14 и 19 % соответственно) по сравнению с обычными кругами, имеющими 45%-ное содержание основной фракции.

Проведенные экспериментальные работы [58, 59] по влиянию гранулометрического состава абразива на эффективность процесса тонкого шлифования показали следующее. Шлифкруги 63СМ40(СМ1 – С1)10КЗ, изготовленные из шлифпорошков карбида кремния черного, на операциях шлифования желобов наружных колец шарикоподшипников из стали ШХ15 и нержавеющей стали 11Х18М показали, что увеличение содержания основной фракции с 52 до 68 % позволило уменьшить шероховатость поверхности на 3 -4 разряда, снизить удельный износ инструмента в 2 – 3 раза и уменьшить силы резания приблизительно в 1,5 раза.

По утверждению авторов работы [200], уменьшение содержания основной фракции в шлифзерне на 10 % приводит к снижению удельной производительности крупнозернистых обдирочных кругов также на 10 %. Такие же результаты получены и в работе [52], но при этом режущая способность инструментов повышалась только на 3 – 5 %.

Существуют и противоположные мнения о практическом использовании абразивных инструментов с повышенным содержанием основной фракции (> 60 %). В связи с тем, что получение шлифзерна или порошка с повышенным содержанием основной фракции затруднительно, дорого и малопроизводительно. По мнению [190], наличие в абразивном материале с преобладающим количеством зерен одного номера зернистости некоторого количества зерен более крупных или более мелких, как показывает практика, не имеет существенного значения, кроме того, часто заведомо применяют смеси из материалов разных размеров. Кроме того, анализ характеристик шлифовальных кругов из классифицированного зерна с повышенным содержанием основной фракции показывает, что эти инструменты имеют твердость от СМ1 до Т1 и 5 ÷ 7 структуру [30, 52, 58, 59, 125, 200]. Это объясняется тем, что однородное по размеру и узкофракционное зерно при формовании плохо

упаковывается и ухудшаются условия его спекания. Все это сказывается на прочностных свойствах кругов. В связи с этим изготовление таких инструментов с высокой твердостью и закрытой структурой обеспечивает им надлежащую прочность, режущую способность и износостойкость. Такие инструменты, как правило, рекомендованы для черновых операций силового и обдирочного шлифования, за исключением шлифкругов, изготовленных из микропорошков [58, 59], которые использовались на операциях окончательного шлифования колец шарикоподшипников.

Изыскание путей устранения основного недостатка инструментов из классифицированного зерна с повышенным содержанием основной фракции будет способствовать расширению области их использования, например, при создании инструментов твердостью от ВМ до М и открытых структур, для бесприжоговой обработки с сохранением высокой стойкости и кромкостойкости. При изготовлении таких инструментов возникают следующие проблемы. На стадии формования и после обжига «сырые» заготовки и получаемый инструмент имеют низкую прочность из-за малого содержания зерна и связки, а также образования высокой пористости. Анализ зависимостей прочности образцов инструментов на разрыв от структуры при различных твердостях, представленных в работе [26], показывает, что с уменьшением степени твердости прочность образцов уменьшается во всех исследуемых вариантах при изменении на одну степень – примерно на 5 – 20 %. С повышением номера структуры изменение прочностных показателей не столь однозначно и существенно. Прочность возрастает с уменьшением размера зерен (зернистости), так, с изменением зернистости с 25 до 10 прочность может увеличиваться на 30 – 40 % [26]. Прочностные свойства инструмента снижаются на 25 – 40 % при повышении объемной пористости с 35 % до 65 – 70 % [26, 138, 238, 317].

При решении проблемы повышения прочности АИ необходимо учитывать вид абразива, его зернистость, твердость, структуру и вид связки. Для заданных видов абразива и связки основными параметрами регуляции проч-

ностных свойств являются зернистость абразива, твердость и структура инструмента. Изменяя только зернистость инструмента можно в широком диапазоне варьировать структурно-механическими свойствами и параметрами геометрии рельефа его рабочей поверхности [238]. Увеличение номера зернистости и структуры, снижение твердости однозначно приводит к уменьшению прочности инструмента при существующих рецептурных условиях и технологиях изготовления.

Для повышения эффективности АИ путем регулирования их структурно-механических характеристик их модернизации используются различные однокомпонентные и комплексные наполнители, которые по их функциональному назначению можно условно подразделить на упрочняющие, порообразующие, импрегнирующие и комбинированного действия. Использование наполнителей определенного назначения и в оптимальном количестве позволяет управлять процессами структурообразования и упрочнения черепка АИ при их изготовлении, а также стабилизировать их характеристики и показатели шлифования. Как показывает практика, использование наполнителей дает ощутимый технико-экономический эффект за счет повышения эффективности и расширения функциональных возможностей АИ, что особенно важно и актуально для современных условий при ограниченных финансово-экономических ресурсах абразивных заводов и машиностроительных предприятий.

Рассмотрим ниже предлагаемые и используемые специальные абразивные смеси, зерновые составы и особые технологические приемы, обеспечивающие создание инструментов с заданными характеристиками, необходимыми для выполнения ряда операций абразивной обработки деталей в массовом и крупносерийном производстве.

С целью повышения эксплуатационных показателей инструмента предлагается абразивная масса, содержащая смесь зерен карбида кремния различных зернистостей № 100, № 63, № 25 при их соотношении в масс. % соответственно: 40,8 ÷ 43,6, 18,4 ÷ 19,6, 8,8 ÷ 9,6 [22]. Круги, изготовленные

из предлагаемой массы, имеют пятую структуру и более рациональную упаковку зерен, что позволяет повысить эксплуатационные показатели при обработке абразивосодержащих изделий. Коэффициент шлифования повышается в 1,4 ÷ 1,5 раза, а стойкость по количеству обработанных изделий увеличивается в 1,2 ÷ 1,3 раза по сравнению с обычным инструментом.

В работе [323] описывается абразивная масса, содержащая связующее и абразивные зерна различной зернистости. Крупные зерна осуществляют основной процесс резания, а мелкие заполняют промежутки между крупными зернами и улучшают качество обработанной поверхности. При этом повышается механическая прочность черепка инструмента.

Для повышения производительности обработки и улучшения качества обработанной поверхности предлагается абразивная масса [20], содержащая абразивные зерна разных размеров, при этом размер зерен меньшей зернистости равен 0,2 ÷ 0,3 размера зерен большой зернистости при объемном соотношении: 60 % крупной зернистости и 40 % мелкой. Изготовленный инструмент из такой массы при обработке стекла, керамики и кварца имеет производительность в 2,0 ÷ 2,8 раза больше стандартного инструмента. Одновременно с этим снижается в 1,25 ÷ 1,50 раза параметр шероховатости R_a.

В состав шлифкругов на керамической связке для шлифования шариков подшипников предлагается вводить наполнитель из электрокорундов с размером зерна 44 мкм не менее 15 вес. %. Зернистость основной фракции электрокорунда № 16 с содержанием 40 – 50 % от веса всей сухой массы. При этом повышается модуль упругости и плотность инструмента [228].

Известен патент [229] на способ изготовления АИ на смоляной связке, по которому к основному абразиву добавляются зерна, размер которых в 6 ÷ 12 раз меньше зерен основного материала. На 100 частей основного материала требуется 20 – 30 частей добавляемых зерен. Прочность получаемого таким способом инструмента возрастает на 30 – 70 %.

В исследованиях [26] с целью обеспечения максимальной однородности, плотности и прочности шеверов в абразивную смесь к электрокорунду

зернистости № 25 (250 мкм) вводился наполнитель из электрокорунда зернистости № 6 - № 8 (60 – 80 мкм) в количестве 10 – 20 % от содержания основной фракции, что позволило дополнительно увеличить прочность инструмента на 10 – 15 %. Это объясняется тем, что при тех же значениях структуры и твердости достигается повышение жесткости самого материала инструмента за счет увеличения числа контактов абразивных зерен между собой.

Известно, что при изготовлении шлифкругов повышенной твердости и прочности по обычной технологии увеличение количества связки с целью повышения твердости приводит к ее вытеканию и деформации черепка инструмента. Для устранения этого недостатка в работе [89] предлагается вводить в формовочную массу абразивный наполнитель в виде мелких зерен, заполняющий пустоты между зернами основной зернистости. За счет такого решения происходит увеличение числа мостиков связки, скрепляющих зерна, и армирование связки, что должно способствовать увеличению твердости и прочности черепка шлифкруга. Результаты испытания механических и шлифовальных свойств изготовленных кругов показали увеличение их твердости на одну – две степени и сопротивления изгибу от 5 до 60 %, а также повышение стойкости инструмента до полного износа на 30 – 33 % по сравнению с обычными шлифкругами. При этом, по утверждению авторов, качество остается неизменным или улучшается.

Следует отметить, что в научной и производственной литературе имеется множество других аналогичных разработок по оптимизации формовочных смесей и зерновых составов [17, 20, 22, 25, 32, 88, 125, 130, 169, 200, 222, 270, 335 и др.].

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение вопросов по использованию порообразующих наполнителей в зерновых составах при изготовлении высокопористых абразивных инструментов. Полный и обстоятельный анализ методов формирования пористых структур инструментов и использования для этих целей порообразующих наполнителей дан в работе В. И. Курдюкова [172].

Из схемы, представленной на рис. 1.3, видно, что все известные порообразующие наполнители делятся на две группы: наполнители, образующие высокопористую структуру инструмента при его изготовлении, и наполнители, способствующие образованию поверхностных пор непосредственно в процессе шлифования.



Рис. 1.3. Схема разновидностей порообразующих наполнителей для зерновых составов абразивных инструментов

Из первой группы реальное практическое применение получили выгорающие при обжиге инструмента наполнители. В качестве таких наполнителей используют нефтяной кокс, древесные опилки, фруктовые косточки, частицы кожи, пробки, стирол и некоторые другие органические и неорганические малозольные материалы. Методом выгорающих добавок можно пористость инструмента довести до 70 – 75 %, но практически она обычно не превышает 55 – 60 % из-за технологических трудностей при смешивании и формовании абразивных смесей и низкой прочности черепка инструмента. Общим недостатком выгорающих наполнителей является, как правило, их

высокая токсичность, выделение при сгорании большого объема газов, приводящих к трещинообразованию в черепке инструмента, а золистые вещества при этом смешиваются с расплавленной связкой и снижают ее прочность.

Во второй группе наиболее перспективными являются термостойкие наполнители в виде полых сфер, пористых гранул с низкой прочностью или сплошных частиц с высокой прочностью. В работе [172] доказана эффективность использования полых сфер в качестве структурного элемента матрицы инструмента, разработаны научные основы технологии изготовления абразивных и алмазных инструментов с такими наполнителями и предложен ряд способов и составов абразивных масс с применением в виде дополнительного структурного элемента – полых сферических частиц. Другим примером успешного использования пустотелых микросфер для изготовления пористых конструкционных керамик являются разработки, представленные в работе [128]. Общим недостатком таких наполнителей является их достаточно высокая стоимость из-за трудоемкого процесса изготовления, требующего дополнительных затрат. Кроме того, они, имея низкую прочность и высокую хрупкость, на стадии формования и прессования инструмента частично разрушаются, образуя пустотности в черепке, которые приводят к снижению прочностных характеристик инструмента. Отличие по форме сферических частиц наполнителя от абразивных зерен затрудняет также получения удовлетворительного качества инструмента по равномерности и однородности его структуры.

Применение наполнителей с высокой механической прочностью в виде сплошных частиц, одинаковых по форме и твердости с абразивными зернами, устраняет указанные выше недостатки, присущие полым сферическим наполнителям. При этом использование термостойких огнеупорных частиц наполнителя, одинаковых по форме с абразивными зернами, не приводит во время формования и обжига инструмента к образованию пустот или дополнительных пор в его черепке, как в случаях, когда вводятся полые сферические частицы или выгорающие наполнители. За счет этого повышается проч-

ность инструмента по сравнению с высокопористыми шлифкругами, изготовленными при помощи выгорающих наполнителей или полых сферических частиц [222, 223]. В качестве наполнителей с высокой прочностью, как правило, используются частицы из адгезионно-инертного материала к связкам. Например, для электрокорундового инструмента на керамической связке рекомендуются в качестве наполнителей использовать частицы (зерно) из карбида бора, карбида кремния, нитрида бора и т.п. Выполнение частиц наполнителя из адгезионно-инертного материала к керамической связке способствует увеличению порового пространства между абразивными зернами на рабочей поверхности инструмента непосредственно в процессе шлифования за счет вырывания слабо закрепленных частиц наполнителя при незначительных нагрузках. Это позволяет создавать в процессе шлифования рабочую поверхность инструмента, подобную рабочей поверхности высокопористого инструмента заданной структуры [222].

В научно-производственных и патентных источниках информации имеется еще целый ряд других аналогичных предложений и разработок по совершенствованию АИ путем оптимизации абразивных смесей и зерновых составов [20, 22, 25, 32, 125, 130, 169, 200, 222, 270, 335 и др.]. Однако эти разработки в основном носят эмпирический и изобретательский характер без научно-технологического обоснования предлагаемых решений и рекомендаций. Об этом свидетельствуют различные рекомендации по объемному содержанию наполнителей в виде мелкодисперсных частиц в абразивных смесях. Так, в одних случаях рекомендуется вводить в смесь 4 – 6 % наполнителя [200, 270], в других – 27 % и более [88, 172]. При этом во всех случаях авторы ссылаются на полученные экспериментальные данные по изысканию оптимального содержания наполнителей.

Существуют и разноречивые данные по зависимости объемного содержания (доли) наполнителей от их размера $d_н$ или отношения размера $d_н$ к размеру зерна $d_з$. В работах [68, 308, 325] показано, что с уменьшением размера частиц наполнителя при постоянном размере основного зерна $d_з$ отно-

сительное содержание наполнителя в абразивной смеси растет. В то же время в работе [172] представлена номограмма (рис. 1.4), по которой наблюдается обратная зависимость.

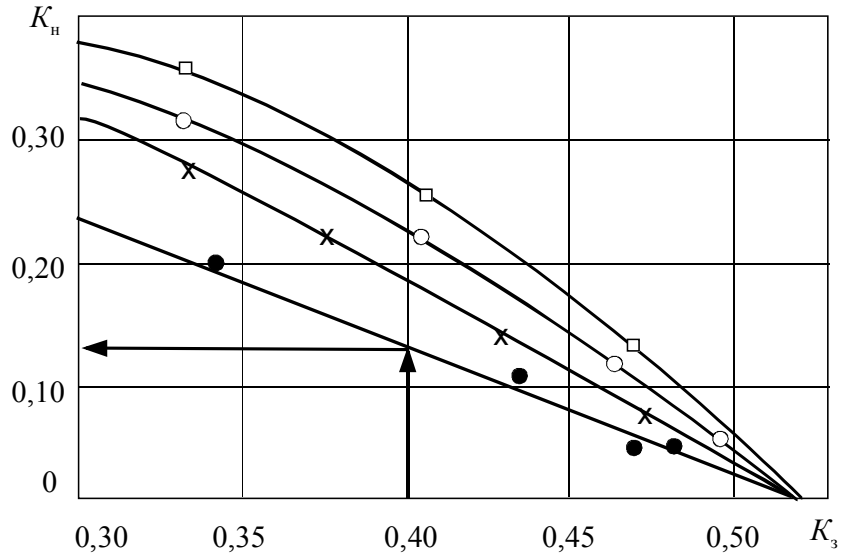


Рис. 1.4. Номограмма для определения минимально необходимой объемной доли наполнителя $K_н$ в круге [172]: $d_н$ и $d_з$ – размеры соответственно частиц наполнителя и зерна; • – $d_н / d_з = 0,2(5,0)$; **x** – $d_н / d_з = 0,3(3,3)$; o – $d_н / d_з = 0,2(5,0)$; □ – $d_н / d_з = 0,8(1,25)$

Теоретические исследования и расчеты [26, 68, 218] максимальной плотности упаковки зерен в виде шаров показывают, что части объема упаковки, занимаемые зернами и порами, постоянны по величине и не зависят от размера зерен. Однако экспериментальные исследования [179] насыпного веса абразивных материалов свидетельствуют о том, что с увеличением зернистости повышается насыпной вес, а пустотности материала, естественно, будет снижаться.

Следует также отметить, что в научной литературе отсутствуют данные по влиянию на объемную долю наполнителей таких факторов, как процентное содержание основной фракции $O_ф$ зернового состава шлифматериала, вида зерна $K_{вз}$ и его формы $K_ф$, твердости N и структуры C абразивного инструмента.

В общем виде зависимость объемной доли наполнителя $V_н$ с учетом зернистости Z и соотношения размера основного зерна с размером частиц наполнителя K_D должна описываться следующей функцией

$$V_н = f(K_D, Z, O_ф, K_ф, K_{вз}, N, C). \quad (1.2)$$

Получение зависимости (1.2) в явном виде позволит в каждом конкретном случае определять рациональное количество наполнителя, достаточного для обеспечения необходимых для практики структурно-механических свойств абразивных инструментов. Для этих целей необходимо решить ряд задач:

– исследовать возможные структуры и модели внутреннего строения АИ;

– изучить закономерности координации абразивных зерен и частиц наполнителей в инструментах различных структур и функции плотности упаковок зерен и частиц, равных по размерам и распределенных по размерам;

– исследовать объемно-размерные характеристики порового пространства инструмента;

– разработать методику расчета рецептур абразивных смесей из шлифматериалов различных зернистостей и частиц наполнителей.

1.2. Особенности структурных дефектов компонентов абразивных инструментов и влияние их на механические свойства

Одним из самых распространенных и используемых АИ, например в подшипниковой промышленности, является электрокорундовый на керамическом связующем. Применение таких инструментов составляет 50 – 60 % от общего объема всех выпускаемых АИ.

Многочисленными исследованиями [68, 75, 182, 98 и др.] установлено, что структура и основные физико-механические свойства корундовых абразивных материалов определяются содержанием α – Al_2O_3, методом и техно-

логией их производства, а также содержанием различных примесей и присадок. Теоретическая предельная прочность на разрыв таких материалов, определенная на основе теории химической связи различными методами [106, 322], лежит в пределах $29{,}5 \cdot 10^3 ... 47 \cdot 10^3$ МН/м^2. Однако действительная прочность корундовых материалов может быть на один – два порядка меньше теоретической предельной прочности [279].

Представляют интерес данные по прочности при разрушении монокристаллов корунда (Al_2O_3) в зависимости от состояния их поверхности и различных методов обработки [279]. Показано, что любая обработка (пламенная полировка, химическое травление или обжиг), влияющая на качество поверхности образца, ведет к увеличению прочности. Снижение шероховатости поверхности образцов приводит к росту их прочности, что указывает на взаимосвязь поверхностных дефектов в виде макро- и микротрещин, пор, частиц включений, примесей с процессами разрушения и снижения прочности материала.

В работе [33] приведена подробная классификация дефектов строения реальных твердых тел. Отмечается, что дефекты структуры кристаллов могут быть весьма различными по своему характеру и происхождению: микротрещины, микрощели и микрополости. Возникновение их объясняется нарушением процесса роста кристалла. Особо важное значение с точки зрения механических и физико-химических эффектов имеет поверхностная сеть микротрещин, т.к. содержит все входные отверстия (устья) микрощелей, которые принимают на себя все виды внешних воздействий, что лежит в основе положений физико-химической механики П. А. Ребиндера [255]. Подтверждением этого служат данные экспериментов, полученных при исследовании прочности на изгиб монокристаллов Al_2O_3 при воздействии внешней среды [279]. При испытании монокристаллов в вакууме прочность образцов составила 630 МН/м^2, в атмосфере сухого водорода – 550 МН/м^2, в атмосфере влажного водорода или влажного воздуха эта прочность снизилась до 460 МН/м^2. Современная интерпретация этих явлений основывается на двух

представлениях: наличия поверхностных и внутренних дефектов у испытуемых образцов еще до их нагружения и адсорбционного понижения прочности по Ребиндеру [113, 298].

В работах [182, 183] с помощью поляризационного микроскопа в иммерсионных препаратах изучалось внутреннее строение зерен корунда в монокорунде и нормальном электрокорунде различных зернистостей отечественного производства. Авторы пришли к выводу, что зерна по строению делятся на три типа: монокристаллы и их части; плотные агрегаты, состоящие из двух или более различно ориентированных кристаллов; зерна мозаичной структуры, состоящие из мельчайших частичек различно оптически ориентированных. Кроме того, было установлено, что подавляющая часть зерен содержит большое количество округлых и извилистых нитевидных пустот различных размеров. Испытание этих зерен методом раздавливания показало, что прочность монокристаллов больше мозаичных зерен примерно на 10 %, а плотных агрегатов – на 22 %. Если для зерен монокорунда всех выпускаемых зернистостей характерны монокристаллы и их части, то для электрокорунда нормального и белого наиболее характерны поликристаллические и осколочные зерна. В связи с этим монокорунд обладает большей на 5 … 15 % прочностью в сравнении с белым и нормальным электрокорундами [320]. Просматривается связь прочности и абразивной способности зерен. Электрокорунд белый имеет в среднем на 8 %, а монокорунд на 39 % большую абразивную способность, чем электрокорунд нормальный [234].

В продолжении вышесказанному можно привести выводы исследований [174, 175], в которых изучались причины улучшения режущих свойств и повышенной стойкости зерен электрокорунда белого после термообработки. Суть этих выводов заключается в том, что в результате термических ударов в электрокорунде происходит фрагментация зерен, разориентация отдельных блоков с образованием новых микротрещин, которые на первоначальной определенной стадии их развития приводят сначала к упрочнению материала, а затем при повторных термоударах образовавшиеся микротрещины развива-

ются в более крупные и приводят к разрушению зерна. Отмечается также, что на сопротивлении зерна электрокорунда белого термическим ударам сказывается исходное состояние его субмикрокристаллического строения.

Относительно влияния микротрещин на механические свойства абразивных материалов в работе [57] утверждается, что прочность абразивов определяется, в первую очередь, наличием и плотностью поверхностных трещин, а не дефектами внутри зерен. Повышение прочности электрокорундов при изгибе авторы этой работы объясняют уменьшением плотности повреждений на поверхности зерен. Следует отметить, что известные в настоящее время методы и способы упрочнения абразивных зерен [84, 286] основаны именно на этом принципе – уменьшении плотности поверхностных микротрещин путем их «залечивания» или «цементирования».

Приведенные данные о строение и структурных дефектах корундовых абразивных материалов позволяют утверждать:

– наличие различных дефектов в виде микротрещин, микропор, включений и примесей, а также размеры и плотность их распределения изменяют прочностные свойства этих материалов, характер разрушения и износа;

– любая обработка (механическая, термическая или химическая), улучшающая качество поверхности этих материалов, ведет к увеличению их прочности;

– на изменение структурно-механических свойств корундовых абразивных материалов, кроме внешних воздействий, оказывает существенное влияние и внешняя среда, в которой испытываются или работают эти материалы.

Кроме рассмотренных выше структурно-механических свойств зерна, на режущую способность АИ влияние оказывают физико-механические характеристики керамической связки, на которые существенным образом влияет состав смазочно-охлаждающей жидкости.

Электрокорундовые АИ изготовляют на основе плавящихся связок, представляющих собой стекло с мелкими кристаллами размером до 8 … 10

мкм, минералов: шпинели и рутила, концентрирующихся на контакте с зерном [193], что обеспечивает инструменту необходимую механическую прочность. Есть мнение, что в процессе обжига абразивного инструмента на керамическом связующем электрокорундовые зерна, содержащие, например гексаалюминат кальция, размываются связкой и разрушаются, что ведет к образованию в структуре черепка механически слабых участков.

Однако в работе [193] гипотетически утверждается, что материал зоны контакта зерна со связкой при нормальном технологическом процессе термообработки инструмента из-за химического взаимодействия зерна с керамической связкой прочнее, чем сама связка, при этом каких-либо количественных данных, подтверждающих этот факт, не приводится.

Исследования поверхностей разрыва абразивного черепка и оценка прочности керамической связки приведены в работах [204, 232]. На основе экспериментальных исследований и расчетов авторы [65] приходят к выводу, что поверхности зерен и зоны контакта их со связкой имеют развитые зоны предразрушения, нарушение сплошности.

На рис. 1.5 графически представлена динамика трансформации структуры черепка в зоне разрыва образца АИ [204].

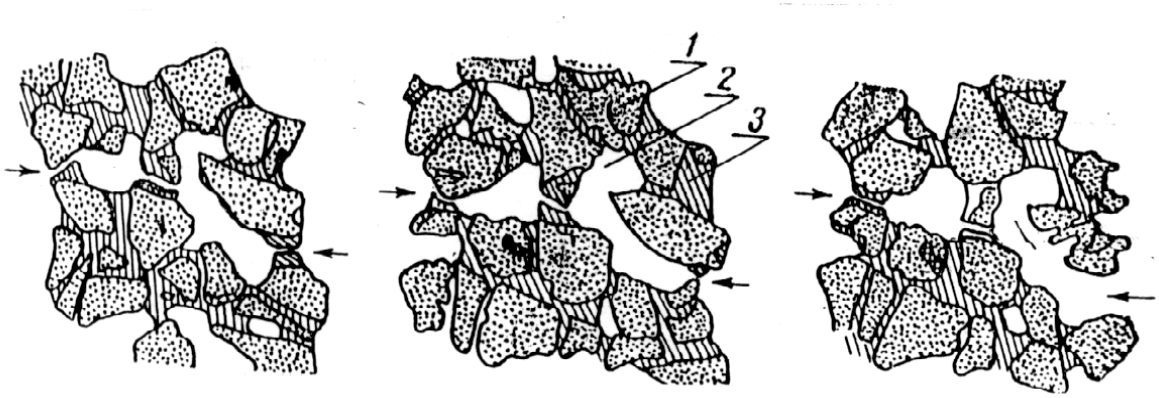


Рис. 1.5. Трансформация структуры черепка в зоне разрыва образца малого сечения (увеличение х 63) [204]: *1* – зерно; *2* – поры; *3* – связка (стрелками показана линия разрыва)

Как видно из рис. 1.5, линия разрыва на шлифе образца проходит через наиболее слабые места: поры и зоны контакта зерна со связкой, трещина раз-

рушения стремится обойти абразивные зерна как наиболее прочный элемент образца [113, 232].

Наиболее слабым местом в инструменте по прочности следует считать зону контакта зерна с мостиком связки, так как именно в этом месте на границе «зерно – связка» наблюдается развитая система микротрещин. Одной из основных причин появления дефектов структуры в зоне контакта зерна со связкой в инструменте является различие в их коэффициентах линейного расширения. Так по данным [193, 262] среднее значение величины коэффициента линейного расширения керамических связок в 1,5 … 2,0 раза ниже по сравнению с электрокорундом. Следствием этого является возникновение термоупругих напряжений в зоне контакта зерна с мостиком связки и системы микротрещин, что приводит к ослаблению контакта зерна со связкой. Образовавшиеся в спае микротрещины являются источником адсорбционного понижения прочности при воздействии внешней среды. Устранение такого дефекта структуры АИ, на наш взгляд, может быть достигнуто введением в микротрещины гидрофобных или цементирующих веществ.

В подтверждение данного предположения можно привести результаты экспериментальных исследований [332] по изучению разрушения модельных композитов, представляющих матрицу из боросиликатного стекла, упрочненную сферическими частицами вольфрама диаметром 25 … 38 мкм, имеющими коэффициент термического расширения $5{,}6 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$. Образцы из связки на основе боросиликатного стекла имели коэффициенты расширения $6{,}1 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$ и $3{,}25 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$. В первом случае прочность композита была в 1,4 раза больше по сравнению со вторым, у которого коэффициент расширения в 1,7 раза меньше, чем у частиц вольфрама.

При исследовании остаточных напряжений, возникающих при термообработке шлифовальных кругов, в работе [123] установлено, что максимальные напряжения в связке возникают вокруг контура абразивного зерна, а по величине они практически равны тангенциальным напряжениям у рабочей поверхности круга, возникающих в процессе шлифования. Естественно, та-

кой шлифовальный круг будет обладать заниженной механической прочностью. Возникновение при термообработке остаточных напряжений объясняется тем, что зерна и связка имеют различные коэффициенты объемного расширения. В результате чего при нагревании и последующем остывании они расширяются и сжимаются по-разному.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные о механической прочности электрокорундовых абразивных изделий на керамическом связующем одинаковых характеристик отличаются друг от друга по величине в 2 – 3 раза. Так, по данным [193], образцы из электрокорунда на керамическом связующем имеют механическую прочность на разрыв, равную 8,5 … 11,5 МН/м^2, а по данным [320] – 29,4 … 49,0 МН/м^2; соответственно предел прочности на изгиб – 21,0 … 30,0 МН/м^2 и 44,1 … 58,9 МН/м^2.

Если судить о прочности керамической связки косвенно по прочности силикатного стекла, то большинство деталей из стекла разрываются при растягивающих напряжениях в пределах 15 … 150 МН/м^2 [330], а теоретическая прочность такого стекла на 2 – 3 порядка выше. В этой же работе отмечается, что реальная прочность стекла существенно зависит не только от химического состава и сил сцепления между атомами, но и от температурной предыстории плавления или обжига, действующих напряжений, структурных дефектов, температуры испытаний, а также от воздействий внешней среды, особенно влаги. Если в вязких материалах концентрация напряжений, вызванная микротрещинами, может быть частично снята пластической деформацией в области наибольших напряжений, то для хрупких материалов типа стекла такая возможность практически исключена. В связи с этим хрупкие материалы особенно чувствительны к поверхностным дефектам.

В табл. 1.3 [330] показано влияние поверхностных дефектов на разрушающие напряжения прутков из стекла диаметром 6, 35 мм. Теория Гриффитса [288] позволяет объяснить данные, представленные в табл. 1.3. Значительному снижению (в 3,3 раза) и увеличению (в 3,8 раза) прочности способствует состояние поверхности прутков стекла.

Отсюда следует, что внешнее воздействие, которое приводит к уменьшению размеров и плотности дефектов способствует упрочнению материала. Аналогичный вывод был сделан и для абразивных материалов при рассмотрении изменения их структурно-механических характеристик под влиянием внешних воздействий и среды [135, 142, 157, 295].

Таблица 1.3

Разрушающие напряжения при нагружении прутков в течение 1 часа [330]

Состояние поверхности прутков из стекла	Разрушающее напряжение, МН/м^2
Пескоструйная обработка	14
В состоянии поставки	46
Травление плавиковой кислотой	176

1.3. Функционально-эксплуатационные характеристики инструментов в зависимости от воздействия СОЖ, термообработки и импрегнирования

Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на свойства АИ до сих пор является одним из актуальных вопросов теории и практики шлифования. Несмотря на имеющийся значительный теоретический и экспериментальный материал, касающийся исследований влияния СОЖ на процесс шлифования [44, 53, 79, 81, 170, 192, 256, 265, 301], вопросам варьирования свойств АИ, особенно на керамическом связующем, уделялось недостаточное внимание. Кроме того, выводы относительно изменения свойств инструмента на керамическом связующем под воздействием водных СОЖ достаточно противоречивы. Одни исследователи и специалисты утверждают, что свойства керамических кругов не изменяются под воздействием водных СОЖ и внешней среды [44, 192, 193]. Так, в работе [193] указывается, что шлифовальные круги на керамическом связующем влагоустойчивы и в течение всего периода от обжига до эксплуатации их на станке не претерпевают никаких

изменений, а в работе [44] утверждается, что подача жидкости (эмульсии) сквозь круг не влияет на прочность АИ. Другая точка зрения по этому вопросу состоит в том, что структурно-механические характеристики и показатели АИ на керамическом связующем претерпевают определенные изменения, например, по твердости, режущей способности и склонности к износу [79, 170, 256, 301]. Утверждается, что применение СОЖ при шлифовании влияет на структурно-механические характеристики шлифовальных кругов [444, 265, 300]. Это объясняется, с одной стороны, тем, что при действии водных СОЖ на АИ происходит частичное вымывание химических веществ из круга, а, с другой стороны, проявляется адсорбционный эффект снижения прочности по Ребиндеру [254].

В исследованиях С.Г. Редько [256] впервые было установлено значительное изменение твердости кругов на керамическом связующем при воздействии на них СОЖ.

Более поздние теоретические и экспериментальные исследования [170, 301] подтвердили утверждение об изменении характеристики кругов на керамическом связующем под воздействием охлаждающих жидкостей. Абразивный инструмент гигроскопичен и впитывает в себя жидкость на всю толщину тела, вследствие чего реализуются процессы физической и химической сорбции жидкости. Пористость инструмента выражена в виде открытых и закрытых пор, а также большого количества капилляров и микротрещин (рис. 1.6).

В кристаллах абразивных зерен также имеются расслоения и микротрещины. Наиболее слабым звеном в черепке инструмента является место спая зерна со связкой, где сконцентрированы выходы пор, капилляры и микротрещины, которые увеличивают площадь соприкосновения зерна с жидкостью, уменьшают площадь контакта его со связкой и являются одновременно местом концентрации остаточных напряжений и приложения расклинивающих давлений сорбции. Установлено, что в результате воздействия СОЖ пористость кругов может увеличиваться от 0,1 до 1,0 %, а также изменятся твердость.

Проведенные экспериментальные исследования [170] показали, что после воздействия на круг СОЖ (эмульсии, содового раствора и воды) изменяется их режущая способность и качество поверхностей деталей. Из-за понижения твердости кругов под воздействием водных СОЖ увеличивается износ круга, уменьшается съем металла, снижается мощность шлифования, высота микронеровностей обработанных поверхностей деталей. При шлифовании с охлаждением водными СОЖ в разные периоды работы круга наблюдается непостоянство его работоспособности, что совершенно неприемлемо при шлифовании деталей в автоматизированном поточном производстве. Авторы этих работ, к сожалению, не дают никаких рекомендаций к устранению этого недостатка.

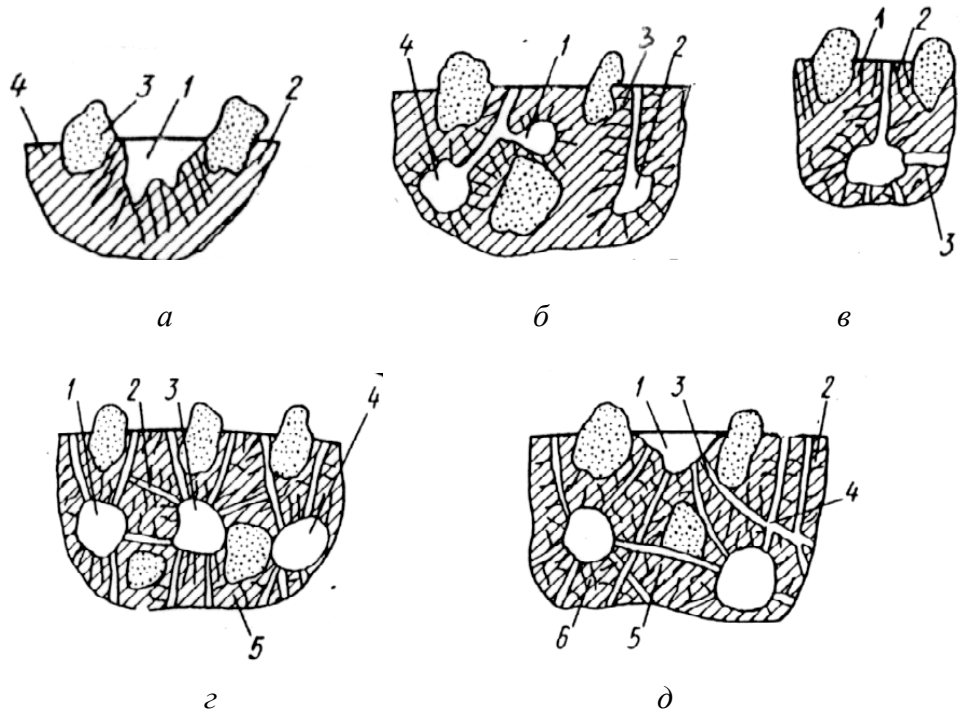


Рис. 1.6. Формы пор и капилляров в абразивном инструменте [170]: *а* – поверхностная пора с капиллярами: *1* – пора; *2* – капилляры; *3* – абразивные зерна; *4* – связка; *б* – тупиковые поры с капиллярами: *1* – внутренняя пора; *2*, *4* – поверхностные поры; *3* – капилляры; *в* – капилляры: *1* – поверхностные; *2* – к поровым каналам; *3* – к порам; *г* – открытые проходные поры; *1*, *3*, *4* – проходные поры; *2* – соединительные поровые каналы; *5* – капилляры; *д* – поровые каналы: *1* – поверхностные групповые; *2* – поверхностные одиночные; *3* – параллельные; *4* – перекрещивающиеся; 5 – соединительные; 6 – капилляры

В диссертационной работе [78] приведены результаты аналогичных исследований по влиянию СОЖ на водной основе на изменение физико-механических и эксплуатационных свойств шлифовальных кругов на керамическом связующем. Круги замачивались в дистиллированной воде и водной СОЖ (0,8 % -ный раствор кальцинированной соды с 0,2% нитрита натрия) и выдерживались 1 – 5 – 15 суток, после чего подвергались испытаниям. Анализ полученных результатов исследования показал, что под воздействием воды и СОЖ твердость АИ снижается на одну степень. Однако время выдержки в воде и СОЖ более 1 суток не сказывалось на дополнительном снижении или увеличении твердости инструмента, как это было отмечено в работе [170]. Автор [78] также приходит к выводу, что водные СОЖ разупрочняют поверхностный слой АИ за счет расклинивающего действия компонентов СОЖ и реализации эффекта Ребиндера.

Е. Н. Маслов [197], объясняя режущее (диспергирующее) действие СОЖ, приводит схему действия охлаждающей жидкости в процессе шлифования на инструмент и обрабатываемый материал. Основную причину диспергирующего действия жидкости автор видит в адсорбционном эффекте понижения прочности твердого тела по Ребиндеру, а также в расклинивающем действии СОЖ, установленного Б. В. Дерягиным [77]. При этом отмечается, что активность жидкости тем больше, чем больше ее физико-химическое (молекулярное) сходство с материалом диспергируемого тела, т.е. с компонентами АИ и с обрабатываемым материалом. Одновременно с этим указывается, что адсорбционное понижение прочности и облегчение деформации металла в процессах шлифования за счет внешней среды еще слабо изучены, а физико-химические процессы, сопровождающие шлифование столь ощутимы, что не учитывать их при износе абразивных материалов и инструментов нельзя.

Необходимо отметить еще одну особенность механизма действия водных СОЖ на черепок АИ на керамическом связующем. Эта особенность заключается в том, что высушенные круги при $T = 150\ ^{o}C$ приобретают перво-

начальные исходную твердость и динамическую прочность, т.е. процесс носит обратимый характер [170].

Таким образом, накопленный теоретический и экспериментальный материал исследований влияния СОЖ на изменения структурно-механических свойств АИ на керамическом связующем свидетельствует о недостаточной изученности этого вопроса. Как видно из представленного обзора решение данной проблемы не связано единой идеей, не базируется на системном и комплексном анализе механизма действия внешних воздействий и среды на АИ.

Другим фактором внешнего воздействия и среды на АИ, влияющим на изменения его свойств, является температура. Существуют некоторые доказательства, свидетельствующие о том, что при помощи термообработки серийного АИ можно повысить стойкость и уменьшить его износ [23, 117, 214]. В настоящее время известны два способа термообработки АИ на керамическом связующем: предварительная обработка шлифовальных кругов глубоким холодом (О.Г.Х.) [23, 117] и нагревание их до определенной температуры и закалки в охлаждающей среде [117].

Сущность первого способа заключается в том, что АИ помещают в сосуд с жидким газом, например с жидким азотом, выдерживают определенное время в зависимости от характеристики инструмента (10 … 15 мин), затем вынимают и высушивают на воздухе [23]. В работе [118] приводятся результаты испытаний шлифовальных кругов, подвергнутых обработке глубоким холодом, при плоском шлифовании образцов из труднообрабатываемых сталей Р6М5 и Р12Ф5М с охлаждением 1,5 %-ным водным раствором кальцинированной соды. Отмечается значительная разница стойкости инструмента до и после обработки. При малых глубинах шлифования стойкость круга увеличивалась в 4 раза по сравнению с обычным необработанным инструментом. Было установлено, что шлифовальные круги, прошедшие О.Г.Х. не снижали механическую прочность, не изменялись их твердость и модуль упругости. Для объяснения механизма воздействия глубокого холода на свойства АИ авторами выдвигается гипотеза об увеличении концентрации микро-

дефектов на поверхности зерна под действием низких температур, которые способствуют микрозатачиванию и более длительному сохранению режущих свойств шлифовального круга. В работе [118] отмечаются недостатки, присущие способу обработки инструмента глубоким холодом. К таким недостаткам относятся невозможность регулирования интенсивности термических нагрузок и создания необходимого градиента температур, а также невозможность обработки шлифовальных кругов большой высоты. Другим существенным недостатком этого способа является непродолжительный период его действия на свойства АИ. Возможно, поэтому авторы этого способа рекомендуют обработку инструмента производить многократно [23].

Сущность второго способа термообработки [117] заключается в том, что АИ предварительно нагревают до 250 … 500 ^{o}C, затем производят его закалку в охлаждающей среде, например, в воде. После закалки инструмент высушивают при температуре 300 ^{o}C в течение 1,5 часа с последующим охлаждением до комнатной температуры. Экспериментальная проверка эффективности этого способа представлена в работе [117]. Показано, что на отдельных операциях шлифования такой способ термообработки шлифовального круга (44А25М3К5) увеличивает стойкость инструмента между правками на 50 % и более, уменьшает его износ на 15 …40 % при незначительном повышении шероховатости поверхности. В основе объяснения полученных результатов лежит предположение автора об интенсивном микрозатачивании абразивных зерен круга за счет термоудара при закалке инструмента.

Несмотря на положительный эффект от рассмотренного выше способа термообработки инструмента, на наш взгляд, он не лишен некоторых существенных недостатков. Во-первых, закалка предварительно нагретого АИ в воде или в растворах на водной основе приводит к понижению прочности инструмента на 20 … 39 % [117], а высушивание инструмента после закалки даже при 300 ^{o}C не удаляет из порового пространства инструмента полностью адсорбционную влагу [323].

В работе [182] также отмечается перспективность исследований по термообработке абразивных материалов и инструментов. Указывается, что за счет термообработки можно увеличить прочность абразивных зерен на 10 … 80 % и, самое главное, улучшить в ряде случаев их самозатачиваемость, что обеспечивает существенное повышение стойкости абразивного инструмента и повышает качество шлифованной поверхности изделия. В этой работе отсутствуют какие-либо рекомендации или предложения по защите термообработанных абразивных материалов и инструментов от негативного воздействия внешней среды.

В работе [157] показано, что термообработка абразивных зерен повышает их прочность на 18 … 20 % и при этом увеличивается число зерен максимальной прочности примерно в два раза. Однако при хранении на воздухе или после выдержки в воде в течение непродолжительного времени эти зерна снижают свою прочность до прочности исходных зерен с одновременным уменьшением числа зерен максимальной прочности. Это указывает на то, что одной термообработки абразивного инструмента недостаточно для стабильного повышения его эксплуатационных свойств и длительного сохранения этих свойств при шлифовании особенно с использованием СОЖ на водной основе. В связи с этим встает проблема закрепления («консервации») на определенный или заданный срок полученных путем термообработки эксплуатационных свойств инструмента. Для решения данной проблемы необходимо дальнейшее проведение соответствующих исследований в этом направлении.

Одним из резервов существенного повышения эффективности серийного АИ и процесса шлифования является его импрегнирование различными растворами, эмульсиями, расплавами, смолами и твердыми смазками [14, 47, 78, 91, 173, 216, 217, 226, 263, 313].

В связи с тем, что в отечественной и зарубежной металлообрабатывающей промышленности, в том числе и подшипниковой, наиболее широкое применение для импрегнирования АИ на керамическом связующем нашел расплав серы, рассмотрим связанные с этим вопросы.

Широкое использование расплава серы для импрегнирования инструмента обусловлено следующими обстоятельствами. Сера является минералом химически активным к металлам и сплавам с ярко выраженными антифрикционными свойствами. В процессе шлифования инструментом, импрегнированным серой, на поверхности обрабатываемого материала образуются сульфиды металла, обладающие хорошей смазывающей способностью, что уменьшает трение, снижает удельную работу и теплонапряженность процесса шлифования. Сера одновременно экранирует абразивные зерна на поверхности инструмента, снижая интенсивность износа инструмента. Кроме того, сера отличается от других пропиточных составов доступностью, низкой стоимостью, легкостью приготовления расплава, большой универсальностью в улучшении структурно-механических и эксплуатационных свойств АИ.

Многочисленные эксперименты [217, 243, 276, 300 и др.] показывают, что импрегнированные серой шлифовальные круги имеют больше в 1,6 … 2,5 раза удельную производительность, в 1,3 … 2,0 раза стойкость кругов между правками; снижается шероховатость и повышается точность обработанных изделий. Пропитка кругов расплавом серы повышает их твердость на 2 … 3 степени и прочность образцов инструмента на разрыв в 1,1…1,3 раза [300].

Улучшение структурно-механических свойств инструмента (твердости и прочности) происходит за счет того, что расплав серы, приникая в поры, капилляры и микротрещины черепка, дополнительно удерживает абразивные зерна, предотвращая вырывание их из связки [78].

Однако разработанные и действующие в промышленности технологические процессы пропитывания шлифовальных кругов на керамическом связующем расплавом серы не решают в полной мере проблемы качества импрегнированного инструмента. Это объясняется тем, что до сих пор мало внимания уделялось изучению самого механизма процесса пропитывания на основе научных технологических принципов регуляции и стабилизации управления и системного подхода к анализу факторов, определяющих качество инструмента.

1.4. Анализ способов импрегнирования инструмента расплавом серы

Несмотря на положительный эффект, достигаемый за счет импрегнирования серийного АИ серой, сам процесс пропитывания инструмента расплавом серы сопряжен с рядом трудностей.

В работе [74] отмечаются две основные проблемы, которые возникают при импрегнировании расплавом серы АИ широкого класса. Первая проблема возникает при пропитывании мелкозернистого инструмента из-за невозможности полного и равномерного заполнения порового пространства инструмента импрегнатором. Вторая проблема заключается в том, что при пропитывании крупнозернистого инструмента (с размером зерна более 100 мкм) происходит вытекание серы из пор, что приводит к снижению качества импрегнированного инструмента. Основной причиной этих, вероятно, является недостаточная смачиваемость расплавом серы керамического черепка АИ.

По данным [78] краевой угол смачивания расплавом серы оконного стекла, имеющего высокое химическое сходство с керамическим связующим инструмента, составляет 40 ^{o}, в то время как вода имеет этот угол равным 8 … 10 ^{o}. Недостаточная смачиваемость расплава серы затрудняет проникновение ее в поровое пространство инструмента, а плохая адгезия способствует вытеканию серы из пор.

Следует отметить, что из-за неполной и неравномерной пропитки образуется дисбаланс инструмента, который снижает качество обработанных поверхностей и затрудняет использование такого инструмента при скоростном шлифовании. Непропитанные участки в объеме абразивного инструмента в процессе шлифования подвержены засаливанию, что приводит к прижогам [78].

В настоящее время известны несколько способов повышения качества пропитки АИ различными импрегнаторами, в том числе и расплавом серы [17, 19, 47, 54, 74, 91, 111, 112, 133, 249, 276]. Одним из таких способов является вакуумирование емкости с пропиточным составом во время пропитки [47, 111, 276]. В работе [47] отмечается, что применение вакуума способству-

ет более полной пропитке, при этом глубина вакуума сказывается в большей степени, чем длительность вакуумирования. Однако этот способ не нашел широкого применения в промышленности из-за его сложности и высокой энергоемкости.

Для интенсификации процесса пропитывания были предприняты попытки использовать ультразвук. По данным [47, 111] в поле ультразвуковых колебаний скорость пропитывания увеличивается в 2,0 – 2,5 раза по сравнению со скоростью пропитывания при свободном капиллярном поднятии, а равновесная высота подъема возрастает в 1,6 раза. Использование этого способа пропитывания дает повышение качества импрегнированного инструмента, но для производственных условий неприемлемо из-за низкой производительности оборудования и вредных условий труда.

В Волжском филиале ВНИИАШ была разработана и создана установка на основе центробежного способа пропитки расплавом серы мелкозернистого абразивного инструмента с наружным диаметром 40 … 100 мм и высотой 14 … 65 мм [74]. Недостатком этого способа, на наш взгляд, является трудность в создании установки для пропитки крупногабаритных шлифовальных кругов, достаточно большая потребляемая мощность установки (18 кВт), а главное, этим способом, как и способом вышерассмотренным, не решается задача удержания расплава серы после пропитывания в порах инструмента.

В производственных условиях ВПЗ-15 отработан технологический процесс пропитки серой АИ, который предусматривает предварительный нагрев инструмента до температуры 250 ^{o}C в течение 24 часов с последующим снижением температуры кругов до 150 ^{o}C. Предварительная термообработка шлифовальных кругов способствует удалению адсорбционной влаги и загрязнений с поверхности пор, что активизирует процесс пропитки. Однако недостаточная температура нагрева инструмента не позволяет полностью удалить все органические и неорганические загрязнения, поэтому в изломе черепка инструмента обнаруживаются непропитанные участки, приводящие к браку. Длительность термообработки, на наш взгляд, играет здесь второ-

степенную роль. Так, по данным [323], нагрев шлифовальных кругов в течение 30 мин при температуре 450 … 500 ^{o}C полностью удаляет адсорбционную влагу из порового пространства инструмента.

Повысить качество пропитки можно за счет введения в импрегнатор различных добавок, например, для серы применяется каптакс [17]. Введение каптакса в расплав серы повышает краевой угол смачивания до 30^{o} [78], а, следовательно, повышается адгезия серы к черепку инструмента. Однако данный состав не нашел применения в промышленности из-за его токсичности.

Для увеличения смачиваемости инструмент может быть обработан в соответствующих средах. Например, перед пропиткой эпоксиднобакелитовым пропиточным составом круг промывается в ацетоне [18], перед пропитыванием в расплаве серы – в трихлорэтилене [19]. Каких-либо результатов исследований по этому способу в доступных информационных источниках не обнаружено. Вероятно, обработка инструмента перед импрегнированием в представленных выше средах должна способствовать удалению адсорбционной влаги и других загрязнений и повышать смачиваемость и адгезию к черепку инструмента.

В производственных условиях Загорского филиала ВНИИППА освоен способ пропитки АИ на керамическом связующем с предварительным пропитыванием его бензином, после чего инструмент загружается в расплав серы, где затем нагревается до температуры расплава [112]. Эффективность этого способа объясняется тем, что бензин, испаряясь, создает локальное разряжение в поровом пространстве инструмента и расплав серы за счет этого лучше засасывается в инструмент. Нельзя полностью согласиться с таким объяснением, так как автор не учитывает тупиковые поры в черепке инструмента, где, наоборот, будет создаваться повышенное давление от испарения бензина, препятствующее проникновению расплава в эти поры. Вероятнее всего, качество пропитки повышается за счет очистки бензином от всевозможных загрязнений пор инструмента, которые уменьшали капиллярные силы всасывания расплава серы.

Анализ вышеперечисленных способов повышения качества пропитки АИ позволяет разделить их по принципу действия на две основные группы: физико-механического и физико-химического. К первой группе способов можно отнести такие способы повышения качества пропитки, в которых используется вакуумирование, ультразвуковая обработка или поле центробежных сил. Улучшение качества пропитки в данных случаях происходит, в основном, за счет принудительного удаления воздуха из порового пространства инструмента или создания дополнительных внешних сил к капиллярным силам, способствующих лучшему проникновению импрегнатора в пропитываемый инструмент. Однако при этом не решается главная задача – повышение смачиваемости, от которой в прямую зависит адгезия импрегнатора к черепку инструмента, а значит и невозможность полного распределения импрегнатора в объеме инструмента и удержания его в порах после пропитывания.

Ко второй группе можно отнести способы, использующие введение в состав импрегнатора различных химических добавок, предварительную термообработку (прокалку) или обработку инструмента ацетоном, бензином, спиртом и т.п. Все эти способы направлены на повышение смачиваемости и адгезии импрегнатора к черепку инструмента, т.е. в той или иной мере решают сразу две вышеперечисленные проблемы, возникающие при пропитке расплавом серы инструмента. Способы второй группы, использующие предварительную термообработку или обработку инструмента различными веществами типа бензина и ацетона улучшают смачиваемость и адгезию расплава серы за счет удаления из порового пространства инструмента адсорбционной влаги и других загрязнений, уменьшающих капиллярные силы в порах черепка инструмента.

В связи с этим наиболее перспективным и эффективным можно считать способ пропитки, включающий предварительную термообработку. Это объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, если ровную и гладкую поверхность тела можно хорошо очистить при помощи органических растворителей (бензина, ацетона, толуола, спирта и т.п.), то внутреннюю поверх-

ность пористого тела, по утверждению А. С. Ахматова [24], очистить затруднительно. Единственно эффективным методом очистки таких поверхностей от адсорбционной влаги и загрязнений, по его мнению, является термический метод. Во-вторых, применяя термический метод очистки, можно совместить процесс охлаждения АИ после его обжига с пропиткой расплавом серы непосредственно на абразивных заводах с целью экономии электроэнергии, затрачиваемой для предварительной термообработки инструмента перед его пропиткой. Для этих целей при изготовлении инструмента, после его обжига, необходимо охлаждать инструмент до температуры расплава серы и затем сразу подвергать пропитыванию [221].

Следует отметить, что в литературных источниках по этому вопросу отсутствуют какие-либо данные исследований, касающихся влияния режимов термообработки на процесс пропитки и качественные показатели инструмента, импрегнированного серой. Существующие в производстве технологии импрегнирования инструментов расплавом серы не в полной мере решают проблему качества их пропитывания из-за малой изученности вопросов влияния разных факторов на этот процесс. Отсутствие методологии комплексного и системного подхода к исследованию и анализу процессов и явлений, сопровождающих взаимодействие АИ с внешними воздействиями и средой, затрудняет разработку научно обоснованных рекомендаций и технологий по стабилизации и регуляции их структурно-механических характеристик и повышению эффективности и качества процессов шлифования.

1.5. Выводы и задачи исследований

На основании анализа научно-технической информации, теоретических и экспериментальных данных, опыта научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий по созданию, совершенствованию и эксплуатации АИ можно сделать следующие выводы.

1. Известные работы по решению проблемы совершенствования АИ требуют систематизации и дальнейшего теоретического обобщения.

2. В вероятностно-статистических, физико-математических и других моделях внутреннего строения черепка инструментов недостаточно учитываются особенности гранулометрического состава абразивных материалов, состоящего из зерен разных размеров (фракций), влияющих на их координацию в формовочных смесях, параметры порового пространства черепка и профиля рабочей поверхности инструментов.

3. В научно-производственных и патентных источниках информации имеется много разнообразных предложений и разработок по совершенствованию АИ путем рационализации абразивных смесей и зерновых составов. Однако, как правило, эти разработки носят эмпирический и изобретательский характер без системного анализа и научно-технологического обоснования, предлагаемых решений и рекомендаций.

4. Известные теоретические и эмпирические оценки влияния внешних факторов на характеристики и показатели инструментов не в полной мере учитывают физико-химические взаимодействия дефектов структур зерна и черепка инструмента с внешней средой, СОЖ и другими воздействиями.

5. Существующие технологии термообработки и импергнирования АИ не решают полностью проблему их качества, эффективности и стабильности в процессах шлифования. Отсутствие методологии системно-комплексного подхода к исследованию и анализу процессов и явлений, сопровождающих взаимодействие инструмента со средой, приводит к противоречивым выводам и затрудняет разработку научно обоснованных технологий изготовления инструментов с регламентированными функциональными свойствами.

В связи с изложенным и для достижения поставленной цели по разработке научно-технического и технологического обеспечения и методологии повышения эффективности и стабилизации работы АИ ставились и решались следующие задачи исследований:

– теоретически и экспериментально исследовать процессы структурообразования при формировании внутреннего строения АИ и проанализировать возникающие при этом напряжения, приводящие к разупрочнению черепка инструмента в свете современных теорий по механике и упругости неоднородных тел;

– разработать теорию и методы составления рациональных зерновых составов и формовочных смесей, обеспечивающих в них регламентированную плотность упаковки абразивных зерен и частиц наполнителей как основу совершенствования структур АИ;

– разработать методику и расчетные зависимости для определения основных параметров профиля рельефа рабочей поверхности АИ с учетом их нормируемых ГОСТом характеристик и способов совершенствования;

– разработать теоретические основы, методики и модели процессов совершенствования АИ с помощью различного вида наполнителей и зерновых составов абразивов и провести экспериментальную проверку эффективности и качества шлифования такими инструментами;

– теоретически и экспериментально исследовать влияние внешней среды, СОЖ и технологических воздействий на прочностные свойства и износостойкость АИ;

– разработать физико-технологические основы процессов регулирования механических характеристик АИ путем их термообработки и импрегнирования. Исследовать термостойкость инструментов на керамической связке и разработать модели определения режимов их термообработки. Провести экспериментальную оценку прочности и эксплуатационных показателей модифицированных инструментов;

– на основе системного подхода разработать научные основы, методологию и технико-технологические принципы создания высокоэффективных АИ путем совершенствования их структур и регулирования механических характеристик.

Глава 2. ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

2.1. Феноменологическая модель контактных взаимодействий частиц в формовочной смеси

В научной литературе по вопросам абразивной обработки имеется множество работ [32, 121, 197, 210, 212, 258, 268, 277, 317, 334 и др.], посвященных исследованиям и моделированию структуры АИ. Достаточно полный и объективный анализ известных работ по структурообразованию при изготовлении инструментов приведен в работе Н. В. Носова [210]. В анализе отмечается, что, несмотря на большой объем теоретических и экспериментальных исследований, их высокий научный уровень, вопросы моделирования структуры инструментов еще недостаточно изучены. Как правило, учитывая технологию изготовления инструментов, модели строились только на основании одной операции (смешивания абразивной массы, прессования, термообработки и т.д.). Кинетика формирования мостиков связки также требует дополнительного изучения. Отмечается и отсутствие обобщенной теоретической модели, связывающей физико-механические свойства, статистические и динамические параметры структуры инструментов. С учетом отмеченных выше недостатков предложена структурная модель инструментов, которая включает в себя все стадии и специфику их изготовления, а также модели зерна, гранулы, контактного взаимодействия и структурного элемента. Выведены расчетные зависимости, связывающие структурные параметры инструмента с объемной концентрацией компонентов в черепке инструмента.

Однако общим недостатком известных моделей является то, что в них недостаточно учитываются особенности и фракционность зерновых составов абразивов и частиц наполнителей, их соотношения по размерам и объемному содержанию в формовочных массах, а также физико-механические и физико-химические процессы контактных взаимодействий между компонентами аб-

разивных смесей при структурообразовании черепка инструмента. Вопросы активации поверхностей абразивных зерен и частиц связки и наполнителей при создании моделей также не рассматривались и не учитывались.

Известно, что изменение зернового состава абразивных материалов, состава связки, введение в смесь того или иного наполнителя непосредственным образом отражается на структурно-механических свойствах и показателях работоспособности инструментов. Кроме того, немаловажное значение имеют и технологические процессы смешивания, уплотнения (прессования), сушки и обжига формовочной массы.

Например, важной и актуальной технологической проблемой является обеспечение необходимой прочности инструментов. Эта проблема может быть решена за счет высокой степени равномерности распределения абразивных зерен и частиц связки во время их смешивания, а также достижения рациональной плотности упаковки зерен путем прессования или введения оптимального количества мелкодисперсных частиц наполнителя [26, 138, 147, 155, 172, 200, 210, 314, 332 др.].

При изучении и систематизации общих закономерностей формирования структуры АИ, необходимо обращать внимание на специфические особенности влияния вышеперечисленных факторов и условий. Такой подход даст возможность разработать научно-обоснованные принципы и методы регулирования и стабилизации свойств и показателей АИ.

В настоящей работе, с позиций физико-химической механики [311], рассмотрим формовочную смесь в виде системы, состоящей из дисперсной фазы и дисперсионной среды. Дисперсная фаза включает в себя абразивные зерна, которые распределены в дисперсионной среде, в качестве которой может служат частицы связки и наполнителей в твердом виде и различные жидкости – смачиватели.

На рис. 2.1 представлена схема энергетических связей и контактных взаимодействий в дисперсной системе «формовочная смесь». Стрелками показаны связи и взаимодействия между компонентами этой системы. Величи-

на энергии связи зерна со связкой E_1 может изменяться в широких пределах и зависит от зернистости (зернового состава) и минерального состава (вида) абразивного материала и дисперсности частиц связки. Величины E_3 и E_4 будут определяться природой сил взаимодействия дисперсионной среды (увлажнителя) и поверхностями зерен и частиц связки. Аналогичные связи существуют между наполнителями, зерном, частицами связки и увлажнителем.

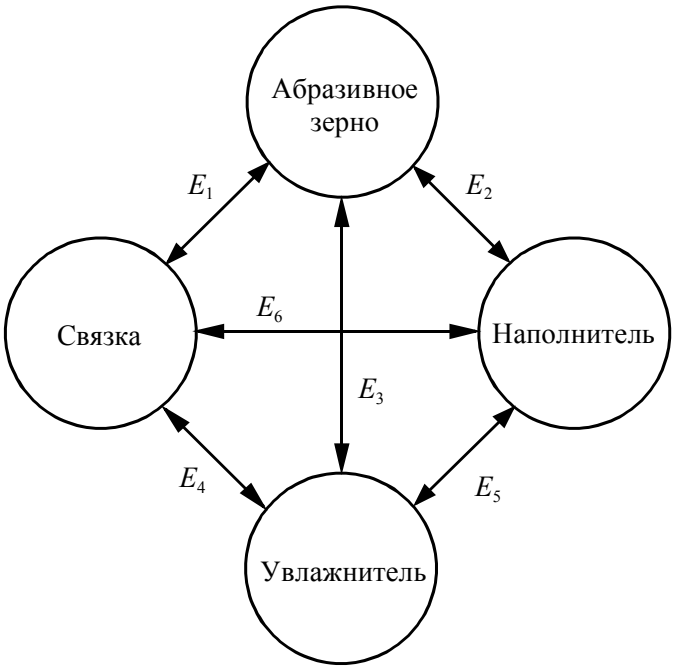


Рис. 2.1. Энергетические связи и контактные взаимодействия в системе «формовочная смесь»: E_1 – энергия связи абразивного зерна со связкой; E_2 – энергия связи абразивного зерна с наполнителем; E_3 – энергия связи абразивного зерна с увлажнителем; E_4 – энергия связи связки с увлажнителем; E_5 – энергия связи наполнителя с увлажнителем; E_6 – энергия взаимодействия связки с наполнителем

В свою очередь дисперсная система «формовочная смесь» (рис. 2.1) характеризуется гетерогенностью, что указывает на наличие межфазной поверхности между дисперсной фазой (твердыми компонентами смеси) и дисперсионной средой (увлажнителем). Существование межфазной поверхности предполагает наличие поверхностного натяжения, которое обусловливается некомпенсированным полем межмолекулярных сил на границах раздела фаз [4, 5, 24, 77, 85, 255, 275, 281, 285].

Определение поверхностного натяжения вытекает из объединенного уравнения первого и второго начал термодинамики. Для гетерогенной системы относительное изменение внутренней энергии E можно выразить как:

$$dE_B = TdS_э - pdV + \sigma dS_Ф, \qquad (2.1)$$

где $S_э$ – энтропия; T – температура; V – объем системы; p – давление; $S_Ф$ – площадь межфазной границы; σ – поверхностное натяжение.

В случае (S, V) = const поверхностное натяжение есть частная производная от внутренней энергии dE_B по межфазной поверхности раздела dS:

$$\sigma = \left(\frac{dE_B}{dS_Ф}\right) S_э, V. \qquad (2.2)$$

Таким образом, поверхностное натяжение σ можно выразить через внутреннюю поверхностную энергию дисперсных систем.

Так как свойства дисперсных систем определяются поверхностными явлениями, то описание их сводится к установлению избыточной поверхностной энергии. При этом исходят из представлений Гиббса, что полная энергия E равна сумме энергий фаз и поверхностной энергии, т.е.

$$E_П = E_{ф1} + E_{ф2} + E_S, \qquad (2.3)$$

где $E_{ф1}$ и $E_{ф2}$ – энергии фазы 1 и 2; E_S – поверхностная энергия системы, E_S = = σ·s.

В работах [255, 285] установили, что на границах раздела существенно изменяются свойства как дисперсной фазы, так и дисперсионной среды. При этом предполагается существование поверхностного слоя по обе стороны от границы раздела фаз. Поэтому полная энергия Гиббса $E_П$ для той же дисперсной системы включает в себя энергию объема межфазного слоя $E_с$:

$$E_П = E_{ф1} + E_{ф2} + E_с + E_S. \qquad (2.4)$$

Как видно, во всех случаях наблюдается избыток энергии дисперсной системы E_S. В связи с этим дисперсная система становится термодинамически неустойчивой. В общем случае условия устойчивости определяются соотношением поверхностного натяжения σ и средним размером частиц и зерен дисперсной фазы d_i и определяется по следующему выражению [255]:

$$\sigma \le \frac{\gamma kT}{d_i^2}, \qquad (2.5)$$

где γ – безразмерный коэффициент; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Кроме этого, исходя из теории устойчивости дисперсных систем по Б. Д. Дерягину, Н. Б. Урьеву и др., энергетические связи и контактные взаимодействия в сильной степени зависят от объема (концентрации) компонентов смеси, влажности и площади межфазной поверхности.

Для большинства дисперсных систем термодинамическое равновесие достигается самопроизвольным снижением поверхностной энергии вследствие уменьшения площади межфазной поверхности за счет агрегатирования частиц дисперсной фазы [285]. При этом проявляется действие сил сцепления между частицами, а также сил поверхностного натяжения, обусловленных физико-химическими процессами. Это подтверждается тем, что формовочная смесь при ее приготовлении и, особенно, при хранении агрегирует и необходимо применять специальные технологические способы и приемы для ликвидации слипания и комкования частиц [34, 97, 193, 231].

При анализе контактных взаимодействий и закономерностей при образовании микроагрегатов в структуре формовочной смеси примем следующие ограничения: зерна и частицы дисперсной фазы являются сферами известного диаметра d; концентрация системы такова, что между зернами и частицами, расположенными рядом, возникает сила притяжения $F_{\text{п}}$; сила связи между частицами $F_{\text{с}}$ больше силы тяжести; масса зерна частиц такова, что не позволяет им участвовать в броуновском движении; в системе присутствуют структурообразующие частицы, отличающиеся от остальных частиц массой ($m_c \neq m_i$), силой сцепления ($F_c \neq F_{ic}$), размером ($d_1 \neq d_i$), меньшим расстоянием от других частиц.

Теоретический и практический интерес представляет вопрос, при каких размерах частиц связки и абразивных зерен образуются из них микроагрегаты, т. е. образования, происхождение которых связан по преимуществу с

процессами коагуляции и сцепления дисперных частиц или зерен силами Ван дер Вальса.

По теории [77] при образовании микроагрегатов из высокодисперсных частиц сила сцепления между ними прямо пропорциональна произведению их размеров на поверхностное натяжение σ границы раздела фаз и обратно пропорциональна сумме их размеров. Эта закономерность выражена в уравнении:

$$F_c = 2\pi\sigma \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}. \qquad (2.6)$$

В случае взаимодействия двух шаровидных частиц равных размеров приведенное уравнение приобретает следующий вид:

$$F_c = \pi\sigma d_i. \qquad (2.7)$$

Подставляя в уравнение (2.7) значение σ, определяемое по формуле (2.5), получим, что

$$F_c = \frac{\pi\gamma kT}{d_i}. \qquad (2.8)$$

Пользуясь формулой (2.8) можно рассчитать силы сцепления F_c и получить зависимость этих сил от размера частиц (зерен) (рис. 2.2, кривая *1*). Сравнивая полученные данные с весом частиц связки (кривая *3*) или зерен (кривая *2*), видно, что устойчивое сцепление возможно лишь между частицами связки размером меньше 0,15 мм, а для абразивных зерен – меньше 0,033 мм. В этот размерный диапазон входят частицы связки и зерна микрошлифпорошков. У более крупных частиц и зерен собственный вес превышает силы сцепления, что будет препятствовать образованию микроагрегатов в результате процессов коагуляции.

Известно, что формовочная смесь с увлажнителем при ее приготовлении и хранении агрегирует и необходимо применять специальные технологические приемы и способы для ликвидации агрегатов [37, 83, 168, 193].

Агрегатирование на микроуровне можно связать с комплексом молекулярных взаимодействий, а на макроуровне с комплексом контактных взаимодействий и капиллярных явлений.

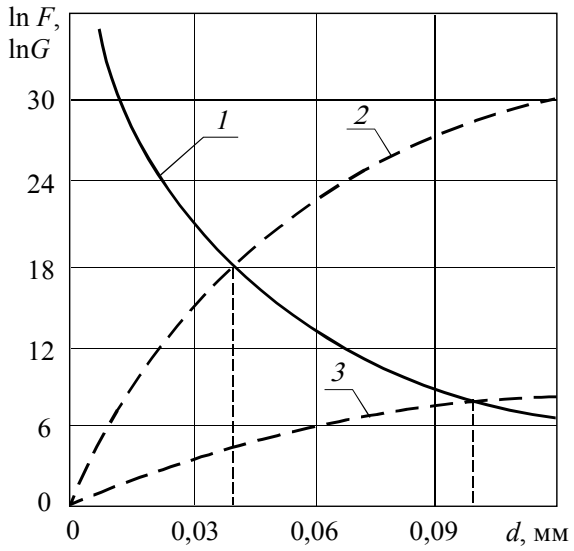


Рис. 2.2. Зависимости сил сцепления F_c (*1*), сил тяжести *G* абразивных зерен (*2*) и частиц связки (*3*) от их размеров

Величину сцепления дисперсных материалов оценивают по их структурно-механическим характеристикам, к которым относят: прочность дисперсного материала на разрыв $\sigma_р$; структурную прочность $\sigma_с$; угол естественного откоса α; насыпную плотность $\rho_н$; размер зерен частиц d_i; удельную их поверхность *S*. Сцепление абразивных зерен и частиц связки зависит от их вида и дисперсности. Наибольшей прочностью, например на разрыв, обладают материалы, имеющие, как правило, наименьшую дисперсность и наибольшее поверхностное натяжение.

Прочность структуры смеси таких материалов определяется по законам смеси и зависит от индивидуальной прочности компонентов и их содержания в смеси V_1 и V_2 и V_3:

$$\sum \sigma_с = \sigma_{с1} V_1 + \sigma_{с2} V_2 + \sigma_{с3} V_3. \qquad (2.9)$$

Зависимость (2.9) справедлива для смесей, состоящих из зерен и частиц примерно одного размера. В случае значительного перепада размера контактирующих зерен и частиц ($d_3/d_с \geq 2{,}5$) изменяется качественная зависимость влияния индивидуальной прочности смешиваемых компонентов на прочность смеси из-за качественно иных контактных взаимодействий.

Для смесей, состоящих из зерен и частиц примерно одного размера, структурная прочность σ_c будет увеличиваться с уменьшением их размера примерно по следующей зависимости:

$$\sigma_c = A \cdot d_i^{-\alpha}, \qquad (2.10)$$

где A – коэффициент; d_i – размер зерна и частиц связки; α – показатели степени.

Во втором случае, когда зерна и частицы связки по размерам резко отличаются ($d_з \geq d_c$), можно ожидать сложной зависимости прочности σ_c от относительного содержания зерен к связке, которая будет описываться следующим выражением:

$$\sigma_c = \begin{cases} B \cdot K_V^{\beta} \text{ при } 0 \leq K_V \leq K_{V\text{опт}}, \\ C \cdot K_V^{-\gamma} \text{ при } K_{\text{фопт}} \leq K_V \leq K_{V\,\max}. \end{cases} \qquad (2.11)$$

где $K_V = \dfrac{V_з}{V_c}$ – коэффициент относительного содержания зерна $V_з$ к содержанию связки V_c.

В случае, когда $d_3/d_c \geq 2{,}5$ более вероятен контакт между разновеликими составляющими смеси, т.е. между зернами и частицами связки. Согласно (2.7) между зерном и частицами связки возникает сила сцепления в десятки раз больше, чем между частицами связки. Под действием этих сил, мелкие частицы связки притягиваются к поверхности крупного зерна, в результате чего образуется структурный агрегат. Образование подобных структурных агрегатов ведет к изменению поверхности разрушения дисперсной системы. Граница разрушения в этом случае пройдет по поверхности раздела между структурными агрегатами, что увеличивает площадь разрушения и, соответственно, повышается сопротивляемость структуры внешним воздействием.

При анализе механизмов формирования макроструктуры черепка инструмента целесообразно выделить характерные случае взаимодействия связующего с абразивными зернами.

Первый случай, когда адгезия связки к зерну $F_а$ выше ее когезионной прочности $P_к$, $F_а > P_к$. Такой случай возможен при специальной обработке связки или зерна, инициирующей фронт связи от поверхности раздела в периферийные зоны матрицы (материала связки). В черепке инструмента возникают радиальные трещины, которые объединяясь, разделяют черепок на отдельные блоки, в которых трудно реализовать механические характеристики зерен при воздействии внешней нагрузки.

Второй случай, когда адгезионная и когезионная прочность равны, $F_а = P_к$. Исследования, проведенные на модельных материалах, показали сложное распределение деформаций, напряжений и трещин в матрице [11, 95]. Трещины зарождаются и развиваются как в периферийных участках матрицы, так и на границах раздела с зернами в участках перехода к ослабленной адгезии. Прогнозирование процесса трещинообразования матрицы при ее избирательной адгезии к абразивным зернам затруднено, что не позволяет достаточно надежно конструировать материалы с заданными физико-техническими свойствами.

Третий случай, когда адгезия связки к зерну ниже ее когезионной прочности, $F_а < P_к$. Такая ситуация наиболее вероятна в реальных инструментах с карбидкремниевыми зернами. В зависимости от объемного содержания зерен, способов формования и кинетики структурообразования черепка опасные зоны потенциального зарождения трещин способны мигрировать по границе раздела связки с зерном. Объемно-геометрические параметры макроструктуры инструмента вызывают появление градиентов усадочных деформаций по величине и направлению. Возникающие градиенты в матрице приводят к явлениям формоизменения связки на границе с зернами. Под действием концентрированных напряжений или деформаций возможно нарушение целостности матрицы и появление зародышевой трещины.

В случае $F_а < P_к$ представляется возможным целенаправленно управлять структурообразованием черепка инструмента на макроуровне. Повысить начальную адгезию связки к зерну можно путем модификации состава связ-

ки, термической обработкой или очищением поверхности зерна химически активными веществами. Например, введением в состав связки боросодержащих веществ [26] или термообработкой зерна [84, 227].

Формирование макроструктуры инструментов в значительной степени определяется влиянием абразивных зерен на характер деформаций, напряжений и трещинообразований (дефектности) связки. В свою очередь, кинетика развития трещин (дефектов) и расход энергии, необходимый для их роста, зависят от свойств микроструктуры черепка инструмента. Поэтому при решении задач оптимизации структуры необходим комплексный подход к конструированию структур на каждом масштабном уровне с учетом их взаимовлияния при структурообразовании и эксплуатации материала. Улучшение структуры на одном из этих уровней носит локальный характер и не может внести радикальные изменения в свойства материала полиструктурного строения, каким является черепок абразивного инструмента.

Таким образом, совершенствование структуры и свойств АИ связано с конструированием микро- и макроструктур с учетом контактных взаимодействий между компонентами формовочной смеси в период структурообразования.

2.2. Феноменологическая модель процесса смешивания компонентов формовочной смеси

В процессе смешивания абразивные зерна, частицы связки и наполнителя без увлажнителя под действием возникающих сил и напряжений начинают перемещаться относительно друг друга с разной скоростью, обусловленной их размерами. В результате чего зерна, как более крупные, двигаются медленней, а более мелкие частицы связки и наполнителей – быстрее, что приводит к их столкновениям и образованием агрегатов из двух и более частиц и зерен. Таким образом, по мере такого взаимодействия происходит агре-

гирование дисперсной фазы, вплоть до формирования структурных агрегатов, в которых абразивные зерна являются структурообразующими.

Можно рассчитать вероятность контактирования зерен и частиц связки, используя понятие сечения соударения [315], по следующей зависимости:

$$G_K = 2\pi \int_0^{\infty} f(V, l_Ц) l dl, \tag{2.12}$$

где V – скорость взаимного перемещения зерна и частиц; $l_Ц$ – расстояние от центра массы частиц до прямой, по которой двигалось зерно до взаимодействия.

Принимая, что расстояние между абразивными зернами в смеси равно $L_З$, определим вероятность того, что в сферу радиусом R_i, в центре которой расположено абразивное зерно, попадает хотя бы одна частица связки. При этом считаем, что число абразивных зерен в некотором объеме V_N является случайной величиной, подчиняющейся закону Пуассона с ожиданием

$$N_З = n_{ср} \cdot V_N, \tag{2.13}$$

где $n_{ср}$ – число зерен в единице объема.

Закон распределения расстояния $L_З$ от любого абразивного зерна до ближайшей частицы связки есть вероятность P_0 того, что в сферу радиусом R_i попадает хоть одна частица связки. Тогда

$$P_0 = 1 - \exp\left[- n_{ср} V_N (L_З)\right], \tag{2.14}$$

где $V_N = 4/3\ (L)^3$; $n_{ср} = 3\varphi_з / 2\pi d^3_З$; $\varphi_з$ – объемная концентрация зерен; $d_З$ – размер абразивного зерна.

Для ячеистой модели структуры и кубической упаковки зерен и частиц расстояние между центрами абразивных зерен определяется по выражению [311]:

$$L_З = d_з \left(\frac{\pi}{6\varphi_З} \right)^{1/3}. \tag{2.15}$$

Равномерное распределение частиц связки между абразивными зернами сводит к минимуму агрегацию частиц связки, при которой увеличивается

их размер, что вызывает впоследствии в отдельных местах черепка инструмента нехватку связки или наоборот излишки ее.

Вторым условием равномерного распределения частиц связки в абразивной смеси после увлажнения является их критическая концентрация, которую можно определить по следующему выражению [285]:

$$\varphi_{\text{с кр}} = \frac{\pi}{6}\left[exp\left(1+\bar{\delta}\right)\right]^{-3}, \qquad (2.16)$$

где $\bar{\delta}$ – среднестатистический коэффициент близкодействия, учитывающий статистический характер активной части адсорбционной оболочки увлажнителя вокруг частиц связки.

При этом агрегирование частиц связки характеризуется неравенством

$$\varphi_{\text{с}} > \varphi_{\text{с кр}}. \qquad (2.17)$$

Согласно (2.16) критическая концентрация уменьшается при росте радиуса адсорбционной оболочки вокруг частиц связки. В этом случае к минимальному значению сводится агрегация абразивных зерен между собой, что способствует их равномерному распределению по объему смеси.

Для определения качества формовочной смеси по равномерности распределения абразивных зерен и частиц связки или наполнителя рассмотрим кинетику процесса их смешивания. При перемешивании двух и более компонентов смеси с разными концентрациями создаются определенные условия для переноса одного компонента с малой концентрацией в массу компонента с большой концентрацией. В связи с этим процесс смешивания можно задать математической моделью массопереноса [195] в виде дифференциального уравнения в частных производных типа уравнения потока вещества, направленного в сторону уменьшения градиента концентрации.

Для этого предположим, что первоначально формовочная смесь состоит из неравномерно заполненных частиц связки в среде абразивных зерен, а затем в процессе смешивания происходит их взаимное перемещение. Обозначим через $V_{\text{с}}(x, t)$ содержание частиц связки в сечении x в момент времени

t. Массу частиц *dM*, вовлекаемую в движение за время *t*, определим по формуле:

$$dM = -K_{\text{р.с.}} \frac{\partial V_c}{\partial x} \cdot S dt, \tag{2.18}$$

где $K_{\text{р.с.}}$ – коэффициент равномерности смешивания; S – площадь выбранного сечения.

С изменением содержания связки $V_{\text{с}}$ на участке x_1, x_2 имеем:

$$dM = \int_{x_1}^{x_2} \rho_{\text{п}}(x) V_{\text{с}} S dx, \tag{2.19}$$

где $\rho_{\text{п}}$ – коэффициент пористости смеси ($\rho_{\text{п}} \sim 1/d_{\text{з}}$).

Закон сохранения массы для участка смеси x_1, x_2 имеет следующий вид:

$$S \int_{t_1}^{t_2} \left[K_{\text{р.с.}}(x_2) \frac{\partial V_{\text{с}}}{\partial x} - K_{\text{р.с.}}(x_1) \frac{\partial V_{\text{с}}}{\partial x} \right] dt = S \int_{x_1}^{x_2} \rho_{\text{п}} \left[V_{\text{с}}(t_2) - V_{\text{с}}(t_1) \right] dt. \tag{2.20}$$

Согласно теореме о среднем формулу (2.20) можно представить в виде:

$$S \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{\text{р.с.}} \frac{\partial V_{\text{с}}(x,t)}{\partial x} \right] = \rho_{\text{п}} \frac{\partial V_{\text{с}}}{\partial t}. \tag{2.21}$$

В окончательном виде уравнение, описывающее процесс смешивания, будет иметь следующий вид:

$$\rho_{\text{п}} \frac{dV_{\text{с}}}{dt} = S \cdot K_{\text{р.с.}} \frac{\partial^2 V_{\text{с}}}{\partial L^2}, \tag{2.22}$$

где $L = Vt$ – путь перемещения частиц связки в смесителе; V – средняя скорость перемешивания частиц связки.

При граничных условиях $V_{\text{с}}(x, 0)$, $x > 0$ и начальных условиях $V_{\text{с}}(0, t) = V_{\text{з}}$, $t \geq 0$; $V_{\text{с}}(\infty, t) = 0$, $t \geq 0$ решением дифференциального уравнения (2.22) будет:

$$K_V = \left(\frac{S \cdot t \cdot K_{\text{р.с.}}}{4\pi \cdot \rho_{\text{п}} V^2 t^2} \right)^{0,5} \cdot \exp(0{,}25 \cdot t), \tag{2.23}$$

Исходя из формулы (2.23), определим коэффициент равномерности смешивания:

$$K_{\text{р.с.}} = \frac{4\pi \rho_{\text{п}} \cdot K_V^2 \cdot V^2 \cdot t^2}{S \cdot \left[\exp(0{,}25t) \right]^2}. \tag{2.24}$$

Как видно из выражения (2.24) на качество формовочной смеси по равномерному распределению в объеме ее компонентов при заданных режимах смешивания влияют коэффициент пористости упаковки смеси и соотношение объемного содержания абразивных зерен и частиц связки или наполнителей. Учет этих параметров при совершенствовании структурно-механических характеристик АИ позволит повысить их качество, а также эффективность и надежность в работе.

2.3. Феноменологическая модель процесса формования шлифовальных кругов

Если при смешивании главной задачей является обеспечение равномерного распределения между собой и по объему компонентов формовочной смеси, то при операции формования заготовок АИ требуется достижение заданной равной плотности смеси после прессования как по высоте, так и по диаметру (ширине) изделия. Все это будет способствовать повышению качества и уровня прочности инструментов.

В настоящее время известны следующие методы формообразования АИ: статическое прессование, гидростатическое прессование, пластическое формование и шликерное литье. В отдельных случаях применяются виброуплотнение и взрывное прессование. В связи с тем, что наиболее распространенным методом является статическое прессование, ниже рассмотрим процессы и факторы, влияющие на этот вид формования.

Особенности процесса статического прессования заключаются в следующем. В процессе уплотнения формовочной смеси абразивные зерна под действием приложенного давления сдвигаются относительно друг друга, заполняя пустотности формовки, что способствует повышению ее плотности. Однако при давлении выше оптимального начинается механическое разрушение зерен и перепрессовка формовки, которая обусловлена закреплением воздуха в порах. В результате этого при выемке прессовки из формы наблю-

дается резкое усиление трения о стенки формы и упругое расширение формовки вплоть до ее частичного разрушения. Поэтому первостепенным условием не допущения дробления зерна и перепрессовки является определение и назначение в каждом конкретном случае оптимального давления прессования при прочих равных условиях производства АИ. Знание закономерностей процесса уплотнения и зависимостей удельного давления прессования от различных факторов позволяет целенаправленно регулировать характеристики инструментов, обеспечивая необходимую степень их равноплотности, твердости и прочности. Обзор и анализ многочисленных теоретико-экспериментальных исследований по вопросам уплотнения и прессования различных материалов и смесей [26, 33, 36, 51, 71, 96, 129, 193, 210, 213, 236, 262 и др.] позволили установить аналитическую зависимость давления прессования от основных действующих факторов в общем виде:

$$P_{\text{пр}} = f\left(Z, N, C, H, D_{ш}, П, \sigma_{сж}, W\right), \qquad (2.25)$$

где Z – зернистость абразивного материала; N – номер шифра твердости инструмента; C – структура инструмента; H – толщина уплотняемого слоя; $D_{ш}$ – размер штампа; $П$ – пористость инструмента; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие формовочной массы; W – влажность формовочной массы, при прочих равных условиях: одинаковый зерновой состав и вид абразивного материала, тип связки и др.

Для выявления зависимости давления прессования от некоторых факторов были обработаны экспериментальные данные, представленные в работе [26]. В результате этого получены зависимости удельного давления прессования от зернистости смеси, структуры и твердости инструмента (рис. 2.3).

Зависимости, показанные на рис. 2.3, описываются следующими степенными уравнениями:

$$P_{\text{пр}} = a \cdot Z^{-\alpha}; \qquad (2.26)$$

$$P_{\text{пр}} = b(C+1)^{-\beta}; \qquad (2.27)$$

$$P_{\text{пр}} = eN^{\gamma}, \qquad (2.28)$$

где α, β, γ – показатели степеней; a, b, e – постоянные коэффициенты; N – номер шифра твердости инструмента; при этом твердости F(ВМ1) присваивается номер 1, G(ВМ2) – номер 2 и т.д.

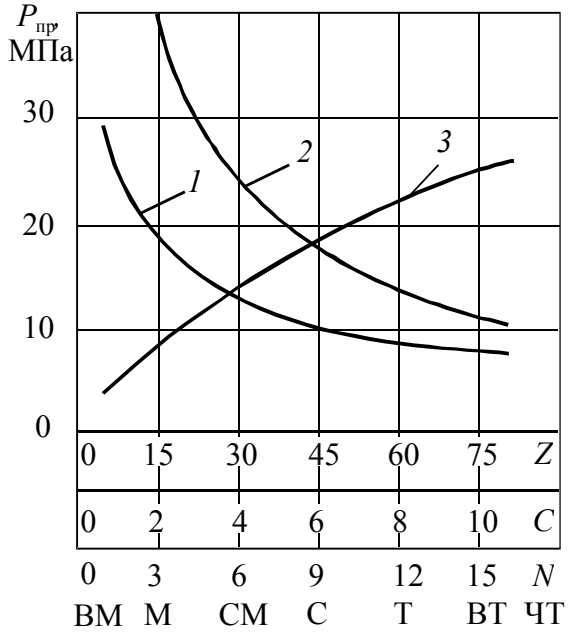


Рис. 2.3. Зависимости удельного давления прессования $P_{пр}$ от зернистости смеси (*1*), структуры (*2*) и твердости (*3*) инструмента: *1* – $P_{пр} = f(Z)$; *2* – $P_{пр} = f(C)$; *3* – $P_{пр} = f(N)$

Для определения напряженного состояния формовки в процессе прессования рассмотрим действие сосредоточенной силы F, приложенной на поверхности пространства перпендикулярно ограничивающей плоскости (рис. 2.4).

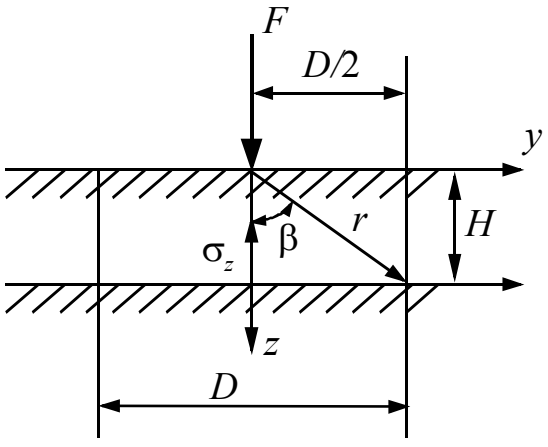


Рис. 2.4. Схема к определению напряжений в теле формовки при действии силы F

Согласно теории упругости и принципу линейной деформируемости дисперсных смесей [2, 7, 9, 11, 108] при условии отсутствия предельного напряженного состояния для определения вертикальных сжимающих напряжений σ_z используется известная формула Буссинеска-Фламана в следующем виде:

$$\sigma_z = \psi \frac{F \cdot k_p \cdot H^{\nu}}{\pi \cdot D^2 \cdot D^{\nu}}, \qquad (2.29)$$

где k_p – коэффициент концентрации напряжений (ν = 1, 2, 3, 4 и т.д.); ψ – постоянный коэффициент; $D_ш$, H_e – диаметр штампа и толщина деформационного слоя.

При величине удельной нагрузки $F/\pi D_ш^2$, не превышающий предел прочности формовочной смеси σ_0, т.е. в тех случаях, когда не происходит перепрессовки и разрушения формовки, коэффициент концентрации напряжений $\nu = 1$. Тогда

$$\sigma_z = \psi \sigma_{сж} \cdot \frac{H_c}{D_ш}. \qquad (2.30)$$

Отсюда следует, что с увеличением высоты заготовки АИ при прочих равных условиях удельное давление прессования необходимо повышать, а при увеличении диаметра (ширины) инструмента – снижать. Однако, при прессовании одного и того же формовочного материала с одинаковым соотношением *H/D* будут возникать одинаковые напряжения σ_z. Кроме того, при определении давления прессования можно пользоваться пропорциональной (линейной) зависимостью его от геометрических параметров формовки инструмента, что подтверждается также теоретическими исследованиями и экспериментальными данными, представленными в работах [36, 236, 280].

Известно [26, 231, 236 и др.], что влажность формовочной смеси оказывает значительное влияние на показатели ее упаковки, что сказывается на технологическом процессе прессования. В работе [231] показано влияние влажности *W* на упаковочную способность электрокорунда различной дис-

персности. Первоначально с повышением влажности уменьшается коэффициент упаковки $K_{уп}$, т.е. объем твердой фазы, состоящей из абразивных зерен и частиц связки в заданной объеме смеси, уменьшается за счет уплотнения. Затем при достижении оптимальной влажности W_0 коэффициент $K_{уп}$ возрастает за счет разуплотнения смеси под действием внутреннего капиллярного давления.

Зависимость $K_{уп}$ от влажности W описывается аналитическим уравнением в следующем виде:

$$K_{уп} = A\left(\frac{W}{W_0} - \ln\frac{W}{W_0}\right), \qquad (2.31)$$

где A – постоянный коэффициент.

Аналогичная зависимость будет наблюдаться и между удельным давлением прессования и влажностью формовочной смеси.

Путем совместного решения уравнений (2.26), (2.27), (2.28), (2.30) и (2.31), устанавливающих зависимости давления прессования $P_{пр}$ от выше рассмотренных факторов, и после ряда преобразований выведено уравнение в следующем виде:

$$P_{пр} = \psi \cdot \sigma_0 \frac{H}{D-d} \cdot \left(\frac{W}{W_0} - \ln\frac{W}{W_0}\right) \cdot Z^{-\alpha_p} \cdot (C+1)^{-\beta_p} \cdot N^{\gamma_p} \cdot K_{вз}, \qquad (2.32)$$

где Z – зернистость инструмента по ГОСТ 3647-80; H, D и d – геометрические размеры инструмента; α_p, β_p и γ_p – показатели степеней; $K_{вз}$ – коэффициент, учитывающий вид абразивного материала.

В табл. 2.1 представлены значения коэффициентов и показателей степеней.

Таблица 2.1

Значения коэффициентов и показателей степеней

Постоянный коэффициент ψ	Прочность смеси σ_0, МПа	Оптимальная влажность W_0, %	Показатели степеней			Коэффициент вида зерна $K_{вз}$	
			α	β	γ	24А, 25А	63С, 64С
178,1	1,4 – 2,0	10 – 15	0,5	0,8	0,6	1,0	1,6 – 1,7

Расчетные значения удельного давления прессования $P_{\text{пр.расч.}}$ по формуле (2.26) и экспериментальные данные $P_{\text{пр.эксп.}}$ [26] сведены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Расчетные и экспериментальные значения удельного давления прессования

Абразивный инструмент	$P_{\text{пр.эксп.}}$, МПа	$P_{\text{пр.расч.}}$, МПа	Абразивный инструмент	$P_{\text{пр.эксп.}}$, МПа	$P_{\text{пр.расч.}}$, МПа
25AF15007V	26,3	25,5	64CF60K5V	19,4	18,0
25AF60X5V	25,8	27,6	64CF60S5V	32,1	30,4
25AF60L7V	9,1	9,8	64CF60H7V	11,2	10,7
25AF24K5V	5,0	4,7	64CF60V7V	31,7	32,6

Анализ данных, представленных в табл. 2.2, показывает, что расчетные значения давления прессования отличаются от экспериментальных на 5 ÷ 10 %, что свидетельствует о правомерности использования зависимости (2.32) для определения оптимальной величины давления прессования в каждом конкретном случае.

Вскрытие механизмов процессов смешивания и прессования формовочной смеси и полученные зависимости позволяют направленно регулировать и стабилизировать структурно-механические свойства формовочных смесей и изготавливать АИ с регламентированными характеристиками и показателями в работе.

2.4. Феноменологическая модель термообработки шлифовальных кругов на керамической связке

Следующим технологическим процессом после прессования является сушка формовок (заготовок инструмента), которая производится с целью удаления влаги и приобретения ими достаточной прочности для транспортирования в печи для обжига. Механическая прочность заготовок повышается за счет склеивания и «цементирования» контактных связей между зернами

при испарении влаги с 5 ÷ 8 до 0,4 ÷ 0,6 %. Режим сушки выбирается исходя из зернистости изделий, их размеров и массы. Сушка обычно производится при температуре, не превышающей 100 ^{o}C.

После процесса сушки заготовки (формовки) направляются в печи на обжиг, режим которого включает постепенный подъем температуры до 1200 ÷ 1250 ^{o}C, выдержку 2 ÷ 5 часов, а затем медленное охлаждение вместе с печью.

Следует отметить, что природа физико-химических и механических процессов структурообразования черепка инструмента на керамическом связующем при его обжиге и охлаждении до сих пор практически мало исследована. Нет единого взгляда на механизм и ход физических и механических явлений при обжиге формовки черепка инструмента на плавящейся и спекающейся связках, а также недостаточно изучено влияние объемного содержания связующего и пористости формовок на процессы контактного взаимодействия зерна с расплавленной связкой.

При исследовании физико-механических процессов во время обжига рассмотрим процессы, происходящие в теле заформованных электрокорундовых инструментов. При достижении температуры плавления связка, переходя в жидкое состояние, под действием капиллярных сил сосредотачивается в зонах контактов абразивных зерен. Это может приводить к притягиванию зерен друг к другу или их взаимному отталкиванию. Силы притяжения или отталкивания зависят от размера и формы зерен, типа их контактов между собой, свойств и объемного содержания связки.

В работе [94] указывается, что в реальных формовочных смесях встречаются несколько типов контактов, таких как «конус – плоскость», «нож – нож», «нож – плоскость», «конус – конус» и некоторые другие. Однако анализ геометрии этих контактов свидетельствует о том, что их можно подразделить на два основных контакта, имеющих острые или тупые углы. В связи с этим в дальнейшем будем различать «острый» контакт и «тупой» контакт (рис. 2.5).

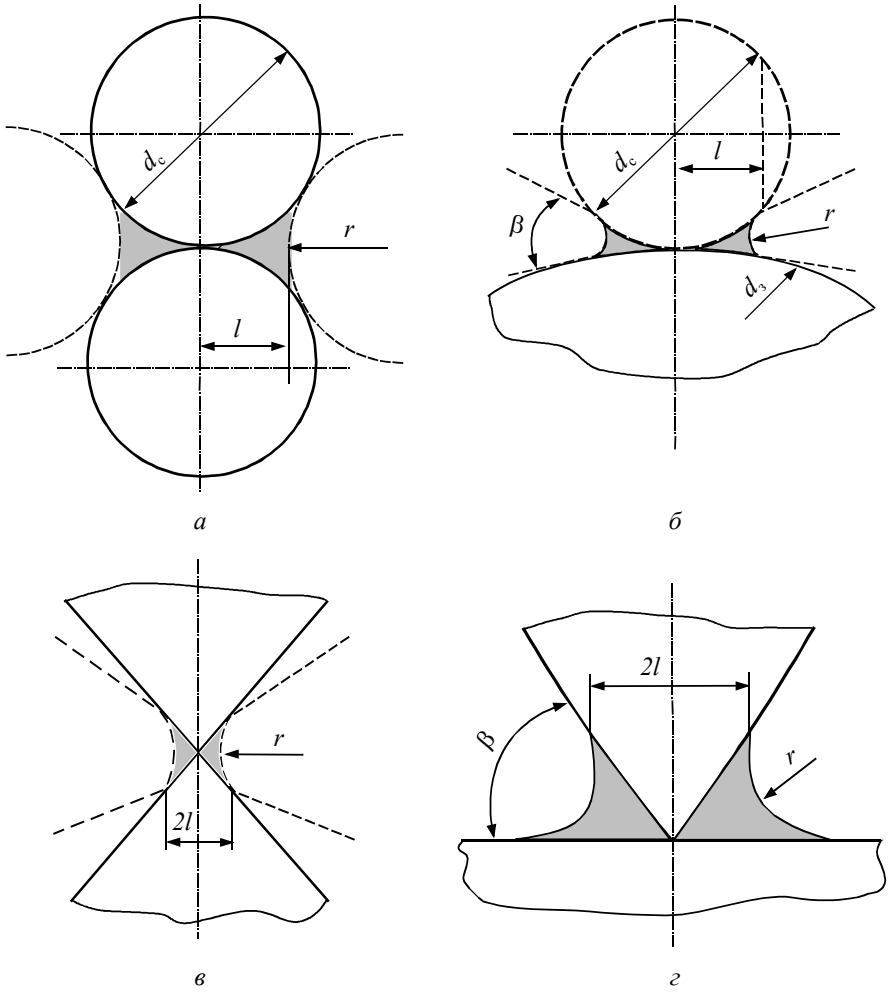
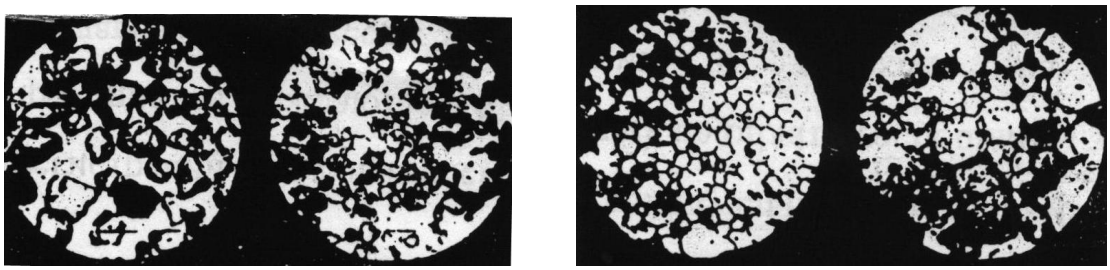


Рис. 2.5. Типы контактов между сферическими равного размера частицами (*а*), частицами разного размера (*б*) и абразивными зернами между собой (*в*, *г*): *а*, *в* – «тупой» контакт; *б*, *г* – «острый» контакт

Для подтверждения выше сказанного, в данной работе использовался метод микрофотографирования россыпей абразивных зерен в один слой на плоскости. На рис. 2.6 представлены микрофотографии абразивных зерен.



а *б* *в* *г*

Рис. 2.6. Микрофотографии электрокорундовых зерен: *а* – зернистость № 100;

б – зернистость № 40; *в* – зернистость № 25; *г* – зернистость № 10

Видно, что в абразивных зернах крупной зернистости преобладают «острые» контакты, а в мелкозернистых – «тупые» контакты. Кроме того, данные, приведенные в табл. 2.3, показывают, что по мере уменьшения размера зерен количество «острых» контактов уменьшается, а «тупых» контактов увеличивается.

Таблица 2.3

Зависимость количества «острых» и «тупых» контактов от зернистости абразива 25А

Зернистость абразива	100	40	25	16	10	М40
Количество «острых» контактов, %	88,8	74,9	68,5	61,6	46,2	37,3
Количество «тупых» контактов, %	11,2	25,1	31,5	38,4	53,8	62,7

Как видно из табл. 2.3, количество «острых» контактов между зернами в исследуемом интервале зернистостей изменяется в 2 ÷ 8 раз по сравнению с количеством «тупых» контактов.

При исследовании влияния типа контакта на силы сцепления первоначально рассмотрим случай, соответствующий «тупому» контакту между зернами или частицами равного размера (рис. 2.5, *а*, *в*). При таком контакте расплавленная связка, образуя мениск, будет развивать отрицательное капиллярное давление по Лапласу:

$$p = \sigma\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l}\right), \qquad (2.33)$$

где r и l – радиус и длина мениска.

Для удобства расчетов заменим сферические поверхности параболоидами вращения, соприкасающимися своими вершинами. В этом случае радиус мениска определяется по формуле:

$$r = \frac{l^2}{d}, \tag{2.34}$$

а объем расплавленной связки в контакте выразится следующим уравнением:

$$V_{p_{св}} = \frac{\pi l^4}{d}. \tag{2.35}$$

При допущении, что на каждый кубик смеси с ребром d приходится одна частица или зерно, то число точек соприкосновений в единичном объеме будет равно $1/d^2$, а отношение объема связки $V_{св}$ к объему смеси $V_{см}$ определяет относительное содержание связки $V_{ос}$ в условных единицах:

$$V_{ос} = \frac{V_c}{V_{см}} = \frac{3V_c}{d^3}. \tag{2.36}$$

Из формул (2.35) и (2.36) находим, что:

$$l = d\sqrt[4]{\frac{V_{ос}}{3\pi}}. \tag{2.37}$$

Сила сцепления $F_с$ между двумя зернами или равного размера частицами может быть приближенно определена так:

$$F_c = \pi l^2 p. \tag{2.38}$$

Заменяя p и l их значениями из формул (2.33) и (2.37) и умножив силу $F_с$ на число точек соприкосновения, получим удельную силу сцепления, отнесенную к единице поверхности:

$$F_{с\,уд} = D_1\left(1 - \sqrt[4]{\frac{V_{ос}}{3\pi}}\right), \tag{2.39}$$

где $D_1 = \frac{\pi\sigma}{d}$.

Характер зависимости между удельной силой сцепления $F_{с\ уд}$ и относительным содержанием связки $V_{ос}$ при «тупом» контакте показан на рис. 2.7 (кривая *1*). Из графика видно, что при увеличении содержания связки в формовочной смеси силы сцепления между частицами или зернами равного размера резко уменьшаются, что препятствует слипанию и комкованию, например частицам наполнителей между собой в процессе обжига. Это способ-

ствует более равномерному их распределению и усилению контактного взаимодействия частиц наполнителей с абразивными зернами.

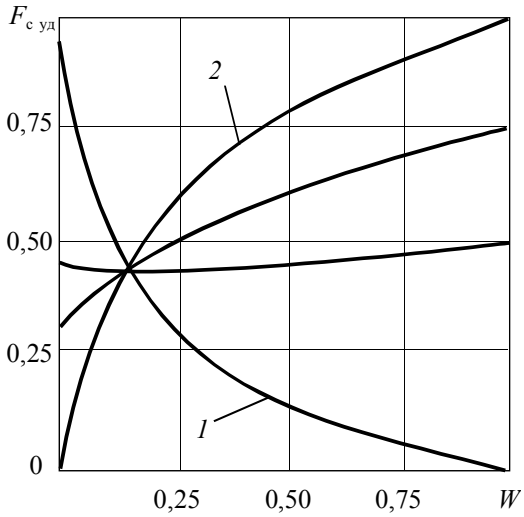


Рис. 2.7. Зависимость сил сцепления $F_{\text{с уд}}$ от содержания увлажнителя V_{oc} в относительных единицах: *1* – «тупой» контакт; *2* – «острый» контакт

Другие явления получаются в случае «острого» контакта (рис. 2.5, *б*, *г*) при взаимодействии, например мелкодисперсных частиц наполнителя с крупнодисперсными зернами. Во-первых, в таком контакте будет развиваться положительное капиллярное давление:

$$p = \sigma\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{l}\right). \qquad (2.40)$$

Во-вторых, объем расплавленной связки в таком контакте выражается следующей формулой:

$$V_{oc} = \frac{2}{3}\pi\beta l^3, \qquad (2.41)$$

где β – угол контакта в радианах.

Исходя из законов геометрии формулу (2.38) можно записать так:

$$F_c = \pi\sigma l\left(\frac{2}{\beta} - 1\right). \qquad (2.42)$$

Используя формулы (2.36), (2.41) и (2.42) и опуская соответствующие преобразования можно записать, что

$$F_{\text{с уд}} = \frac{\pi\sigma}{d}\sqrt[3]{\frac{2}{\pi\beta}}\left(\frac{2}{\beta}-1\right)\sqrt[3]{V_{oc}}. \qquad (2.43)$$

Далее, обозначая все величины, не зависящие от V_{oc}, через D_2 получим:

$$F_{c\ \text{уд}} = D_2\sqrt[3]{V_{oc}}. \qquad (2.44)$$

В соответствии с формулой (2.43) на рис. 2.7 (кривая *2*) графически изображен характер зависимости между $F_{\text{с уд}}$ и V_{oc}. Из графика видно, что при «остром» контакте и увеличении содержания связки силы сцепления быстро растут. Это будет способствовать образованию структурных агрегатов (гранул), состоящих из абразивных зерен, покрытых частицами наполнителя.

Следует отметить, что, в действительности, в абразивном материале любой зернистости имеются зерна разного размера и формы, поэтому можно ожидать одновременного действия «тупого» и «острого» контактов. Степень преимущественного влияния того или иного контакта определяется относительными количествами соответствующих зерен в формовочной массе (табл. 2.3), что подтверждается переходными кривыми, расположенными на рис. 2.5 между кривой *1*, соответствующему «тупому» контакту, и кривой *2*, соответствующей «острому» контакту. Таким образом, изменяя целенаправленно зерновой состав формовочной массы, можно в широких пределах изменять структурно-механические свойства абразивных инструментов.

Однако, при полном заполнении пор формовочной смеси расплавленной связкой, т. е. при $V_{oc} > 1$, силы сцепления будут падать. Это объясняется тем, что в данном случае исчезают капиллярные мениски в поровом пространстве смеси, а вследствие этого уменьшается действие сил сцепления между абразивными зернами. Это может приводить крупнозернистые формовки при обжиге к деформации и разрушению. При изготовлении шлифовальных кругов из электрокорундовых материалов зернистостью № 25 и № 40 было обнаружено [55], что излишнее увеличение содержания связки для повышения твердости приводит к ее вытеканию и деформации круга.

Для изучения вопроса и вскрытия причин неудовлетворительного качества, а в иных случаях и невозможности изготовления АИ с некоторыми сочетаниями их твердости и структуры использовались зависимости, вытекающие из теории капиллярной связности.

На рис. 2.8 представлены зависимость сил сцепления F_c в условных единицах (кривая *1*) и зависимость прочности на разрыв образцов инструментов (кривая *2*) от объемного содержания расплава связки $V_{р.св.}$ отнесенного к объему пор $V_п$ в формовках.

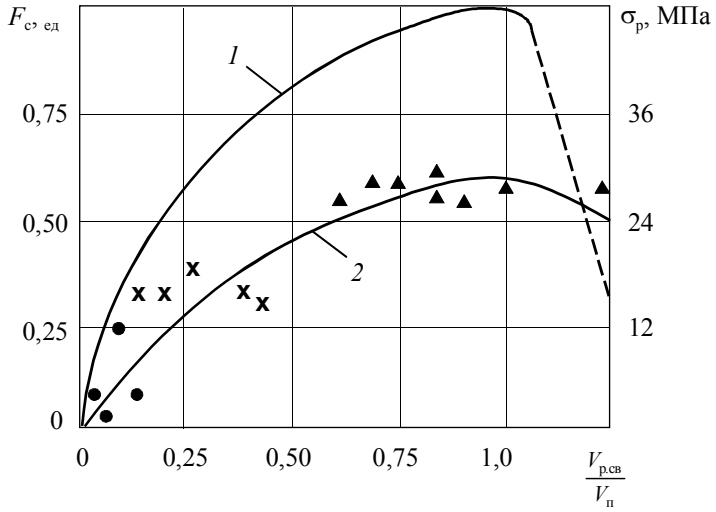


Рис. 2.8. Зависимость сил сцепления F_c (*1*) между зернами при обжиге формовок и прочности на разрыв $\sigma_р$ (*2*) инструментов от относительного содержания расплава связки: • – ВМ; **x** – СМ; ▲ – ЧТ

Зависимость сил сцепления в пределах достижения равенства между $V_{р.св.}$ и $V_п$ описывается следующим уравнением:

$$F_c = \left(\frac{V_{р.св}}{V_п} \right)^{1/3}. \qquad (2.45)$$

При определении соотношений между объемами зерен, связки и пор в зависимости от номера структуры и твердости инструментов использовались табличные данные и формулы, представленные в работе [193]. Представляя объемы зерна $V_з$, связки $V_{св}$ и пор $V_п$ через известные формулы:

$$V_з = 62 - 2C; \qquad (2.46)$$

$$V_{\text{св}} = -13 + 1{,}5N + 2C; \tag{2.47}$$

$$V_{\text{п}} = 100 - (V_{\text{з}} + V_{\text{с}}). \tag{2.48}$$

Зависимость (2.45) можно описать через нормируемые ГОСТом характеристики инструмента в следующем виде:

$$F_{\text{с}} = \left(\frac{1{,}5N + 2C - 13}{51 - 1{,}5N} \right)^{1/3}. \tag{2.49}$$

В том случае, когда объем связки будет больше объема пор в формовке, т. е. расплав связки полностью заполняет поровое пространство, силы сцепления между зернами резко упадут из-за отсутствия капиллярных сил взаимодействия. Такой случай показан на рис. 2.8 пунктирной кривой.

В связи с этим при излишнем содержании связки силы сцепления будут недостаточными для удержания структурного каркаса формовки и зерна под действием сил тяжести и сил поверхностного натяжения расплава связки начнут перемещаться относительно друг друга. Это приведет к усадке формовки и вытеканию излишнего расплава связки, что подтверждается практикой изготовления инструментов повышенной твердости [55, 89].

В качестве примера в табл. 2.4 показаны сочетания структур и твердостей АИ, при которых будет наблюдаться превышение объема связки над объемом пор. Такие сочетания показаны в заштрихованной области таблицы.

Таблица 2.4

Соотношение объемом связки и пор в зависимости от номера структуры и твердости инструментов

Твердость		R(Т1)	S(Т2)	Т(ВТ1)	U(ВТ2)	Х(ЧТ1)	Y(ЧТ2)
№ структуры	Объем зерна, %	Объем пор $V_{\text{п}}$, %					
		31,5	30,0	28,5	27,0	25,5	24,0
		Объем связки $V_{\text{св}}$, % / ($V_{\text{св}}/V_{\text{п}}$)					
5	52	16,5 / 0,50	18,0 / 0,60	19,5 / 0,68	21,0 / 0,78	22,5 / 0,88	24,0 / 1,0
6	50	18,5 / 0,57	20,0 / 0,66	21,5 / 0,75	23,0 / 0,85	24,5 / 0,96	26,0 / 1,08
7	48	20,5 / 0,64	22,0 / 0,73	23,5 / 0,82	25,0 / 0,92	26,5 / 1,04	28,0 / 1,16
8	46	22,5 / 0,71	24,0 / 0,80	25,5 / 0,89	27,0 / 1,0	28,5 / 1,12	30,0 / 1,25
9	44	24,5 / 0,78	26,0 / 0,86	27,5 / 0,96	29,0 / 1,07	30,5 / 1,19	32,0 / 1,33

10	42	26,5 / 0,84	28,0 / 0,93	29,5 / 1,04	31,0 / 1,14	32,5 / 1,27	34,0 / 1,42
11	40	28,5 / 0,90	30,0 / 1,0	31,5 / 1,10	33,0 / 1,22	34,5 / 1,35	36,0 / 1,50
12	38	30,5 / 0,97	32,0 / 1,06	33,5 / 1,17	35,0 / 1,29	36,5 / 1,43	38,0 / 1,58

Примечание: в числителе – объем связки $V_{св}$, %; в знаменателе – отношение объема связки к объему пор $V_{п}$, %

Как видно из табл. 2.4, проблематичным будет изготовление АИ, начиная с 6 структуры и твердостью Y(ЧТ2) и до 12 структуры с твердостью от S(Т2) до Y(ЧТ2).

Следует также отметить, что при малом содержании связки силы сцепления могут быть недостаточными для обеспечения жесткости каркаса из зерен, что приведет к деформации и даже к разрушению формовки во время ее обжига. Так, в работе [26] отмечается, что при сочетании высокой твердости от Т до Z (ВТ – ЧТ) при закрытых структурах инструменты практически не изготавливаются, так как не имеют удовлетворительных эксплуатационных свойств из-за низкой прочности, размерной стойкости и кромкостойкости. В этой же работе приводятся и другие сочетания – низкая твердость F до K (ВМ – СМ1) при закрытых и открытых структурах. При таких сочетаниях характеристик инструменты не всегда имеют гарантированное обеспечение низкой их твердости и достаточно высокой стойкости. Все это объясняется низким содержанием связки при высокой пористости формовок инструментов, в результате чего силы сцепления в данных случаях составляют (0,01 ÷ 0,35) $F_{с\ max}$, что в конечном счете негативно скажется на структурно-механические свойства инструментов при изготовлении. Об этом свидетельствует зависимость прочности на разрыв инструментов от отношения объема связки к объему пор (рис. 2.8, кривая *2*), полученная с использованием экспериментальных данных, представленных в работе [26]. Как видно, характер этой зависимости подобен зависимости сил сцепления между зернами в формовках во время их обжига, что полностью подтверждает выводы относительно причины низкого качества АИ при некоторых сочетаниях их твердости и структуры.

Для устранения выше перечисленных нежелательных явлений при обжиге формовок в настоящее время используются два основных способа обеспечения необходимого качества изготовления АИ при сохранении их заданных характеристик: структуры и твердости. К первому способу относятся все разработки по модифицированию, применяемых в абразивной отрасли керамических связок или созданию новых шихтовых составов связок. Все это направлено, в первую очередь, на повышение реакционной активности связок к абразивному материалу или к увеличению их огнеупорности. Применение керамических связок с реакционно-активными добавками, например с окисью бора (B_2O_3), позволяет сокращать количество связки на 25 – 30 % [67, 88] при ее излишнем содержании в формовках. С другой стороны, при малом содержании связки в формовках использование реакционно-активной связки дает относительный прирост связки в пределах 7,8 – 13,9 % [68]. Во многих случаях этого достаточно для обеспечения необходимых сил сцепления между зернами в формовках при их обжиге и устранению усадочных явлений и деформаций черепка АИ.

Ко второму способу можно отнести разработки по использованию при изготовлении АИ различного вида наполнителей (рис. 1.7). Наиболее эффективными и экологически безопасными являются термостойкие абразивные наполнители определенной дисперсности в зависимости от соотношения зерна, связки и пор в формовках. В тех случаях, когда количество связки недостаточно или наоборот требуется уменьшить ее содержание для обеспечения заданной твердости и структуры АИ при их изготовлении применяют мелкодисперсные абразивные наполнители. В результате этого дополнительно армируется структура черепка инструмента и повышается его прочность [26, 270, 287]. Перспективным является использование термостойких порообразующих наполнителей при производстве высокопористых АИ или с открытой структурой (10 – 12 и более) и низкой твердостью F – J (ВМ – М) [172, 222].

Однако, до сих пор, вышеперечисленные наполнители находят ограниченное применение на практике из-за недостаточно разработанных научных

основ их использования и отсутствия аналитического системного подхода к определению размерных характеристик и объемного содержания наполнителей в абразивных или формовочных смесях.

Таким образом, полученные результаты исследований показывают, что имеются большие потенциальные возможности создания высокоэффективных АИ путем совершенствования структур. Оптимизация зерновых составов абразивных материалов и регламентированное содержание компонентов в формовочных смесях является важным фактором повышения качества и эффективности АИ.

2.5. Исследование внутренних напряжений в черепке инструментов в процессе термообработки

Процессы, происходящие в инструменте в результате обжига и охлаждения заготовок, вызывают внутренние напряжения и упругие деформации, обусловленные расширением и сжатием черепка инструмента. При нагревании или охлаждении, вследствие разности температур между внешними и внутренними частями черепка в последнем возникают напряжения, которые могут привести к образованию трещин в теле черепка и его разрушению.

Проблема прочности АИ посвящено достаточно много исследований [26, 125, 128, 203, 210, 213, 244, 245, 252 и др.], однако, известны лишь частные решения этой проблемы, приведенные в работах [82, 92, 104, 154, 169, 172, 188 и др.]. Это объясняется тем, что теоретические положения прочности и напряженного состояния композитных материалов, до сих пор недостаточно разработаны [206, 245, 252], а экспериментальными методами не всегда удается получить достоверные данные по распределению напряжений в композитах, т.е. изучить причины и механизмы деформаций и разрушения [26, 125, 252].

Следует отметить, что прочность АИ в сильной мере зависит от неоднородности внутреннего поля напряжений, вызванного строением черепка

инструмента, включающего в себя поры и материалы, различные по своим физико-механическим характеристикам. Абразивные зерна и керамическая связка имеют, например разные модули упругости и коэффициенты теплового расширения, что в процессе изготовления инструмента при его нагреве и охлаждении способствует появлению неоднородности напряженного состояния матрицы. Другим немаловажным фактором, обусловливающим неоднородность внутреннего поля напряжений, являются поры инструмента. Сочетание столь разных факторов приводит к возникновению внутренних полей напряжений, распределение которых не подчиняется законам механики сплошных сред.

В связи с этим для решения поставленной задачи в области прочностных характеристик АИ воспользуемся теорией упругости и методами механики неоднородных тел [2, 9, 11, 90, 108, 114, 115, 310].

В данном исследовании рассматриваются вопросы, связанные с непрерывной неоднородностью материала матрицы АИ, учитывающей наличие зерен (включений) и пор различных размеров, трещиноватость и другие дефекты. Для такой неоднородной среды справедливы все основные уравнения механики деформируемого твердого тела. Отличие заключается в том, что в неоднородных телах в соотношениях, связывающих компоненты тензоров напряжений и деформаций, механические характеристики являются функциями координат [7, 11, 191].

Для анализа влияния, например переменного модуля упругости на напряженное состояние неоднородного тела, воспользуемся дифференциальными уравнениями равновесия в цилиндрических координатах (r, θ, z):

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \sigma_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta}+\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}+\frac{\sigma_z-\sigma_\theta}{r}+R_к=0;\\
&\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta}+\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z}+\frac{2\tau_{z\theta}}{r}+\theta_к=0;\\
&\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta}+\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}+\frac{\tau_{rz}}{r}+Z_к=0,
\end{aligned} \qquad (2.50)$$

где $R_к$, $\theta_к$, $Z_к$ – компоненты объемной силы; σ_r – радиальное напряжение; σ_θ – тангенциальное напряжение; τ – касательное напряжение.

При наличии осевой симметрии в плоской задаче теории упругости приведенные выше уравнения существенно упрощаются. Если в качестве разрешающей функции выбрать напряжение σ_r, то разрешающее уравнение принимает следующий вид [11]:

$$\sigma_r'' + \varphi(r)\sigma_r' + \psi(r)\sigma_z = f(r), \tag{2.51}$$

где

$$\varphi(r) = \frac{3}{r} - \frac{E'}{E} - \frac{2\nu\nu'}{1-\nu^2};$$

$$\psi(r) = -\frac{1}{r}\left[\frac{1-2\nu}{1-\nu}\cdot\frac{E'}{E} + \frac{(1+4\nu)\nu'}{1-\nu^2}\right]; \tag{2.52}$$

$$f(r) = R_к\left[\frac{E'}{E} + \frac{2\nu\nu'}{1-\nu^2} - \frac{2-\nu}{r(1-\nu)}\right] - \frac{E}{r(1-\nu^2)}\left[\varepsilon_b'\,(1+\nu) + \nu'\varepsilon_b\right] - R_к';$$

E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; $\varepsilon_в$ – вынужденные деформации (усадки, температурные и др.): r – радиус (координата).

Здесь и далее штрих над обозначениями показывает дифференцирование по радиусу r.

В данном случае определение напряжений сводится к решению уравнения (2.51) с соответствующими граничными условиями. По найденной функции $\sigma_r(r)$ определяются напряжения σ_θ и σ_r по следующим выражениям [11, 12]:

$$\sigma_\theta = r\sigma_r' + \sigma_r + rR, \tag{2.53}$$

$$\sigma_r = -E\varepsilon_b + \nu(2\sigma_r + r\sigma_r' + rR).$$

Если тело нагружено давлением P при $r \to \infty$, то граничные условия принимают вид:

$$r = a, \quad \sigma_r = 0; \tag{2.54}$$

$$r \to \infty, \quad \sigma_r = -P.$$

При этом в качестве $E(r)$ берется затухающая на бесконечности функция вида [12]:

$$E(r) = E_0\left(1 + (k_E + 1)\cdot\left(\frac{d_П}{2r}\right)^{m_\sigma}\right), \qquad (2.55)$$

где E_1 – модуль упругости ненарушенного массива матрицы; $d_П$ – диаметр отверстия (поры); $k_E = E_1/E_0$; E_0 – модуль упругости матрицы с отверстием (открытой порой) или с наполнителем (закрытой порой); $m_\sigma = \frac{\sigma_н}{\sigma_м}$; $\sigma_н$ – предел прочности наполнителя; $\sigma_м$ – предел прочности матрицы.

В связи с аддитивностью свойств компонентов композиционных материалов модуль упругости E_0 в общем виде можно определить следующим образом:

$$E_0 = V_н \cdot E_н + V_м \cdot E_м, \qquad (2.56)$$

где $V_н$ и $V_м$ – объемные доли наполнителя и матрицы; $E_н$ и $E_м$ – модули упругости частиц (зерен) наполнителя и матрицы инструмента.

Используя известные справочные данные [3, 68, 320] по упругим и прочностным свойствам абразивных материалов и керамических черепков АИ, были определены значения k_E и m_σ, которые изменяются в зависимости от характеристик инструментов в пределах 0,3 ÷ 1,9 и 2,1 ÷ 2,8 соответственно.

На рис. 2.9 показаны эпюры тангенциальных напряжений σ_θ для m_σ = 2,5, k_E = 1,9 и k_E = 0,35, полученных методом численного расчета напряженно-деформированного состояния неоднородного тела с отверстием «открытого» или «закрытого» типа [11].

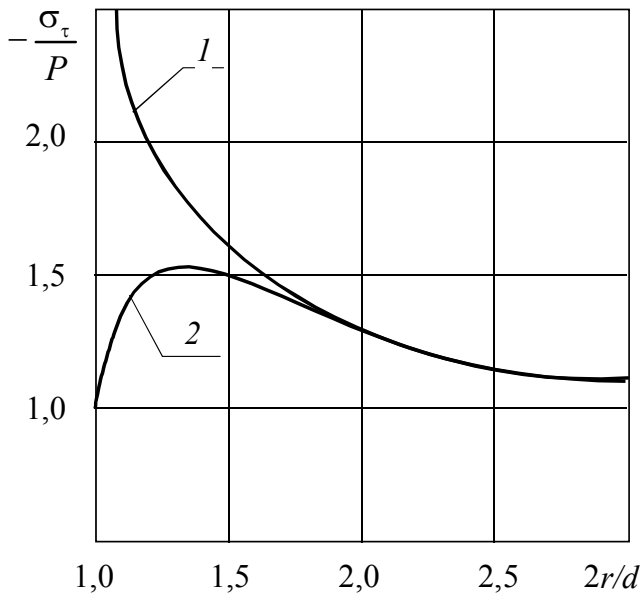


Рис. 2.9. Эпюры напряжений σ_θ в матрице вблизи отверстия (поры):
1 – $m_\sigma = 2{,}5$; $k_E = 1{,}9$; *2* – $m = 2{,}5$; $k_E = 0{,}35$

Рассмотрение только тангенциальных напряжений обусловлено тем, что они являются наиболее опасными для прочности черепка АИ.

На основании представленных результатов расчета можно сделать следующие выводы. Увеличение модуля упругости в зоне, близкой к отверстию ($k_E > 1$), ведет к росту напряжений. Уменьшение модуля упругости ($k_E < 1$) приводит к снижению напряжений по сравнению с однородным материалом.

Следует заметить, что эпюра тангенциальных напряжений σ_θ изменяется не только количественно, но и качественно. Так, при $k_E = 0{,}35$ на эпюре σ_θ появляется экстремум. Последний факт особенно важен при оценке прочности черепка инструмента. При расчете на прочность по максимальным напряжениям обычно рассматривают точки на контуре отверстия. В случае неоднородного материала такая оценка будет неверна из-за смещения максимума σ_θ от контура отверстия, что приведет к особенностям при решении вопросов прочности.

Полученные на рис. 2.9 кривые эпюр напряжений хорошо описываются следующим уравнением:

$$\sigma_\theta = -P\left[1+\frac{m_\sigma+2}{m_\sigma+2k_E}\left(\frac{d_П}{2r}\right)^2+\frac{2(k_E-1)(m_\sigma+1)}{m_\sigma+2k_E}\left(\frac{d_П}{2r}\right)^{m_\sigma+2}\right]. \qquad (2.57)$$

Это уравнение использовалось для расчета напряжений, возникающих в матрице с «открытыми» и «закрытыми» порами. При этом матрица представлена в виде пластины с отверстиями (порами) постоянной толщины равномерно растянутой силой P (рис. 2.10).

Анализ эпюр напряжений показывает, что они имеют различный вид и численные значения. Наименее напряженной является матрица инструмента с «закрытой» порой при $k_E < 1{,}0$. Кроме того, максимальное значение напряжений при этом смещается от контура поры внутрь матрицы по сравнению с положением, показанным на рис. 2.10, *а*, где максимум напряжений концентрируется вблизи контура поры.

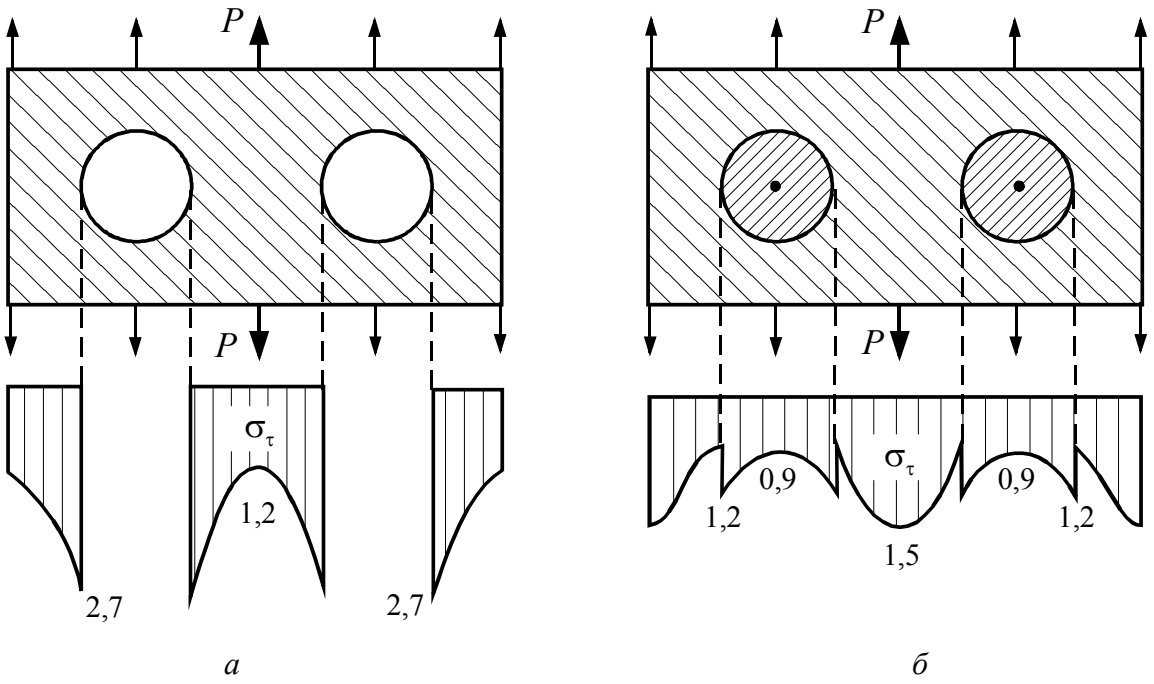


Рис. 2.10. Эпюры распределения тангенциальных напряжений в матрице инструмента с «открытыми» (*а*) и «закрытыми» порами (*б*): $m_\sigma = 2{,}5$; *а* – $k_E = 1{,}9$; *б* – $k_E = 0{,}35$

Таким образом, увеличивая модуль упругости ненарушенной части матрицы E_1 и, уменьшая модуль упругости матрицы вблизи контура поры E_0,

можно существенно снизить напряженное состояние черепка АИ и повысить его прочностные характеристики. Особенно это необходимо учитывать при изготовлении высокопористого АИ с помощью выгорающих порообразующих наполнителей, которые формируют дополнительные поры и околопоровое пространство, увеличивая модуль упругости E_0 матрицы вблизи контура поры. В этих случаях следует рекомендовать для использования выгорающие наполнители, которые имеют наименьшую удельную теплоту сгорания и жаропроизводительность.

Не менее значимой задачей является исследование напряженного состояния матрицы инструмента в зоне абразивных зерен или частиц порообразующего наполнителя, не выгорающих при обжиге, а удаляемых с рабочей поверхности непосредственно в процессе шлифования.

На рис. 2.10, *б* представлены эпюры распределения напряжений в матрице инструмента в зоне зерен или термостойких частиц наполнителя с высокой прочностью при $E_н > E_0$, $\sigma_н > \sigma_м$.

Как видно из рис. 2.10, *б*, по сравнению с рис. 2.10, *а*, эпюры напряжений в первом случае имеют более выраженную кривизну и большую величину напряжений. Следует отметить и обратную выпуклость эпюр. Однако во всех случаях на границе зерна (частицы) с матрицей наблюдается перепад напряжений, причем во втором случае (рис. 2.10, *б*) величина перепада меньше, чем в первом случае (рис. 2.10, *а*). Кроме того, в области матрицы, где имеются зерна или частицы наполнителя напряжения меньше, чем в области, где отсутствуют какие-либо включения.

Анализ влияния размера зерен $d_з$ и расстояния $r_з$ между ними в матрице инструмента на возникающие тангенциальные σ_τ напряжения показывает, что с увеличением отношения $2r/d_П$ напряжения уменьшаются (рис. 2.9). Это свидетельствует о том, что при уменьшении зернистости инструмента или увеличении расстояния между зернами в матрице будут улучшаться прочностные свойства черепка инструмента. В случаях присутствия крупных зерен, а также значительного объемного содержания зерен в матрице инструмента

возрастает неоднородность поля напряжений как за счет усадочного характера, так и за счет внешних усилий. В процессе формования, обжига и охлаждения черепка инструмента первичные трещины образуются, прежде всего, на границе раздела зерна и связки, причем преимущественно на контакте связки с зернами большой крупности. Уменьшение содержания в абразивной смеси зерен крупной фракции будет способствовать упрочнению инструмента. Кроме того, замечено [33], что наибольшее количество пор концентрируется также у поверхности крупных зерен, затрудняя образования сплошного контакта поверхности зерна со связкой.

Таким образом, результаты теоретического анализа распределения и характера напряжений в черепке инструмента позволяют наметить пути обеспечения направленной регуляции структурно-механических характеристик АИ при их совершенствовании.

2.6. Выводы

1. Разработаны феноменологические модели процессов структурообразования при формировании внутреннего строения черепка инструментов, учитывающие все особенности и переделы их изготовления, включая контактные взаимодействия, операции смешивания абразивных зерен со связкой и наполнителями, формования заготовок инструмента, их сушки и обжига. Вскрыты потенциальные возможности совершенствования АИ путем регулирования структурно-механических характеристик за счет рационального подбора зерновых составов абразивных материалов и регламентированного содержания наполнителей в формовочных смесях.

2. С помощью разработанной в данной работе теории контактных взаимодействий в системе «формовочная смесь» установлены условия равномерного распределения частиц связки и наполнителя между абразивными зернами и агрегирования этих компонент в смеси при формировании струк-

турных агрегатов, в которых абразивные зерна являются структурообразующими.

3. Установлена аналитическая зависимость давления прессования формовки инструмента от ряда факторов таких как геометрические размеры инструмента, влажности формовки, вида абразивного материала и нормируемых ГОСТом характеристик – зернистости, структуры и твердости инструмента.

4. Разработаны теоретические основы капиллярной связности абразивных зерен с расплавом связки, вскрывающие механизмы процессов, происходящих в формовках при их обжиге с учетом типов контактов между зернами. Это позволяет целенаправленно вести подбор оптимального содержания зерен различных зернистостей и связки в смеси для обеспечения необходимых сил сцепления внутри формовочных инструментов.

5. Установлено, что распределение и характер напряжений в математических моделях черепка инструмента зависят от соотношений упругих и прочностных свойств зерен и матрицы (связки), а также от размера зерен и плотности их упаковки в черепке инструмента. Увеличение модуля упругости связки в зоне, близкой к поре, ведет к росту напряжений. Уменьшение размера зерна и содержания в абразивной смеси зерен мелкой фракции приводит к упрочнению черепка инструмента. Показано, что величина перепада напряжений в матрице с «открытыми» порами в 1,6 ÷ 1,7 раза больше, чем у матрицы с «закрытыми» порами, при этом максимальные значения напряжений смещаются от контура «закрытой» поры внутрь матрицы.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ УПАКОВКИ ЗЕРЕН, ПОРИСТОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ

3.1. Исследование плотности упаковок зерен разных размеров и их распределения в формовках

Проблема исследования внутреннего строения и определения физико-механических свойств АИ с учетом их структурных особенностей представляет собой большой теоретический и практический интерес.

Стохастический характер распределения структурных элементов (зерна, пор, связки) в объеме инструмента обосновывает подход к рассматриваемым исследованиям с позиции теории вероятности и математической статистики [12, 22, 37, 71, 103, 115, 119, 142, 149 и др.].

Применение такого подхода позволяет выявить комплекс взаимозависимостей между структурными параметрами и решить ряд практических задач, касающихся регуляции структурно-механических свойств АИ. При исследовании рассматривались следующие задачи: изучение процесса формирования структуры инструмента с условием получения наибольшей плотности упаковки зерен и частиц наполнителей; исследование возможностей регуляции процессами формирования структуры с целью получения АИ с требуемыми оптимальными функциональными свойствами и стабильными эксплуатационными показателями.

При вероятностно-геометрическом рассмотрении внутреннего строения инструмента образование его структуры заменяется моделированием процесса случайного заполнения объема геометрическими элементами с распределенными формами, размерами и ориентации, причём каждый элемент или каждая группа их может описываться рядом физико-механических параметров материала, ограниченного поверхностями данных геометрических фигур [62, 95, 121, 200, 277].

В настоящее время известны различные модели внутреннего строения АИ [26, 31, 200, 277], начиная с простейших элементных моделей и кончая физическими пространственными моделями. Основным недостатком большинства таких моделей заключается в том, что не учитываются следующие факторы: непрерывность гранулометрического состава: особенности зернового состава абразивных зерен и частиц наполнителей и их статистические характеристики.

Заслуживает внимание физические пространственные модели, описывающие межзерновое пространство структуры АИ [121, 200, 277]. На основании вероятностно-статистического анализа модель, разработанная в работе [200], выдаёт распределение диаметров сфер, вписанных в межзерновое пространство инструмента с учетом тетраэдрической укладки абразивных зёрен. В качестве исходных данных используются параметры распределения и изометричности исходного абразивного зерна, номер структуры абразивного круга, пористость и количество связки. С помощью такой модели можно исследовать внутреннее строение черепка инструмента, в котором абразивные зерна сориентированы и расположены случайным образом, что отвечает в большей мере реальной структуре инструмента.

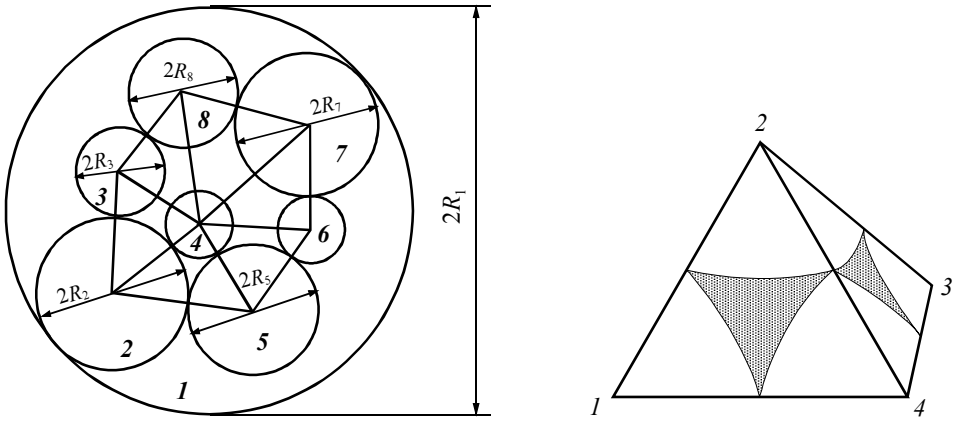
С учетом особенностей зернового состава абразивных зерен рассмотрим схему образования различных элементов упаковок из системы, например зерен в виде семи сфер, ближайших к первой [62] (рис. 3.1). Из этих сфер четыре сферы имеют разные размеры, что соответствует зерновому составу шлифматериалов. Например, для шлифматериала 24А25 размеры зерен (сфер), в представленной модели (рис. 3.1), распределятся следующим образом:

$2R_1 = 0{,}315$ мм ; $2R_2 = 0{,}250$ мм ; $2R_3 = 2R_4 = 2R_6 = 0{,}200$ мм;

$2R_7 = 2R_8 = 0{,}160$ мм.

Сферы *2*, *3* и *4* соприкасаются между собой и со сферой *1* и образуют четверку, взаимно соприкасающихся с остальным. Если соединить центры этих сфер между собой, образуется тетраэдр, который принимается за эле-

мент упаковки. Аналогичную группу образуют сферы *1*, *3*, *4*, *8*. Однако не все четверки ближайших сфер составляют подобные комбинации: например, группы сфер *1*, *2*, *4*, *5* или *1*, *4*, 5, 6 и другие образуют четверки, в которых не все сферы соприкасаются между собой.



а *б*

Рис. 3.1. Тетраэдная модель плотных упаковок зерен в виде сфер [62]:
а – схема образования тетраэдров; *б* – фрагмент тетраэдной упаковки

В реальных абразивных смесях могут наблюдаться наличие зазоров между соседними зернами *4* и *5* или *4* и *8*, поэтому из этих групп невозможно получить тетраэдры, описанные выше. При любом уплотнении реальная упаковка может приближаться к предельно плотной, но никогда ее не достигнет. Под предельно плотными упаковками понимают упаковки, без зазоров и промежутков между соседними зернами или частицами. На рис. 3.1, *б* приведен пример тетраэдра, образованного центрами сфер *1*, *2*, *3*, *4* вместе с частями шаров, заключенных в данном тетраэдре. Разумеется, для упаковки равных по размеру сфер будут образовывать только правильные тетраэдры. Исходя из этих предпосылок тетраэдной модели исходная плотная упаковка сфер заменяется системой тетраэдров, заполняющих пространство без зазоров и промежутков. Вид каждого тетраэдра определяется только случайной комбинацией четырех сфер, поэтому следует оценить относительную частость, исходя из частостей размеров сфер, образующих данный тетраэдр. Под относительной частостью понимается отношение вероятностей встретить сферу с тем или иным радиусом, выраженное целым числом вероятностей, деленным на нор-

мирующий множитель. Число различных тетраэдров n_k, которые могут быть сконструированы для исходной предельно плотной упаковки сфер с k_R различными радиусами, равно числу сочетаний из $(k + 3)$ по 4, то есть

$$n_k = C_{k+3}^4 = \frac{k_R(k_R+1)\cdot(k_R+2)\cdot(r+3)}{24}. \qquad (3.1)$$

Так, для упаковок сфер с двумя размерами число различных тетраэдров составляет 5(R_1 R_1 R_1 R_1; R_1 R_1 R_1 R_2; R_1 R_1 R_2 R_2; R_1 R_2 R_2 R_2; R_2 R_2 R_2 R_2), с тремя размерами получится 15 различных типов тетрадэдров и т.д. Геометрические характеристики для каждого тетраэдра, просуммированные с весом, пропорциональным относительной частости данного тетраэдра в системе, и будут оценкой характеристик для системы тетраэдров, а, следовательно, и для исходной упаковки.

Относительная частость F_i сфер радиусом R_i в тетраэдрах пропорциональна частости i-х сфер в исходной упаковке f_i и пропорциональна среднему числу тетраэдров N_f, то есть

$$F_1 : F_2 : ...F_k = f_1 N : f_2 N_2 : ... : f_k N_k. \qquad (3.2)$$

Для нахождения значений относительных частостей тетраэдров, образованных сферами R_i, Rj, R_e, R_q, равными F_{ijeq}, использовалось мультиномиальное распределение, суть которого заключается в следующем. Если m_1, m_2, m_3, ... , m_k – независимые случайные величины из $m_1 + m_2 + m_3 + ... + m_k$, то вероятность появления этих чисел определяется выражением [62]

$$P_n(m_1 m_2 m_3 ... m_k) = \frac{n!}{m_1! m_2! ... ! m_k!} p_1^{m_1} p_2^{m_2} ... p_k^{m_k}. \qquad (3.3)$$

Эта вероятность определяется коэффициентом при $x_1^{m_1} x_2^{m_2} ... x_k^{m_k}$ в разложении мультинома $(p_1x_1 + p_2x_2 + \ldots + p_kx_k)^n$ по степени n. В рассматриваемой задаче взаимоисключающими событиями являются относительные частости соответствующих сфер в данном тетраэдре

$$x_i; x_j; x_e; x_q \text{ из } x_i + x_j + x_e + x_q = n = 4,$$

где $n = 4$ – число вершин в тетраэдре.

Отсюда относительная частость F_{ijlq} образования тетраэдра сферами

радиусами R_i, R_j, R_l, R_q определяется выражением

$$F_{ijlq} = \frac{4!}{n_i! n_j! n_l! n_q!} F_i^{n_i} F_j^{n_j} F_l^{n_l} F_q^{n_q}. \quad (3.4)$$

Так, частость тетраэдров, образованных сферами радиусами R_1, R_2 и двумя сферами радиусом R_3, характеризуется выражением

$$F_{1,2,3,4} = \frac{4!}{1!1!2!0!} F_1^1 F_2^1 F_3^2 F_4^0 = 2F_1 F_2 F_3^2. \quad (3.5)$$

Плотность заполнения упаковки ρ_y определяется в виде отношения объема, занимаемого всеми сферами (зернами) $V_{\text{ср}}$, к объему, занимаемому всеми тетраэдрами $V_{\text{т}}$, т.е.

$$\rho_y = \frac{V_{\text{сф}}}{V_{\text{т}}}. \quad (3.6)$$

Объем $V_{\text{сф}}$ можно определить по формуле:

$$V_{\text{сф}} = \frac{4\pi}{3} \cdot K_{\text{пв}} \sum_{i=1}^{N} R_i^3, \quad (3.7)$$

где $K_{\text{пв}}$ – коэффициент, учитывающий вклад пористости структуры в общий объем материала ($K_{\text{пв}}$ = 1,54 [129]).

Объем тетраэдров $V_{\text{т}}$ определяется следующим выражением [62]:

$$V_{\text{т}}(1,2,3,4) = \frac{1}{288} \begin{vmatrix} 0 & (R_2+R_3)^2 & (R_2+R_4)^2 & (R_1+R_2)^2 & 1 \\ (R_2+R_3)^2 & 0 & (R_3+R_4)^2 & (R_1+R_3)^2 & 1 \\ (R_2+R_4)^2 & (R_3+R_4)^2 & 0 & (R_1+R_4)^2 & 1 \\ (R_1+R_2)^2 & (R_1+R_3)^2 & (R_1+R_4)^2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (3.8)$$

Раскрыв определитель и проведя соответствующие сокращения, получим:

$$V_{\text{т}(1,2,3,4)} = [0{,}2R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 (R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3) - 0{,}1(R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4)^2 (R_1^{-2} + R_2^{-2} + R_3^{-2} + R_4^{-2})]^{0,5}. \quad (3.9)$$

Расчеты показали, что для равных сфер плотность заполнения тетраэдной модели равна 0,781, что незначительно отличается от плотности запол-

нения правильных гексагональных упаковок (0,74). Это свидетельствует о правильности выбора тетраэдной модели при исследовании внутреннего строения абразивного инструмента. Следует отметить, что аналогичная плотность упаковки шаров (сфер) одинакового размера, равная 0,787 была получена в работе [26] при теоретическом исследовании процесса структурообразования и условий обеспечения максимальной плотности упаковки компонентов формовочной смеси абразивного инструмента.

Анализ выражения (3.9) показывает, что при уменьшении размера R даже одной из сфер уменьшается объем $V_т$, влекущий к повышению плотности упаковки.

В табл. 3.1 представлены данные расчетов плотности упаковок в зависимости от количества сфер с разными размерами. Как видно из данных табл. 3.1, что если взять набор сфер (зерен) из двух размеров ($R_1 = R_2 = R_3 > R_4$) при условии размещения меньших сфер в пустотах крупных, в определенном количественном соотношении, то расчетная плотность упаковки таких сфер составит 0,794 частей от всего объема смеси. Набор из трех различных рассчитанных размеров сфер ($R_1 = R_2 > R_3 > R_4$) увеличивает плотность до 0,816, а при четырех размерах ($R_1 > R_2 > R_3 > R_4$) – до 0,850 частей объема смеси.

Таблица 3.1

Влияние количества сфер с разными размерами на плотность упаковок

Количество фракций сфер (зерен)	1 ($R_1=R_2=R_3=R_4$)	2 ($R_1=R_2=R_3>R_4$)	3 ($R_1=R_2>R_3>R_4$)	4 ($R_1>R_2>R_3>R_4$)
Плотность заполнения упаковки ρ_y	0,781 ± 0,016	0,794 ± 0,014	0,816 ± 0,012	0,850 ± 0,008

В работе [196] показано, что при моделировании структуры уплотненного абразива сферическими частицами максимальное значение плотности упаковки может даже составить 0,907. Такая теоретическая плотность упаковки достигается при условии касания каждой сферы частицами с шестью соседними.

Для практических целей представляет интерес действительная плотность упаковки абразивного зерна в черепке инструмента [154]. При определении такой плотности бралась шлифующая часть инструмента, состоящая из абразивного материала и связки, без учета пористости изделия. В этих целях использовались табличные данные по соотношению объемов абразивного материала и связки в зависимости от номера структуры и степени твердости инструмента [193].

Плотность упаковки зерна в черепке инструмента определялось по следующей формуле:

$$\rho_y = \frac{V_з}{V_з + V_{св}}, \tag{3.10}$$

где $V_з$ и $V_{св}$ – объемное содержание зерна и связки соответственно.

Полученные результаты расчетов значений плотности упаковки зерна в инструментах различных характеристик сведены в табл. 3.2. Анализ данных, представленных в этой таблице, показывает, что плотность заполнения ρ_y изменяется в широких пределах от 0,50 до 0,99 в зависимости от номера структуры и степени твердости инструмента.

Представляя объемное содержание зерна $V_з$ и связки $V_с$ через известные формулы [193]:

$$\begin{aligned} V_з &= 62 - 2C; \\ V_{св} &= -13{,}0 + 1{,}5N + 2C, \end{aligned} \tag{3.11}$$

где C – номер структуры (0, 1, 2, …, 12, …); N – номер шифра твердости (твердость F(ВМ1) – N = 1, твердость G(ВМ2) – 2, H(М1) – 3 и т.д.), плотность упаковки ρ можно определять по следующему выражению:

$$\rho_y = \frac{62 - 2C}{49 + 1{,}5N}. \tag{3.12}$$

Таблица 3.2

Плотность упаковки зерна в шлифующей части черепка АИ

Номер структуры	Степень (номер шифра) твердости																	
	F (1)	G (2)	H (3)	I (4)	J (5)	K (6)	L (7)	M (8)	N (9)	O (10)	P (11)	Q (12)	R (13)	S (14)	T (15)	U (16)	V (17)	W (18)
0									0,992	0,968	0,946	0,925	0,905	0,886	0,867	0,848	0,832	0,816
1								0,984	0,960	0,938	0,916	0,896	0,876	0,857	0,839	0,822	**0,805**	**0,789**
2							0,975	0,951	0,928	0,906	0,885	0,865	0,846	0,828	0,811	**0,794**	0,778	0,763
3					0,991	0,966	0,941	0,918	0,896	0,875	0,854	0,836	0,818	**0,800**	**0,773**	0,767	0,752	0,736
4				0,982	0,956	0,931	0,908	0,885	0,864	0,844	0,824	**0,806**	**0,788**	0,771	0,755	0,740	0,724	0,710
5			0,972	0,945	0,920	0,896	0,874	0,852	0,832	0,812	**0,794**	0,776	0,759	0,742	0,727	0,712	0,698	0,684
6	0,990	0,962	0,934	0,909	0,885	0,862	0,840	0,820	**0,800**	**0,781**	0,763	0,746	0,730	0,714	0,699	0,684	0,671	0,658
7	0,950	0,923	0,897	0,872	0,850	0,828	**0,806**	**0,787**	0,768	0,750	0,732	0,716	0,700	0,686	0,671	0,658	0,644	0,632
8	0,910	0,884	0,860	0,836	0,814	**0,793**	0,773	0,754	0,736	0,718	0,702	0,686	0,672	0,657	0,643	0,630	0,617	0,605
9	0,871	0,846	0,822	**0,800**	**0,779**	0,758	0,739	0,721	0,704	0,688	0,672	0,656	0,642	0,628	0,615	0,602	0,590	0,578
10	0,832	**0,808**	**0,785**	0,764	0,743	0,724	0,706	0,688	0,672	0,656	0,641	0,626	0,613	0,600	0,587	0,575	0,564	0,552
11	**0,792**	0,769	0,748	0,727	0,708	0,689	0,672	0,656	0,640	0,625	0,610	0,597	0,584	0,571	0,559	0,0548	0,536	0,526
12	0,752	0,730	0,710	0,690	0,672	0,655	0,638	0,623	0,608	0,594	0,580	0,567	0,554	0,542	0,531	0,520	0,510	0,500

Выражение (3.12) позволяет производить расчет плотности упаковки зерна в шлифующей части черепка через нормируемые ГОСТом характеристики АИ на керамическом связующем.

Для таких изделий как черепок АИ, представляющего собой высоконаполненный композиционный материал, существует оптимальное соотношение наполнителя (зерна) и связующего, при котором наблюдается максимально возможная прочность изделий [206]. Анализ экспериментальных данных по прочности абразивных инструментов [26] также свидетельствует о наличии оптимальных характеристик инструмента в определенных пределах по структуре и твердости. Кроме того, в работе [88] показано, что при оптимальном содержании зерна и связки наблюдается не только максимальная механическая прочность черепка инструмента, но и его высокая производительность, наименьший износ и наибольшая удельная производительность. Можно считать, что прочность инструмента является интегральным показателем его технологических и эксплуатационных свойств. В связи с этим под оптимальной плотностью упаковки $\rho_{y\ опт}$ следует понимать такое значение, при котором будет обеспечиваться максимально возможная прочность инструмента.

На рис. 3.2 представлены зависимости прочности на разрыв образцов инструментов от плотности заполнения зерном черепка при различных степенях твердости. Зависимости получены для смесей из электрокорунда 24А25 и связки К5. Образцы готовились по существующей технологии изготовления абразивных инструментов.

Анализ полученных зависимостей показывает, что прочность всех образцов достигает максимума практически при одинаковой плотности заполнения, равной 0,790 – 0,812. За оптимальное значение плотности заполнения зерном черепка инструмента можно принять среднее его значение, равное 0,80. В представленной выше табл. 3.2 показана заштрихованная зона, в которую входят значения $\rho_{y\ опт}$ в пределах 0,779 ÷ 0,808 при среднем значении, равном 0,794, что соответствует оптимальной плотности упаковки, опреде-

ленной экспериментальным путем по максимально возможной прочности образцов инструмента.

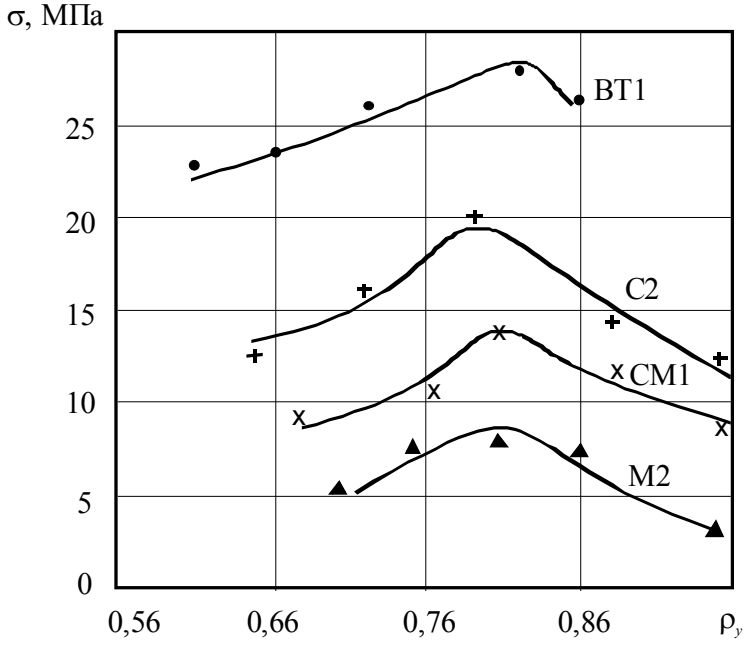


Рис. 3.2. Зависимость прочности от плотности упаковки зерен ρ_y при различных степенях твердости инструмента

В тех случаях, когда значения плотности упаковок зерна ниже или выше, чем значение оптимальной плотности (табл. 3.2), для обеспечения заданных структурно-механических характеристик инструментов рекомендуется в формовочную смесь дополнительно вводить мелкодисперсный абразивный наполнитель или изменять зерновой состав путем рационального сочетания абразивных материалов с различной зернистостью. Полученные результаты исследований по вопросам распределения и упаковки абразивных зерен в объеме черепка инструмента имеют практическую значимость в области проектирования зерновых смесей, регулирования прочностных свойств инструмента, выбора и расчета его рациональных характеристик по степеням твердости и номерам структуры.

Для проведения моделирования распределения зерен разных размеров, представленных в виде сфер, были использованы известные алгоритмы слу-

чайного заполнения смесей как равных, так и распределенных по размерам и объемам зерен и разной плотностью упаковок [62, 63, 136].

Взаимное расположение абразивных зерен в черепке инструмента определялась местоположением зерна в виде сферы радиусом R в рассматриваемой модели структуры, которое является случайным с равновероятным распределением в заданном объеме. Такой выбор местоположения называется пуассоновским вследствие идентичного закона распределения числа элементов в объеме при их равномерном распределении. Учитывая изотропность свойств пуассоновских упаковок непересекающихся сфер, можно считать, что все статические характеристики плотности, в том числе и радиальной плотности, в двух произвольных точках O_1 и O_2 на расстоянии l_R друг от друга равны между собой (рис. 2.14, *а*).

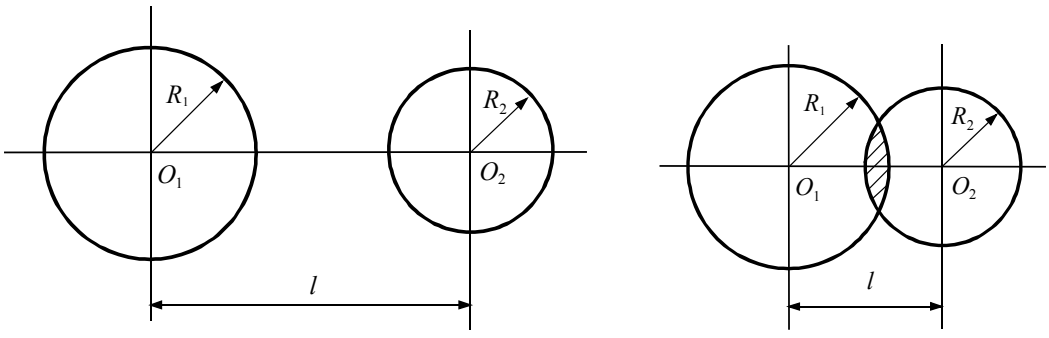


Рис. 3.3. Схемы для вычисления функции радиального распределения пуассоновского заполнения разными по размерам сферами [62]:
а – схема вычисления функции при $l_R > (R_1 + R_2)$; *б* – схема вычисления функции при $R_2 \le l_R \le (R_1 + R_2)$

Опишем вокруг этих точек сферы радиусом R и выделим области радиального расстояния $l_R > (R_1 + R_2)$ и $R_2 \le l_R < (R_1 + R_2)$. Область $l_R < R$ не входит в область определения функции радиальной плотности упаковки зерен $\rho_y(l)$ с учетом всех размеров в упаковке на расстоянии l_R от фиксированной точки в композиции. Для определения $\rho_y(l)$ рассмотрим пуассоновскую упаковку зерен в виде сфер, образованную за конечный интервал времени t.

При $R_2 \le l_R < (R_1 + R_2)$ (рис. 3.3, *б*) значение плотности в точке O_2 находим из условия, что точка O_1 уже занята центром упакованной сферы и радиус точки O_1 равен R. В области сферы O_2 центр сферы может быть в любой точке, исключая область пересечения областей объемом V_1

$$V_1 = \frac{\pi R_1^3}{48\left[16 - \frac{12 l_R}{R_1} - \left(\frac{l_R}{R_2}\right)^3\right]}. \qquad (3.13)$$

При $t \to \infty$ плотность заполнения стремится к максимальному своему значению. Для случая равных сфер применительно к статическим смесям плотность заполнения в заданной точке O_2 определится как

$$\rho(l) = \alpha_S V_S \int_0^T R_1^s \exp\left\{-\alpha \int_0^{t^0} \left[V_S (R_2)^s - V'\right] dt\right\} dt^0, \qquad (3.14)$$

где α – плотность точек в $(s + 1)$ – мерном пространстве; γ – объем S – мерной сферы единичного радиуса; t^0 – интервал времени упаковки сфер.

Заменяя V_1 его значением из формулы (3.13), а α_S и V_S из определения плотности и объема S – мерного пространства и сфер, получим

$$\rho(l) = \frac{(R_1 + R_2) - (l_R - R_2)^3}{12 l_R}\left[1 - (1 - 8\rho_y)^{\frac{12 l / R_1 - (l - R_2)^3}{16}}\right]. \qquad (3.15)$$

Обозначим $q(l) = \dfrac{12 l_R}{16\left[R_1 - (l_R - R_2)^3\right]}$,

тогда форма записи (3.15) упростится:

$$\rho(l) = \frac{1}{8 q(l)}\left[1 - (1 - 8\rho_y)^{q(l)}\right] \qquad (3.16)$$

Для случая $l_R > (R_1 + R_2)$ (рис. 3.3, *а*) пересекающихся областей нет, и отсюда следует, что $q(l) = 1$ и $\rho_y(l) = \rho$.

Тогда в общем виде можно найти, что функция плотности заполнения описывается следующим уравнением:

$$\begin{cases} \rho_y(l) = \dfrac{1}{8 q(l_R)}\left[1 - (1 - 8\rho)^{q(l)}\right] & \text{при } R_1 \le l_R < (R_1 + R_2), \\ \rho_y & \text{при } l_R \ge (R_1 + R_2). \end{cases} \qquad (3.17)$$

Представленная выше функция радиальной плотности (3.17) является одной из важнейших и универсальных характеристик гетерогенных материалов, в том числе и внутреннего строения АИ.

Численные расчеты радиальной функции для различных упаковок сферических зерен представлены на рис. 3.4. Эти функции описываются следующим уравнением [1]

$$\rho_y(l) = e^{-\alpha_k |l_R|} \cdot \cos \beta_k l_R, \qquad (3.18)$$

где α_k и β_k – коэффициенты корреляционной связи.

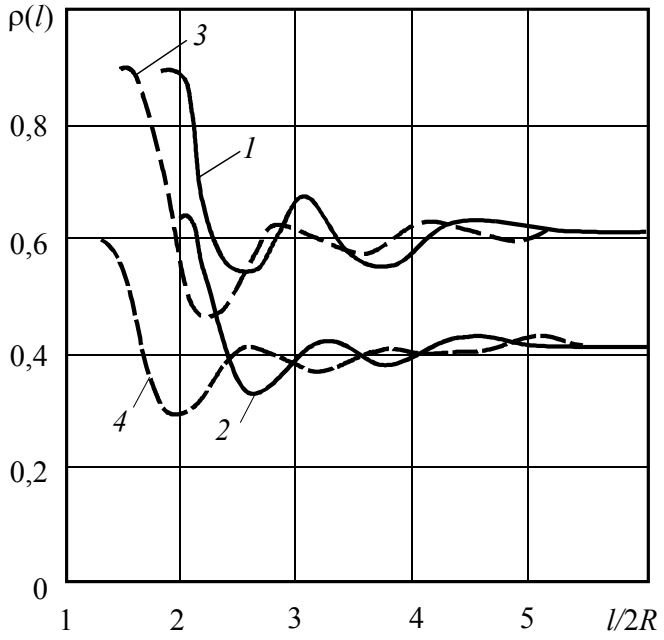


Рис. 3.4. Функции радиальной плотности: *1* – упаковка зерен равных размеров, $\rho_y = 0{,}8$; *2* – упаковка зерен равных размеров, $\rho_y = 0{,}6$; *3* – упаковка зерен, распределенных по размерам, $\frac{R_1}{R_2} = \frac{5}{1}$ и объему $\frac{V_1}{V_2} = \frac{3}{1}$; $\rho_y = 0{,}8$; *4* – упаковка зерен, распределенных по размерам и объему $\frac{R_1}{R_2} = \frac{5}{1}$; $\frac{V_1}{V_2} = \frac{3}{1}$; $\rho_y = 0{,}6$

Как видно, характер изменения функции обусловлен значениями коэффициентов α_k и β_k, то есть от того, что преобладает в корреляционных связях: убывание по закону $e^{-\alpha|l|}$ или колебания по закону $\cos \beta_k l_R$.

В связи с тем, что функция радиальной плотности и взаимное расположение зерен зависят от многих факторов, которые формируют ту или другую структуру инструмента, то учитывались следующие особенности упаковок: по плотности заполнения абразивными зернами черепка инструмента и распределению зерен по размерам и объему.

Качественный анализ представленных функций на рис. 3.4 показывает корреляцию во взаимных положениях зерен в упаковке, или конкретно, в формовочных смесях, т. е. при смешивании и укладке смеси проявляется взаимовлияние близко расположенных зерен, которое постепенно ослабевает с увеличением расстояния l_R. Так, значение функции при значениях аргументов более двух диаметров частиц отличается от плотности заполнения не более чем на 10 – 12 %, а при значениях более трех диаметров – не более чем на 3 – 5%. Это явление наблюдается как для упаковок равных размеров зерен, так и распределенных по размерам.

3.2. Зависимость координационного числа зерен от плотности их упаковки и характеристик инструментов

Следующей задачей исследования являлось изучение координационного числа абразивных зерен в формовочных смесях и черепке инструмента.

Из литературных источников [96, 129] известно, что координационное число $N_к$ в многофракционном материале определяется по формуле

$$N_к = 11{,}6(1 - П), \tag{3.19}$$

где $П$ – пористость упаковки;

а для бифракционного состава смесей –

$$N_к = 11{,}6\left[1 - \frac{П}{(1 - П)(1 + K)}\right], \tag{3.20}$$

где $K = \frac{V_2}{V_1}$; V_2 и V_1 – насыпные объемы мелкой и крупной фракции соответственно.

Н. В. Носов [94], уточняя и дополняя выше приведенные формулы, для определения числа контактов Z между сферическими частицами одинакового размера вывел новую формулу следующего вида

$$Z = \frac{1}{1+П}\left[(3{,}7 + 0{,}3П) + \sqrt{(3{,}7 + 0{,}3П)^2 + (1+П)(9{,}76 - 1{,}76П)}\right]. \qquad (3.21)$$

Для учета реальных размеров и форм абразивных зерен им предложена дополнительная расчетная формула

$$Z_з = Z\psi(1-\delta), \qquad (3.22)$$

где ψ – коэффициент сферичности зерен;

δ – коэффициент изменения размера зерен.

Известны и другие зависимости координационного числа от пористости в зернистых материалах вида [128]

$$N_к = \frac{(П+3) + \sqrt{П^2 - 10П + 9}}{2П}. \qquad (3.23)$$

Однако следует отметить, что пористость изделия не полностью характеризует и определяет его физико-механические свойства и структурные особенности. При одной и той же пористости инструмента может быть разной его твердость и структура. Объемное содержание зерна и связки в большей мере определяют структурно-механические и другие характеристики инструмента. Поэтому определение координационного числа с учетом только пористости может привести в ряде случаев к неверным результатам и выводам.

Взаимное расположение зерен в объеме черепка инструмента, наряду с пористостью, будет зависеть от плотности заполнения зерном черепка, распределения зерен по размеру, объему и др.

Известно, что под координационным числом понимается среднее число ближайших контактирующих и прилегающих зерен, приходящихся на одно фиксированное зерно. Определение числа контактов между зернами необходимо для прогнозирования и расчета механической прочности, теплопроводности и других свойств инструмента.

Кроме качественного анализа изучаемой структуры формовочной массы функции радиальной плотности позволяют определять координационное число, среднее расстояние между частицами, а также целый ряд аналитических выражений для важнейших параметров внутреннего строения инструмента. Например, задавая положение некоторого зерна $l_i = 0$, можно найти число зерен, находящихся от него на расстоянии от l до $l + dl$ по следующей формуле

$$dN_{\text{к}}(l) = \frac{4\pi(N_3 - 1)}{\sum V}\rho(l)l^2 dl, \qquad (3.24)$$

где N_3 – общее число зерен; ΣV_3 – суммарный объем, занимаемый зернами.

По площади, ограниченной первым максимумом радиальной функции, можно экспериментально определять число контактов между соседними зернами в объеме или координационное число $N_{\text{к}}$.

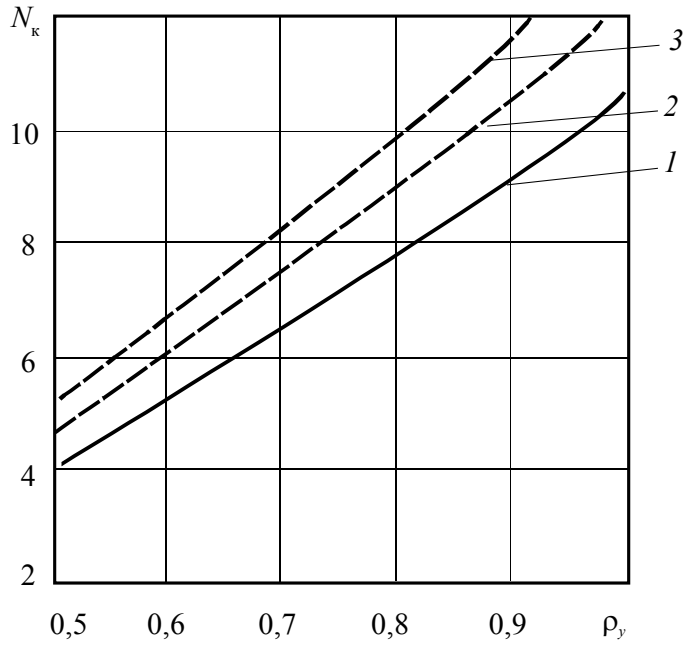


Рис. 3.5. Зависимость числа контактов $N_{\text{к}}$ от плотности упаковки зерен ρ_y:
1 – зерна размером R; *2* – смесь зерен, $R_1 : R_2 = 5 : 1$ ($V_1 : V_2 = 4 : 1$);
3 – смесь зерен, $R_1 : R_2 : R_3 = 8 : 4 : 1$ ($V_1 : V_2 : V_3 = 7 : 2 : 1$)

Найденные из данных, представленных на рис. 3.5, координационные числа $N_{\text{к}}$ и средние расстояния $l_{iз}$ от заданного зерна до зерна на координационной сфере с номером i сгруппированы в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры функций радиальной плотности

№№ п/п функции	Координационное число $N_к$	Среднее расстояние $l_з \cdot 10^{-3}$, м	№№ п/п функции	Координационное число $N_к$	Среднее расстояние $L_з \cdot 10^{-3}$, м
1	7,6	0,742	3	10,3	0,619
2	5,2	0,844	4	9,1	0,667

Зависимость средних расстояний между зернами в формовочных массах от координационного числа описывается следующим уравнением

$$l_{i3} = (1 - 0{,}057 N_к)^{0,5}. \qquad (3.25)$$

Зависимость координационного числа $N_к$ от плотности упаковки показана на рис. 3.5. Анализ полученных результатов, представленных на рис. 3.5, показывает следующее. Число контактов в моделях упаковок зерен, равных по размеру, резко сокращается с уменьшением плотности заполнения. Так, для плотности заполнения $\rho_y = 0{,}8$ среднее координационное число $N_{к\,ср} = 7{,}6$, а для плотности $\rho_y = 0{,}6$ $N_{к\,ср}$ сократилось до 5,2. При дальнейшем уменьшении плотности контакты практически отсутствуют. Для упаковок с плотностью $\rho_y = 0{,}8$ и выше имеются зерна с координационным числом $N_{к\,ср} = 11{,}2$. Однако в этих моделях совсем отсутствуют зерна с числом контактов менее 6, что свидетельствует об устойчивости и стабильности упаковок с плотными структурами.

В смесях с двумя фракциями зерен при одной и той же плотности их упаковки среднее число контактов между зернами возрастает по сравнению с упаковками, имеющими зерна только равных размеров (одной фракции). Если для зерен равных размеров при плотности заполнения $\rho_y = 0{,}8$ $N_{к\,ср} = 7{,}6$, то для смеси зерен из двух фракции с соотношением их размеров $R_1 : R_2 = 5 : 1$ и объемов фракций $V_1 : V_2 = 4 : 1$ при той же плотности среднее координационное число $N_{к\,ср} = 9{,}1$, т.е. увеличилось в 1,19 раз. Для смеси № 4, у которой зерна распределены по трем размерам, среднее число контактов $N_{к\,ср}$ воз-

росло в 1,38 раза. Такое повышение числа контактов объясняется тем, что зерна мелкой фракции при перемешивании смеси располагаются между зернами крупной фракции, образуя дополнительные зоны контакта и увеличивая плотность заполнения упаковок.

Математическая обработка полученных результатов исследования по распределению координации частиц (зерен) в объеме формовочных смесей позволила установить функциональную зависимость между числом контактов $N_к$ и плотностью упаковки зерен ρ в следующем виде

$$N_к = 12{,}9\rho_y^{1,5} \cdot n_z, \qquad (3.26)$$

где n_z – коэффициент, учитывающий количество зернистостей в смеси (при одной зернистости $n_{Z_1} = 1$, при двух – $n_{Z_2} = 1{,}19$, при трех – $n_{Z_3} = 1{,}38$).

Подставляя в уравнение (3.26) вместо ρ_y его выражение (3.12), получим в окончательном виде

$$N_к = 12{,}9 \cdot \left(\frac{62 - 2C}{49 - 1{,}5N} \right)^{1,5} \cdot n_z. \qquad (3.27)$$

Полученная зависимость (3.27) позволяет определять координационное число $N_к$ через нормируемые ГОСТом характеристики АИ, такие как твердость и структура, что дает возможность учесть все особенности строения черепка инструмента, в том числе и его пористость.

Для экспериментального исследования числа контактов между абразивными зернами в заформованном образце инструмента заданной структуры и твердости использовалась соответствующая методика, разработанная в ВНИИАШ. Сущность этого метода основана на том, что при смачивании запрессованных зерен раствором определенной вязкости и окраски за счет поверхностного натяжения он скапливается в зонах контакта, образуя при этом перемычки. После высыхания раствора запрессованный образец разрушается и помещается под микроскоп МБС, при помощи которого обнаруживаются по цветовому оттенку зоны контакта между зернами. В качестве раствора используются лак на нитрооснове красного цвета или раствор красной пасты в

спирте. Определение числа контактов проводили на образцах из электрокорунда белого зернистостью 25 [136].

В качестве примера и сравнения в табл. 3.4 приведены экспериментальные и расчетные данные по определению числа контактов между зернами в инструментах 24AF60O (24A25CT1) 6, 8, 10 и 12 структуры.

Т а б л и ц а 3.4

Экспериментальные и расчетные данные по числу контактов между зернами

Структура	Содержание зерна, %	Плотность заполнения ρ	Число контактов $N_к$	
			экспериментальное	расчетное (2.81)
6	50	0,862	11	10,4
8	46	0,793	9	9,1
10	42	0,724	8	7,7
12	38	0,655	7	6,8

Как видно из данных табл. 3.4, расхождение между экспериментальными значениями и расчетными по формуле (3.27) не превышают 6 – 7 %, что позволяет использовать эту формулу для практических вычислений координационных чисел с учетом структурных характеристик АИ.

Полученные выше результаты теоретико-экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности при совершенствовании инструментов направлено регулировать их характеристики и свойства путем введения в зерновой состав формовочных смесей дополнительно мелкодисперсного абразивного наполнителя [226] или составления формовочной смеси из абразивных материалов различных зернистостей в рациональном количественном соотношении [223].

3.3. Исследование объемно-размерных характеристик порового пространства черепка инструментов

Важным элементом внутреннего строения АИ, играющим большую роль в формировании структурно-механических свойств и эксплуатационных показателей, являются поры. Пористость инструмента в значительной степени предопределяет и качественные показатели процесса шлифования [10, 26, 31, 44, 98, 119, 123, 169, 192, 197, 210, 238, 288, 317, 320 и др.].

Как известно, объемное содержание пор и их размеры зависят от номера структуры, твердости и зернистости инструмента. Однако определение характеристик порового пространства представляет определенные трудности из-за стохастического распределения пор в черепке АИ. Случайный характер размера, формы и расположения пор в ограниченном объеме пространства черепка инструмента соответственно проявляется и на его рабочей поверхности.

Для изучения пористого пространства АИ на керамической связке воспользуемся моделью в виде дисперсно-пористой системы, имеющей поры разных, но постоянных по длине каждой поры радиусов. Обозначим $r_{\max}$ – максимальный радиус пор, а через $V(r) = V_n F_V(r)$ – объем пор размером $0 \le r \le r_{\max}$, где $F_V(r)$ – интегральная функция распределения объема пор по их размерам:

$$F_V(0) = 0;\ F_V(r_{\max}) = 1.$$

Плотность этой функции распределения обозначим через $f_V(r)$, тогда:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial F_V}{\partial d} = f_V(r); \\ &\int_0^{r_{\max}} f_V(r)dr = 1; \\ &V(r) = V_n \int_0^r f_V(r)dr = 1. \end{aligned}\right\} \qquad (3.28)$$

Если в пористом теле рассмотреть сечение от секущей плоскости произвольного направления и подсчитать в этом сечении число пор по радиусам,

то можно определить функцию распределения числа пор по размерам $f_r(r)$. При этом для изотропных моделей пористой структуры отношение суммы всех площадей пересечений (устьев пор) к общей площади плоского сечения будет равно пористости данного тела. В связи с этим пористость изучаемой модели выразится следующей формулой:

$$П = 2\pi \cdot n_y \cdot \int_0^{r_{max}} r^2 f_r(r) dr, \tag{3.29}$$

где n_y – число устьев пор.

При рассмотрении единицы объема пористого тела для любого $r \le r_{max}$ получим следующее равенство:

$$П = \int_0^r f_V(r) dr = 2\pi \cdot n_y \cdot \int_0^r r^2 f_r(r) dr, \tag{3.30}$$

откуда плотность интегральной функции распределения объема пор по их размерам выражается следующим уравнением:

$$f_V(r) = \frac{2\pi \cdot n_y}{П} \cdot r^2 \cdot fr(r). \tag{3.31}$$

Плотность функции распределения объема пор по их размерам $f_V(r)$ находится в прямой зависимости от числа устьев пор n_y, квадрата радиуса пор, функции распределения $f_r(r)$ и в обратной зависимости от пористости изучаемой структуры АИ.

Для определения пористости по формуле (3.29), плотности функции распределения $f_V(r)$ и других объемно-размерных характеристик АИ необходимо знание закона распределения числа пор по размерам $f_r(r)$. В общем случае этот закон можно найти как функцию случайных аргументов, но эта теоретическая задача чрезвычайно сложна даже при известных законах распределения всех аргументов. Можно только предположить о характере распределения пор в черепке инструмента известным закономерностям распределения абразивных зерен и их контактов между собой, считая, что при форми-

ровании черепка инструмента проявляется однотипный механизм распределения в объеме и на его рабочей поверхности как абразивных зерен, так и пор.

Для определения закона распределения зерен в черепке инструмента были проведены обширные и систематические экспериментальные исследования во ВНИИАШе [176, 178] и рядом других авторов [31, 120, 130, 212, 238, 257, 290, 327]. На примере электрокорундовых инструментов зернистостью F80 (16), F60 (25), F46 (40) показано, что распределение зерен лучше всех описывается логарифмически-нормальным законом. В связи с этим можно принять в качестве гипотезы, что распределение числа пор по размерам в инструменте и на его поверхности будет также подчиняться логарифмически нормальному закону.

При экспериментальном определении исследуемого распределения использовалась методика, разработанная во ВНИИАШе. Сущность этой методики заключается в том, что на подготовленных образцах абразивного инструмента заданной характеристики при помощи компоратора ИЗА-2 измеряются размеры и количество пор. Приведенный диаметр пор d_n вычислялся по формуле:

$$d_n = \sqrt{l_n \cdot b_n}, \tag{3.32}$$

где l_n, b_n – соответственно длина и ширина поры.

На рис. 3.6 показаны кривые плотности распределения пор по размерам абразивных инструментов различных твердостей, структур и зернистостей. Анализ этих кривых показывает, что с увеличением структуры и зернистости и уменьшением твердости инструмента уменьшаются плотности вероятности распределения пор по размерам и наблюдается увеличение размера пор.

Например, при сравнении двух инструментов 6 и 11 структур (рис. 3.6) максимальная плотность вероятности уменьшается в 1,41 раза, а размер пор соответственно увеличивается в 1,56 раз. При увеличении зернистости инструмента 35FK6V(25ACM16K5) с F80(16) до F46(40) плотность вероятности уменьшается в 1,69, а размер пор соответственно увеличивается в 1,65 раз.

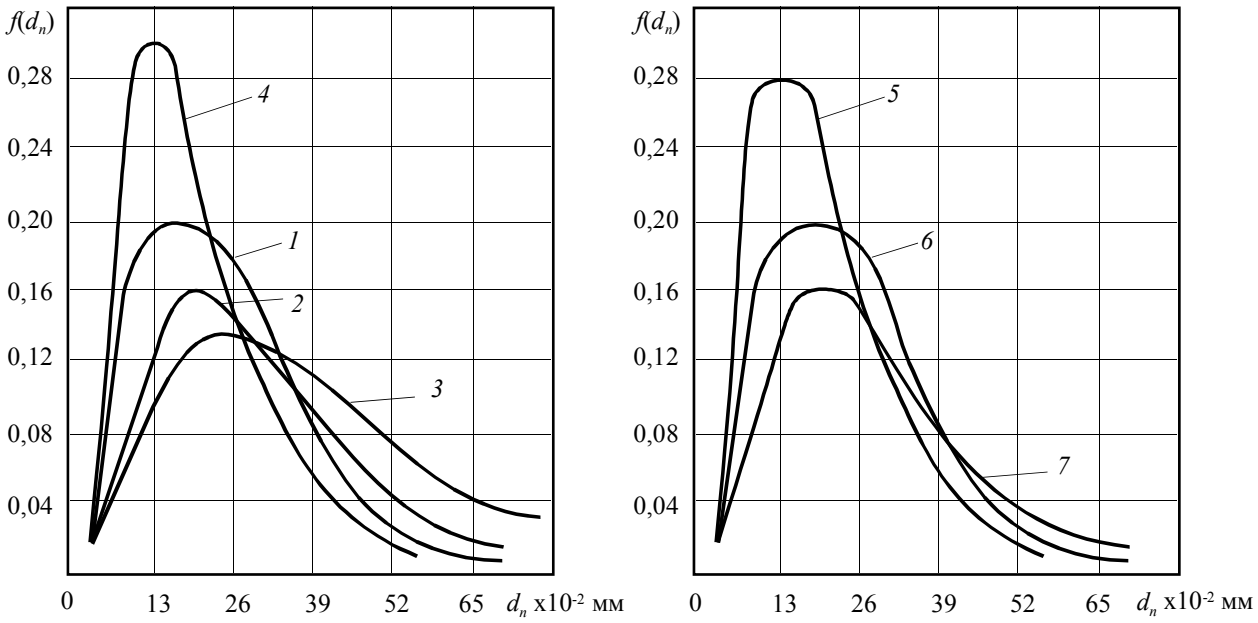


Рис. 3.6. Кривые плотности распределение пор по размерам:
1 – 24AF60K6V; *2* – 24AF60K9V; *3* – 24AF60K11V; *4* – 24AF60M6V;
5 – 24AF80K6V; *6* – 24AF60K6V; *7* – 24AF46K6V

Аппроксимация экспериментальных данных по распределению пор по размерам производилась с использованием девяти законов распределения: нормального, логарифмически нормального, Вейбулла, Релея, Пуассона, гамма – распределения, Эрланга, усеченно-нормального, экспоненциального.

Результаты аппроксимации показали, что статистическое распределение числа пор по их размерам с большей достоверностью описывается логарифмически нормальным законом, чем другими функциями распределения. Проверка сходимости теоретических и экспериментальных кривых плотностей распределения проводилась по критерию согласия Пирсона χ^2 при пятипроцентном доверительном уровне вероятности.

Представленные на рис. 3.6 распределения пор по размерам имеют и характерные внешние признаки логарифмически нормального закона, при котором кривые плотности распределения, как правило, имеют очень крутые левые и пологие правые ветви.

В связи с этим можно считать, что вероятностным законом, которому подчиняется распределение пор по размерам в АИ, является логарифмически нормальное распределение вида:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{y - M(y)}{2\sigma_y^2} \right), \qquad (3.33)$$

где $y = d_n$ – случайная величина; M_y – математическое ожидание; σ_y – дисперсия.

Результаты расчетов параметров распределения сведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Параметры распределения пор по размерам

Характеристика инструмента	Математическое ожидание $M(d_n)$	Дисперсия σ_y
1. 24AF60K6V	0,196	0,0128
2. 24AF46K6V	0,243	0,0190
3. 24AF60K10V	0,288	0,0229
4. $\frac{\text{24AF60K6V}}{\text{Б40}}$ (ВП)	0,382	0,0409

Примечание: ВП – высокопористый инструмент

Анализ данных табл. 3.5 показывает, что увеличение номера структуры и зернистости повышает не только математическое ожидание размера пор, но и их дисперсию, т.е. неоднородность строения инструмента. Этим объясняется снижение структурно-механических свойств таких инструментов и требуется разработка технологии их совершенствоания с целью повышения механической прочности при сохранении заданных объемно-размерных характеристик порового пространства инструмента, необходимых для повышения эксплуатационных параметров процесса шлифования.

Параллельно с определением размера пор и их распределением, проводились экспериментальные исследования пористости АИ известным методом [170], основанном на измерении газопроницаемости черепка инструмента прибором ПОСК-1.

На рис. 3.7 представлены зависимости изменения пористости от структурных характеристик АИ. Пористость инструмента увеличивается с увеличением его номера структуры и уменьшением твердости и зернистости.

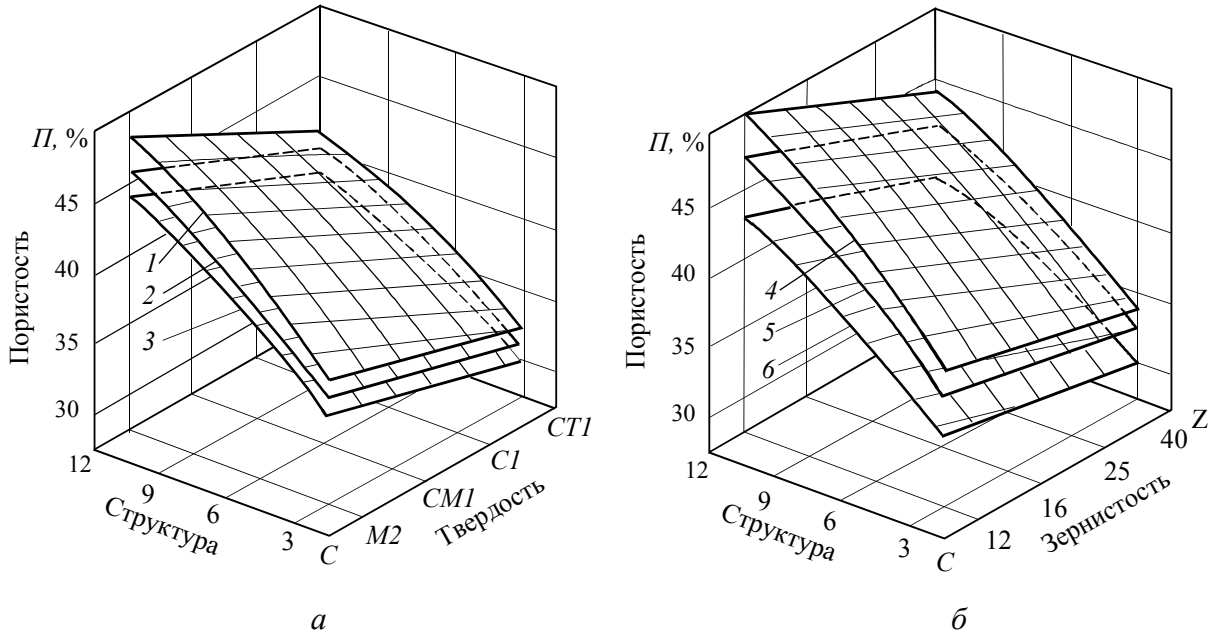


Рис. 3.7. Изменение пористости в зависимости от характеристик абразивного инструмента на керамической связке: *а*: *1* – z = 16; *2* – z = 25; *3* – z = 40; *б*: *4* – I(М2); *5* – К(СМ1); *6* – О(СТ1)

На основании полученных экспериментальных данных было составлено уравнение, отображающее степенную связь между абсолютной пористостью серийного стандартного инструмента и его нормированными ГОСТом структурными характеристиками с учетом вида абразива и его индекса качества:

$$П_{ст} = 48{,}9 \cdot Z^{-\alpha} \cdot T_{и}^{-\beta} \cdot (C+1)^{\gamma} \cdot K_0 \cdot K_{в}, \qquad (3.34)$$

для определения пористости модернизированного АИ можно использовать следующее уравнение:

$$П_{м} = П_{ст} \cdot K_{м}, \qquad (3.35)$$

где α, β и γ – показатели степеней (α= 0,15; β = 0,10; γ = 0,29); $T_{и}$ – твердость инструмента, $T_{и} = 1{,}54^{(N-1)}$; K_0 – коэффициент, учитывающий индекс качества абразива ($Н – K_0$ = 1,0; $Д – K_0$ = 0,91; $П – K_0$ = 1,22; $В – K_0$ = 1,40); $K_{в}$ – коэффициент, учитывающий вид абразива (24А, 25А – $K_{в}$ = 1,0; 44А – $K_{в}$ = 0,82;

54С, 64С – $К_в$ = 0,73); $К_м$ – коэффициент, учитывающий способ модифицирования структуры инструмента (стандартный – $К_м$ = 1,0; с дисперсным наполнителем – $К_м$ = 0,85; из смеси абразивов разных зернистостей – $К_м$ = 0,80; импрегнированный серой – $К_м$ = 0,76).

Сопоставление расчетных значений пористости по формуле (3.35) и экспериментальных показало, что расхождение в значениях пористости находится в пределах 5 ÷ 8 %.

Из уравнения (3.34) следует, что пористость серийного инструмента возрастает с увеличением номера структуры и уменьшением зернистости и твердости. Варьируя структурными характеристиками инструмента, можно в каждом конкретном случае устанавливать требуемую для технологического процесса шлифования оптимальную пористость.

На рис. 3.8 показаны зависимости пористости от структуры серийного стандартного и высокопористого инструментов. Как видно из этих зависимостей пористость высокопористого инструмента $П_{ВП}$ имеет тот же характер изменения и может определяться следующим выражением:

$$П_{ВП} = \alpha_н \cdot П_{ст}, \qquad (3.36)$$

где $\alpha_н$ – коэффициент, учитывающий процентное содержание наполнителя; при 5 – 10 %-ном содержании $\alpha_н$ = 1,10 – 1,12; при 15 – 20 %–ном $\alpha_н$ = 1,13 – 1,15; при 25 % и более – $\alpha_н$ = 1,16 – 1,21; для инструмента без наполнителя $\alpha_н$ = 1,0.

На рис. 3.9 показаны зависимости диаметра пор $d_{n\ ср}$ от структурных характеристик абразивного инструмента. Математико-статистическая обработка полученных экспериментальных результатов и данных ряда исследователей [170, 172, 257, 321] позволила установить зависимость размера пор от зернистости и пористости в следующем виде:

$$d_{n\,ср} = 0{,}203 \cdot Z^{0{,}98} \cdot (\alpha_н \cdot П_{ст})^{3{,}72}. \qquad (3.37)$$

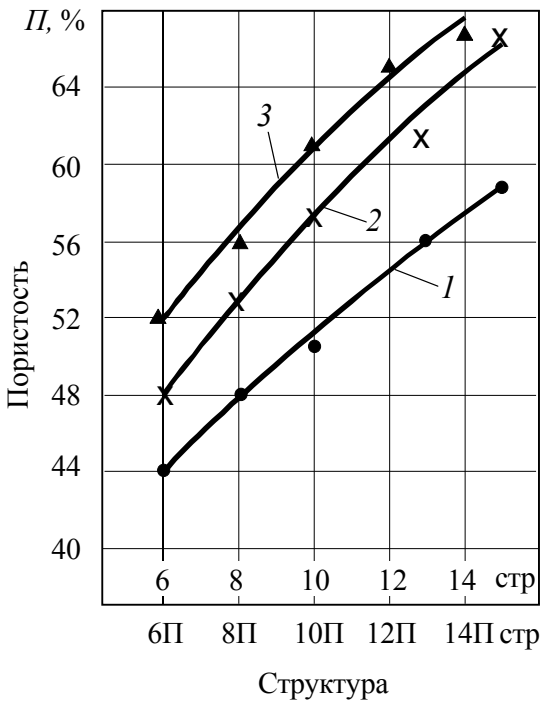


Рис. 3.8. Изменение пористости в зависимости от структуры инструмента:
1 – стандартный инструмент; *2* – высокопористый инструмент (10 % наполнителя);
3 – высокопористый инструмент (25 % наполнителя)

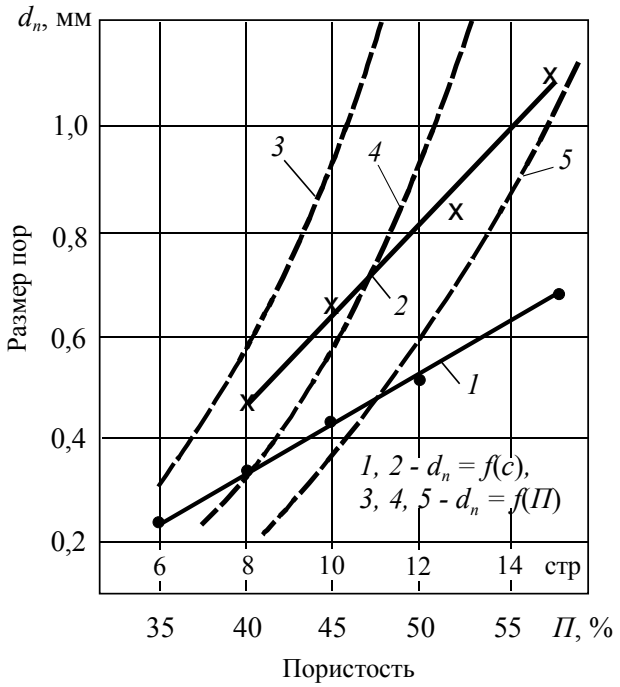


Рис. 3.9. Зависимость размера пор от структуры и пористости инструмента:
1 – стандартный инструмента; *2* – высокопористый инструмент (10 % наполнителя); *3* – инструмент зернистостью $Z = 40$; *4* – инструмент $Z = 25$; *5* – инструмент $Z = 16$

Подставляя в формулу (3.37) значение $П_{ст}$ в долях из формулы (3.34), получим функциональную зависимость размера среднеэффективного диаметра пор от нормируемых ГОСТом характеристик инструмента (зернистости Z, структуры C и твердости $Т_и$) в виде:

$$d_{n\,ср} = 1{,}42 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha_н^{3{,}72} \cdot Z^{0{,}42} \cdot (C+1)^{1{,}08} \cdot T_и^{-0{,}37} \cdot \left(K_0 \cdot K_в\right)^{3{,}72}. \qquad (3.38)$$

Размер пор увеличивается с повышением зернистости и номера структуры, а уменьшается с увеличением степени твердости абразивного инструмента. Расчетные величины размера пор по зависимости (3.38) отличаются от значений, полученных экспериментальным путем в пределах 5 – 12 % с доверительной вероятностью 95 %.

Таким образом, полученные выше зависимости (3.34) и (3.38) позволяют определить с большой достоверностью пористость и размер пор инструмента через его нормируемые ГОСТом структурные характеристики и производить рациональный выбор инструмента для заданных режимов и условий процесса шлифования. Кроме того, видно, что регуляция объемно-размерных характеристик порового пространства инструмента возможна за счет ввода в формовочную смесь частиц порообразователей с различным объемным содержанием, а также путем изменения содержания основной фракции зернового состава абразивного материала.

3.4. Аналитическое определение параметров рабочей поверхности инструментов

Рассмотренная выше статистическая модель объемного строения АИ в виде дисперсно-поровой системы, в которой расположение зерна и пор в пространстве определяются вероятностными законами, дает возможность определять не только объемно-размерные характеристики, но и необходимые параметры рабочей поверхности инструмента. Это объясняется тем, что рабочая поверхность или поверхностный слой инструмента является органической частью его объемного строения. В связи с этим можно ожидать и пря-

мую зависимость параметров рабочей поверхности от объемно-размерных характеристик инструмента, определяемых через нормируемых ГОСТом показатели внутреннего строения черепка – зернистость, твердость и структуру.

Для математического описания взаимосвязей между объемно-размерными характеристиками структуры инструмента с параметрами его рабочей поверхности необходимо составить модель рельефа рабочей поверхности и определить ее оценочные показатели.

Глубина шлифования на многих операциях назначается в пределах 5 – 50 мкм, т.е. в процессе шлифования участвует только небольшая верхняя часть профиля инструмента по данным [44, 256, 259] всего лишь 6 ÷ 10 % режущих кромок, расположенных на рабочей поверхности участвует в работе шлифования.

На рис. 3.10 показаны основные элементы профиля рельефа рабочей поверхности АИ.

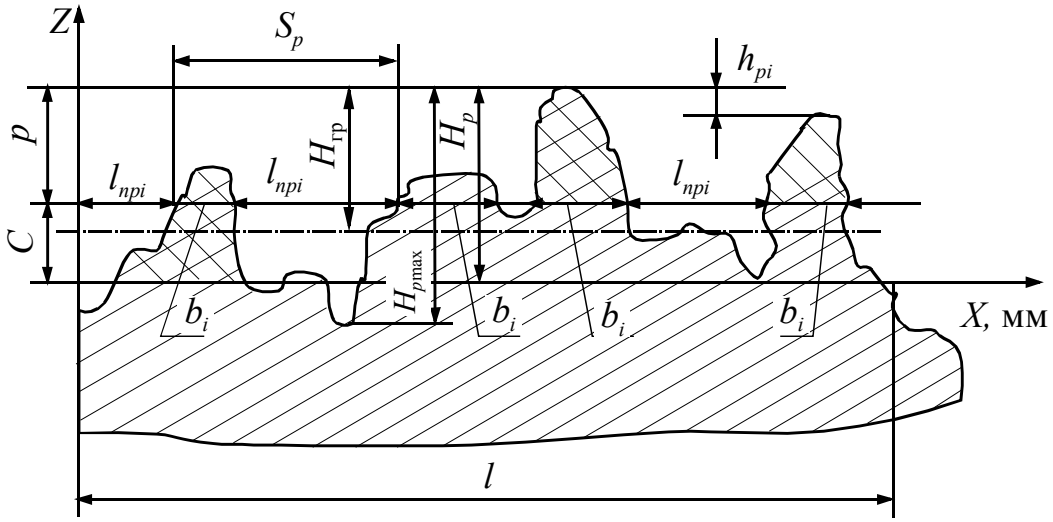


Рис. 3.10. Профиль рабочей поверхности инструмента: $l_в$ – базовая длина профиля; $H_{p\ max}$ – максимальная высота (глубина) профиля; H_p – высота профиля на уровне p сечения профиля; $H_{гр}$ – граничная высота профиля; S_p – шаг между выступами на фиксированном уровне p; l_{np_i} – длина поверхностной поры; b_i – длина отрезка выступа на уровне p; h_{p_i} – разновысотность зерен

Основными параметрами, оценивающими геометрию рельефа профиля рабочей поверхности инструмента, принято считать [240]:

– относительную опорную длину профиля:

$$t_p = \frac{\sum^{n} b_i}{l_в}; \tag{3.39}$$

– шаг (среднее расстояние) между выступами (зернами):

$$S_p = \frac{l_в}{Z_0}, \tag{3.40}$$

где Z_0 – число выступов (зерен) на уровне p;

– среднюю длину отрезков выступов:

$$\overline{b}_p = \frac{\sum^{n} b_i}{Z_p} = t_p \cdot S_p, \tag{3.41}$$

где Z_p – среднее число выступов (зерен):

$$Z_p = \frac{1}{S_p}. \tag{3.42}$$

Значения этих параметров изменяются в зависимости от высоты H_n профиля рабочей поверхности, например, относительная опорная длина профиля t_p уменьшается до нуля, а средний шаг между зернами S_p резко увеличивается в верхней части профиля на уровне $p = 0$.

Большинство исследователей [120, 257, 258, 259, 290 и др.], устанавливая закономерность распределения режущих кромок в рабочем слое инструмента, анализировали этот слой как отдельную и самостоятельную часть инструмента без учета ее связи с внутренним строением матрицы, из которой она непрерывно образуется. В связи с этим существуют разноречивые результаты исследований по данному вопросу, убедительно подтверждаемые в каждом отдельном случае экспериментами. В работе [198] дан анализ исследованиям по определению закона распределения режущих кромок в рабочем слое шлифовальных кругов, из которого также видно, что в этом вопросе нет единого мнения, и разные исследователи описывают распределение режущих

кромок нормальным, параболическим, равномерным или показательным законом распределения.

А. К. Байкалов, обобщая результаты ранее проведенных исследований [122, 198, 239, 257, 259, 327], отмечает, что сложность явлений при шлифовании порождает многообразие точек зрения на строение рабочей поверхности инструмента и математических интерпретаций полученных экспериментальных данных. Исходя из пуассоновского абразивного пространства матрицы инструмента, ему удалось теоретически установить параболический закон распределения зерен в рабочем абразивном слое.

Ряд исследователей [123, 257, 258, 290], изучая распределение абразивных зерен по глубине рабочего слоя на рабочей поверхности шлифовального круга, отмечают, что наиболее точно распределение зерен можно охарактеризовать глубиной залегания H_0 и характером их распределения на этой глубине, который можно описать следующей показательной функцией:

$$\sum Z_{рз} = \alpha \cdot H_0^k. \qquad (3.43)$$

По мнению авторов, именно это количество зерен участвует в процессе шлифования и формирует обработанную поверхность. Глубина залегания H_0 и показатель степени k зависят от режима и метода правки круга.

Авторы [120, 209], рассматривая расположение режущих граней зерен по нормали к рабочей поверхности инструмента с учетом распределения их по размерам, величины выступа их над связкой и неровностей самой связки, получили выражение функции распределения вершин зерен по глубине рабочего слоя инструмента $F(x)$ в степенной зависимости:

$$F(x) = 0{,}24\left(1{,}7 - \frac{x}{d_0}\right)^{2{,}75} \text{ при } 0 \le \frac{x}{d_0} \le -1{,}75. \qquad (3.44)$$

Существует ряд экспериментальных исследований по изучению показателей поверхностного слоя шлифовальных кругов, результаты которых представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Показатели рабочей поверхности инструментов
по данным разных исследователей

Зернистость круга	Плотность распределения зерен (шт./мм^2) и среднее расстояние между ними (мм) по данным							
	П. Е. Дьяченко [80]	Н. И. Волского [61]	Г. М. Ипполитова [92]	С. Г. Редько [256]	С. А. Попова [238]	Л. Н. Филимонова [288]	Ю. К. Новоселова [209]	В. И. Курдюмова [172]
16	–	–	23,4 0,206	6,0 0,408	–	2,9 0,588	–	1,5 0,819
25	8,9 0,336	19,0 0,230	9,9 0,317	1,0 1,0	1,5 0,819	1,5 0,819	3,4 0,543	0,8 1,123
40	–	–	5,3 0,434	3,43 0,540	–	1,4 0,847	–	0,45 1,492

Примечание: в числителе – плотность распределения, в знаменателе – расстояние между зернами

Как видно из табл. 3.6 между экспериментальными данными разных исследователей существуют значительные расхождения по плотности зерен и расстоянию между ними. Это можно объяснить тем, что показатели рабочей поверхности инструмента зависят не только от зернистости шлифкругов, но и от их твердости, структуры, пористости, содержания основной фракции зерен и других факторов. Кроме того, на показатели влияет уровень замера профиля рабочей поверхности и место замера – на периферии или торце круга.

Не умаляя значимости выше перечисленных работ и других исследований, по этому вопросу следует отметить следующие их недостатки. Во-первых, существующую неопределенность значений параметров и коэффициентов, входящих в формулы, для определения как законов распределения зерен, так и количества режущих граней в рабочем слое инструмента. Отсутствие взаимосвязи определяемых параметров с объемно-размерными харак-

теристиками матрицы инструмента. Все это не позволяет аналитическим путем определять необходимые параметры рабочей поверхности инструмента на любом уровне профиля рабочего слоя.

В. И. Островским [215] была рассмотрена модель элементов объема между соседними абразивными зернами на рабочей поверхности инструмента с предположением, что поверхностные характеристики рабочего слоя инструмента полностью определяются его нормируемыми характеристиками. Для определения расстояния δ между зернами на заданной глубине y была предложена следующая формула:

$$\delta = K_\delta d_з (d_з / y)^{1,5}, \qquad (3.45)$$

где $K_\delta = K_п \cdot K_{ск} \cdot K'_з$ – коэффициент структуры, учитывающий пористость ($K_п$); структуру и твердость ($K_{ск}$) и условия правки ($K'_з$) инструмента; $d_з$ – размер абразивного зерна.

Существенным недостатком представленной зависимости является то, что не учитывается характер изменения относительных показателей рабочей поверхности по высоте профиля H и размер пор в черепке, являющимся интегральным показателем объемно-размерных характеристик АИ.

В работе [172] приведены экспериментальные данные по определению плотности распределения вершин зерен по глубине рабочего слоя шлифовального круга. Исследовались абразивные круги из электрокорунда нормального на керамической связке с номерами зернистостей 16, 25, 40, структур 6, 9, 12. По экспериментальным данным была установлена зависимость, отражающая изменение плотности вершин зерен C от глубины рабочего слоя h, вида:

$$C_{вз} = A \cdot h^k, \qquad (3.46)$$

где $A = 8{,}26 \cdot 10^{-9} \cdot \dfrac{K_з^{2/3}}{d_з^2}$ – коэффициент, зависящий от объемной доли абразивного зерна $K_з$ и размера d_3 зерна в круге; k – показатель степени (k = 2,15).

Среднее расстояние между вершинами зерен определялось по следующей формуле:

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{C_{вз}}}. \qquad (3.47)$$

К сожалению, в этой работе не имеется данных о твердости шлифовальных кругов, которые испытывались в экспериментах. В данной работе, как и в рассмотренных выше исследованиях, глубина профиля рабочего слоя выбирается фиксированной и без учета закономерностей изменения показателей рабочей поверхности от объемно-размерных характеристик порового пространства инструмента.

Следует отметить один общий недостаток, присущий большинству исследований, посвященных изучению и оценки геометрии рельефа режущей поверхности с целью аналитического определения количества режущих зерен (кромок) на рабочей поверхности инструмента, среднего расстояния между ними или плотности распределения зерен по высоте рельефа. При выводе расчетных формул и зависимостей при решении поставленных задач учитывались размер зерен и их объемное содержание в матрице инструмента без взаимосвязи с параметрами его порового пространства – общей пористостью и размером пор. Известно, что объемное содержание абразивных зерен в матрице инструмента характеризует только его структуру, поэтому необходимо включать в расчетные формулы и пористость инструмента для учета его твердости при определении параметров рельефа рабочей поверхности инструмента.

В связи с этим, важной задачей является установление взаимной связи параметров рельефа рабочей поверхности инструмента с его внутренним объемным строением, определяемым зернистостью, пористостью, твердостью и структурой инструмента.

Согласно геометрии профиля рельефа рабочей поверхности, представленный на рис. 3.11, выразим в аналитическом виде основные параметры рельефа абразивной поверхности инструмента в следующем виде.

В общем случае максимальная высота профиля рельефа рабочей поверхности $H_{p\max}$ определяется зернистостью инструмента и глубиной заделки зерен в связке. Значение $H_{p\max}$ можно ориентировочно рассчитать по формуле [3]:

$$H_{p\max} = d_{з\max}(1-\varepsilon), \tag{3.48}$$

где $d_{з\max} = \bar{d}_з + 3\sigma$ – наибольший размер зерен в инструменте ($\sigma = 0{,}12\ \bar{d}_з$);

ε – коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке.

Определим на профиле рельефа рабочей поверхности граничную высоту $H_{гр}$ (рис. 3.10), на которой происходят основные изменения параметров рельефа рабочего слоя поверхности при переходе матрицы инструмента в его рабочую поверхность.

Для этих целей рассмотрим процессы формирования геометрии рельефа рабочей поверхности инструмента при подготовке его к эксплуатации путем правки. При любом методе правки протекают два процесса: упругопластическая деформация сжатия верхнего слоя рабочей поверхности, а при достижении предела прочности этого слоя происходит разрушение связки, дробление и скалывание абразивных зерен. При этом образуется определенный рельеф рабочей поверхности абразивного инструмента.

Исходя из условия равенства работы сжатия верхнего слоя рабочей поверхности, режущими элементами правящего инструмента и работы, затрачиваемой на разрушение при формировании рельефа, можно определить предельную величину граничной высоты $H_{гр}$ по следующему выражению:

$$H_{гр} = \frac{1{,}45Ed_з\mu^2}{k_p\sigma_p} \cdot e^{2\mu}\left(\frac{1}{\cos\frac{\varphi}{2}} + \frac{f}{\sin\frac{\varphi}{2}}\right)\sin\alpha_p, \tag{3.49}$$

где μ – коэффициент Пуассона; $\sigma_р$ –предел прочности на разрыв; k_p – коэффициент концентрации напряжений; φ – угол заострения зерна; $\alpha_р$ – угол резания режущего элемента правящего инструмента; f – коэффициент трения правящего инструмента о поверхность черепка абразивного инструмента.

Расчеты по формуле (3.49) и обработка профилограмм рельефа рабочих поверхностей абразивных инструментов на керамической связке зернистостями 12, 16, 25, 40 позволила установить значение граничной высоты:

$$H_{\text{гр}} = (0{,}38 \div 0{,}41) d_{\text{з}}. \qquad (3.50)$$

Полученное выражение (3.50) подтверждается экспериментальными данными [240] на примере шлифовального круга 24А25С15К. В пределах граничной высоты $H_{\text{гр}}$, интенсивно изменяются относительные площади, занимаемые на шлифе зернами и порами. Например, площадь, занимаемая абразивными зернами, существенно увеличивается с 15 до 58 % от нулевого уровня поверхности до граничной высоты $H_{\text{гр}} = 100 \div 110$ мкм. Относительная площадь, приходящаяся на поверхностные поры, пропорционально уменьшается также до $H_{\text{гр}}$.

Для определения закономерности изменения t_p по высоте профиля были обработаны профилограммы рельефа рабочих поверхностей абразивных инструментов на керамической связке зернистостями 16, 25 и 40 с различной твердостью и номерами структур.

Установлено, что на уровне высоты $H_{\text{гр}}$ относительная длина профиля t_p достигает максимума (рис. 3.10) и определяется с учетом пористости $П$ за зависимости:

$$t_{p\,\max} = 1 - П. \qquad (3.51)$$

Принятые в качестве исследуемой функции отношение t_p и $t_{p\,\max}$ и введение в качестве аргумента приведенной высоты профиля рабочей поверхности инструмента в виде $\dfrac{H_p}{H_{\text{гр}}}$ позволило проводить сравнительный анализ параметров профилограмм рабочих поверхностей инструментов с различными зернистостями, номерами структур и твердостями.

Полученные зависимости относительной опорной длины профиля от приведенной высоты профиля рабочей поверхности инструментов различных зернистостей практически совпадают, а разброс значений не превышает ве-

личин, характерных для профилограмм. В результате математической обработки этих графиков методом наименьших квадратов получена функциональная зависимость, графически представленная на рис. 3.11. Эта зависимость с достаточной точностью аппроксимируется следующим выражением:

$$\frac{t_p}{t_{p\max}} = 1{,}22\left(\frac{H_p}{H_{\text{гр}}}\right)^{0{,}78}, \tag{3.52}$$

откуда опорная длина профиля рабочей поверхности инструмента

$$t_p = 1{,}22\left(\frac{H_p}{H_{\text{гр}}}\right)^{0{,}78} \cdot (1 - П). \tag{3.53}$$

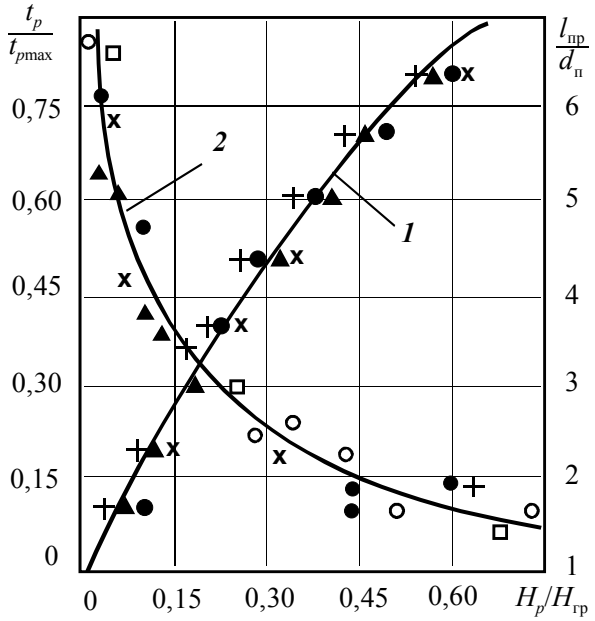


Рис. 3.11. Зависимость $\frac{t_p}{t_{p\max}}$ (*1*) и $\frac{l_{\text{пр}}}{d_{\text{п}}}$ (*2*) от приведенной высоты профиля рабочей поверхности инструментов $\frac{H_{\text{р}}}{H_{\text{гр}}}$ по данным разных авторов

Исходя из очевидных геометрических соотношений параметров профиля рабочей поверхности инструмента (рис. 3.10) среднее расстояние $l_{\text{ср.р.}}$ на уровне p или шаг между соседними зернами (выступами) S_p по длине окружности абразивного круга определяется следующим уравнением:

$$l_{\text{ср.р.}} = S_p = \frac{l_{np}}{(1 - t_p)}, \tag{3.54}$$

где $l_{\text{пр}}$ – средневероятностный размер (длина) поверхностной поры.

Для нахождения аналитического выражения $l_{\text{пр}}$ была проведена обработка экспериментальных данных исследований различных авторов [10, 212, 239, 289 и др.], результаты которой представлены на рис. 3.11 и в табл. Приложения П.1.

Анализ этих результатов показал, что отношение длины поверхностной поры $l_{\text{пр}}$ к размеру пор d_n в черепке инструмента (рис. 3.11) можно с достаточной для практики точностью в пределах 5 – 10 % описать следующим выражением:

$$\frac{l_{np}}{d_n} = 1{,}6\left(\frac{H_p}{H_{\text{гр}}}\right)^{-0{,}5}. \tag{3.55}$$

С учетом граничных условий замеров и поправочных коэффициентов длина поверхностной поры

$$l_{\text{пр}} = \begin{cases} 1{,}6 d_n \left(\dfrac{H_p}{H_{\text{гр}}}\right)^{-0{,}5} \cdot k_{\text{п}} \quad \text{при } 0 < H_p \le H_{\text{гр}}, \\ 1{,}6 d_n \cdot \left(\dfrac{H_p}{H_{\text{гр}}}\right)^{-0{,}15} \cdot k_{\text{п}} \text{ при } H_{\max} > H_p \ge H_{\text{гр}}, \end{cases} \tag{3.56}$$

где $K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий методы правки инструмента (обтачивание – $k_{\text{п}} = 1{,}0$; обкатывание – $k_{\text{п}} = 1{,}4$; шлифование – $k_{\text{п}} = 1{,}3$).

Далее, на основании полученных выше зависимостей, можно рассчитать статическое количество зерен n_p на любом заданном уровне рельефа рабочей поверхности, как по длине окружности шлифовального круга

$$n_{l_p} = \frac{1}{l_{\text{ср.р}}}, \tag{3.57}$$

так и вдоль его образующей или в поперечном направлении

$$n_{b_p} = \frac{1}{b_{\text{ср.р}}}. \tag{3.58}$$

В табл. 3.7 представлены данные для сравнения экспериментальных и расчетных значений средневероятностных расстояний между зернами (выступами) $l_{ср}$. Экспериментальные данные взяты из работ [10, 240], а расчетные значения получены по формуле (3.54).

Таблица 3.7

Данные эксплуатационных и расчетных значений расстояний между зернами $l_{ср}$

Уровень секущей профиля H_p, мкм	24А40ПСМ15К		24А25НСМ16К		24А16НСМ115К(ВП)	
	Эксперимент [240] $l_{ср.р}$, мм	Расчетное значение $l_{ср.р}$, мм	Эксперимент [10] $l_{ср.р}$, мм	Расчетное значение $l_{ср.р}$, мм	Эксперимент [10] $l_{ср.р}$, мм	Расчетное значение $l_{ср.р}$, мм
5	1,54	1,53	1,38	1,33	–	–
10	1,30	1,24	1,18	1,09	2,28	2,19
20	1,15	1,08	0,95	0,92	1,76	1,69
30	1,05	0,99	0,88	0,86	1,54	1,46
40	1,00	0,98	0,83	0,83	1,50	1,62
50	0,95	0,97	0,79	0,84	–	–

Анализ табличных данных показал, что расхождение между экспериментальными и расчетными значениями $l_{ср}$ не превышает 10 % с вероятностью 0,95 и всех представленных шлифовальных кругов, отличающихся между собой зернистостью и структурой. Это свидетельствует об адекватности расчетной модели рабочей поверхности абразивных инструментов с реальным рельефом поверхности используемых на производстве шлифовальных кругов.

Для представления модели рабочей поверхности инструмента в трехмерном пространстве необходимо дополнительно ввести аналитическое определение значений разновысотности зерен h_p. Разновысотность абразивных зерен – это среднее расстояние между смежными по высоте вершинами зерен, попавших в сечение, перпендикулярное оси вращения шлифовального круга. Разновысотность абразивных зерен на рабочей поверхности исходного

инструмента зависит от его зернистости, структуры и твердости. В процессе эксплуатации инструмента на разновысотность зерен дополнительно будут влиять режимы правки и правящий инструмент, режимы шлифования, состав СОЖ, время шлифования и др.

В работе [70] была предложена формула для определения разновысотности абразивных зерен при шлифовании заготовок из труднообрабатываемых материалов в следующем виде

$$h_p = \frac{3{,}3}{P_{\text{к}}^{1/8}} \left(\frac{l_{\text{к}}^2}{A_{\text{к}}} \right)^{7/16}, \qquad (3.59)$$

где $P_{\text{к}}$ – удельное радиальное усилие на круг; $l_{\text{к}}$ – среднее расстояние между зернами; $A_{\text{к}} = D_{\text{к}}$ – диаметр круга.

Анализ формулы (3.59) показывает, что наибольшее влияние из всех других факторов на разновысотность зерен оказывает среднее расстояние между зернами, т.е. исходные параметры рабочей поверхности инструмента. Исходя из того, что одним из важных параметров рабочей поверхности следует считать отношение $\frac{l_{\text{ср}}}{d_{\text{з}}}$, при обработке экспериментальных данных ряда авторов [31, 70, 123, 257] в данной работе была получена зависимость приведенной разновысотности зерен $\frac{h}{d_{\text{з}}}$ от $\frac{l_{\text{ср}}}{d_{\text{з}}}$ (рис. 3.12).

Аппроксимация этой зависимости позволила получить следующую формулу для определения разновысотности зерен:

$$h_p = 0{,}25 d_{\text{з}} + 0{,}12 \frac{l_{\text{ср}}^{1{,}25}}{d_{\text{з}}^{0{,}25}}, \qquad (3.60)$$

где $l_{\text{ср}}$ и $d_{\text{з}}$ измеряются в мм.

Следует отметить, что в процессе шлифования разновысотность не остается постоянной, и, как правило, возрастает, но эти изменения находятся в пределах 15 – 20 % [109, 265], что можно всегда учесть коэффициентом поправки, введя его в формулу (3.60).

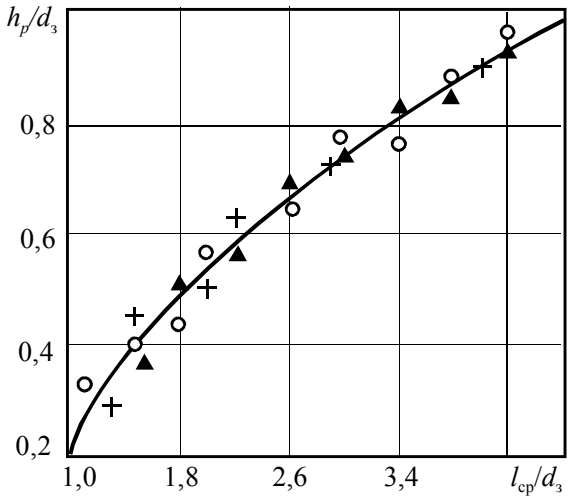


Рис. 3.12. Зависимость разновысотности зерен от отношения среднего расстояния между ними и размером зерна: ▲ – $z = 40$; + – $z = 25$; • – $z = 16$

Полученная выше трехмерная расчетная модель рельефа рабочей поверхности абразивного инструмента позволяет аналитически определять взаимосвязь объемно-размерных характеристик структуры инструмента с параметрами его рабочей поверхности и по этим зависимостям подбирать идентичные параметры РП, изменяя характеристики или модернизируя АИ.

Установленные закономерности изменения параметров рельефа рабочей поверхности абразивного инструмента дают возможность определять на любом уровне профиля поверхности средние расстояния между зернами, количество зерен, приходящихся на единицу длины рабочей поверхности, относительную опорную длину профиля t_p, размеры поверхностных пор в продольном и поперечном направлении и разновысотность зерен.

Для определения числа режущих зерен в контактной зоне шлифования представим технологический процесс шлифования как систему массового обслуживания с отказами, состоящей из следующих подсистем: рабочей поверхности абразивного инструмента, самого процесса резания металла и поверхности обрабатываемой детали.

Главной характеристикой первой подсистемы является средневероятностное количество зерен на единице длины или площади при заданном уровне рельефа рабочей поверхности инструмента, которая дает возможность

определять, с какой интенсивностью λ подаются зерна в зону шлифования по выражению

$$\lambda = \frac{1}{\tau_n} = \frac{V_к}{l_{ср}}, \tag{3.61}$$

где τ_n – время, в течение которого инструмент проходит путь, равный расстоянию $l_{ср}$ между зернами; $V_к$ – скорость вращения инструмента.

Учитывая хаотическое расположение зерен на рабочей поверхности инструмента, можно принять, что вероятность наличия в контактной зоне резания n зерен за время t выражается формулой:

$$P_n(t) = e^{-\lambda t}\frac{(\lambda t)^n}{(n)!}. \tag{3.62}$$

Дифференцируя выражение (3.62), получим плотность распределения двух соседних зерен в зоне резания:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \tag{3.63}$$

Это распределение подчиняется показательному закону, интенсивность которого

$$\nu = \frac{1}{\tau_p} = \frac{V_к}{L_к}, \tag{3.64}$$

где τ_p – время пребывания зерна в контакте с поверхностью детали; $L_к$ – длина кривой контакта шлифовального круга с поверхностью детали.

Например, при плоском шлифовании периферией круга:

$$L_к = \left(1 \pm \frac{V_g}{V_к}\right)\sqrt{Dt}, \tag{3.65}$$

где V_g – скорость движения детали; D – диаметр шлифовального круга; t – – глубина шлифования.

Далее рассмотрим возможные состояния исследуемой системы. Первое состояние системы S_0, когда часть зерен не входит в контакт с поверхностью детали из-за их взаимного перекрытия и разновысотности на рабочей по-

верхности инструмента. Второе состояние S_1, когда остальные зерна входят в контакт с поверхностью и производят резание.

Определим вероятность пребывания системы в состоянии S_0 и изменения этого состояния за малый отрезок времени Δt, т.е. вероятность того, что в момент времени $(t+\Delta t)$ система будет находиться в состоянии S_0.

Вероятность первого варианта, когда состояние системы не изменяется, будет равна:

$$P_A = P_0(t)(1-\lambda\Delta t), \tag{3.66}$$

где P_0 – вероятность состояния S_0.

Вероятность второго варианта:

$$P_B = P_1(t)\nu\Delta t, \tag{3.67}$$

где P_1 – вероятность состояния S_1.

Тогда $$P_0(t+\Delta t) = P_0(1-\lambda\Delta t) + P_1\nu\Delta t. \tag{3.68}$$

При $\Delta t \to 0$ перейдем к пределам и получим:

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{[P_0(t+\Delta t)-P_0]}{\Delta t} = -P_0\lambda + P_1\nu,$$

а отсюда получаем дифференциальное уравнение для состояния S_0:

$$\frac{\Delta P_0}{\Delta t} = -\lambda P_0 + \nu P_1. \tag{3.69}$$

Аналогичным образом получим уравнение для состояния S_1:

$$\frac{dP_1}{dt} = -\nu P_1 + \lambda P_0. \tag{3.70}$$

Решая уравнение (3.70) для начальных условий $P_0(0) = 0$ и $P_1(t) = 1$ получаем, что относительное число режущих зерен q в контактной зоне шлифования будет:

$$q = P_0 = \frac{\nu}{\nu+\lambda}, \tag{3.71}$$

а абсолютное число режущих зерен n_p определится по следующей формуле:

$$n_p = n_{l_p}\cdot q. \tag{3.72}$$

На рис. 3.13 приведены результаты расчетов числа зерен на рабочей поверхности шлифовальных кругов разных характеристик (рис. 3.13, *а*) и режущих зерен в контактной зоне шлифования при использовании этих же инструментов (рис. 3.13, *б*). Определение числа зерен производилось во всех случаях в окружном направлении при постоянной скорости вращения круга и подаче. При этом изменяли глубину резания и диаметр шлифовального круга.

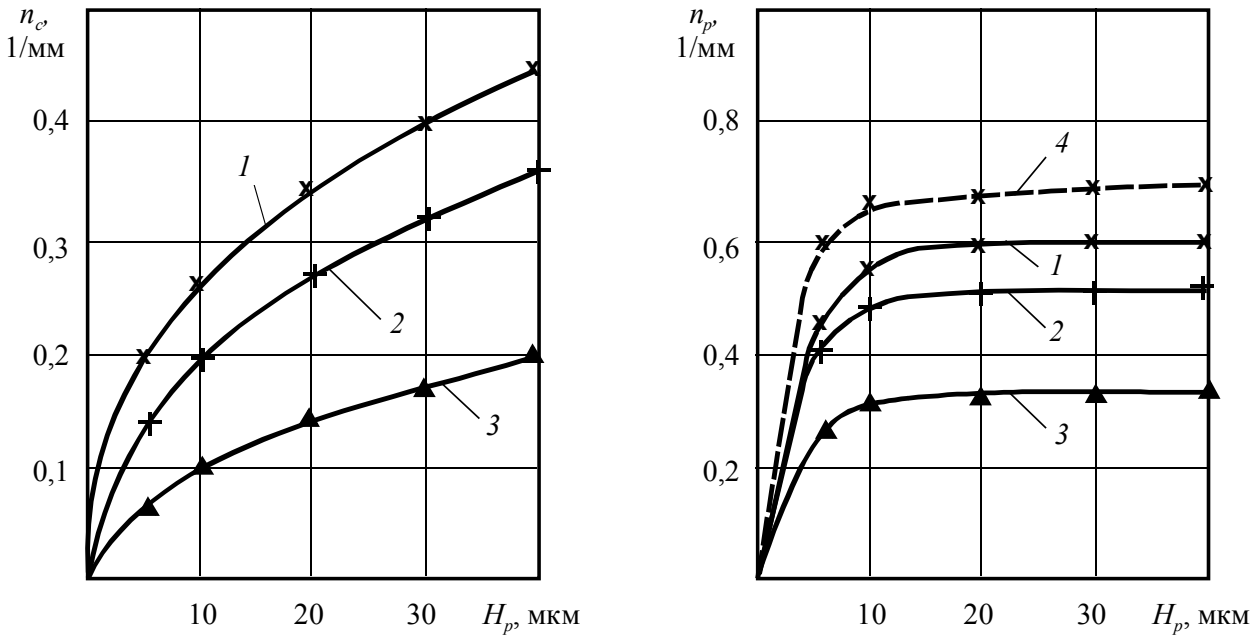


Рис. 3.13. Зависимость числа абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента (*а*) и режущих зерен в контактной зоне шлифования (*б*) от глубины H_p: *1* – 24AF60K8V; *2* – 24AF60K11V; *3* – 24AF60K15V ($D_к$ = 250 мм, $V_к$ = 30 м/с, V_g = 18 м/мин); *4* – 24AF60 K8V ($D_к$ = 100 мм, $V_к$ = 30 м/с, V_g = 18 м/мин)

Из графиков видно, что общее число зерен на рабочей поверхности инструмента возрастает от радиальной глубины проникновения в круг, а число режущих зерен после достижения некоторой глубины, равной 10 – 20 мкм, не возрастает и остается практически постоянным. Эти данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами ряда исследователей [18, 55, 82, 87, 103] для абразивных инструментов аналогичных характеристик и условий шлифования.

Данные расчетов и экспериментов показывают, что число режущих зерен в контактной зоне шлифования может изменяться в широком диапазоне и зависит не только от характеристик абразивного инструмента, но и от кинематических условий шлифования.

3.5. Выводы

1. В результате теоретических исследований установлено существенное влияние на плотность упаковок и координацию зерен в формовочных заготовках инструмента оказывает распределение их по размерам и объемам содержания. Получена зависимость плотности упаковок зерен и координационного числа от характеристик инструмента и возможного количества зернистостей или фракций зернового состава абразивных материалов в формовочных смесях. Определена величина оптимальной плотности упаковки зерен, дающая возможность прогнозировать максимальную прочность инструмента при различных степенях твердости и номерах структуры.

2. На основании теоретико-экспериментальных результатов исследования установлен закон распределения пор по размерам, составлено уравнение, отображающее степенную связь между пористостью инструмента и его основными характеристиками, выведена расчетная зависимость для определения размера пор от зернистости и пористости инструмента с учетом его твердости и структуры.

3. Разработана математическая модель рельефа рабочей поверхности инструмента, позволяющая определять взаимосвязь объемно-размерных характеристик строения черепка с параметрами его рабочего слоя поверхности при помощи введения нового понятия «граничной высоты» профиля, на которой происходят основные изменения при переходе матрицы инструмента в рабочую поверхность. Установлены функциональные зависимости для определения среднего расстояния между зернами на любом уровне профиля, опорную длину профиля, размеры поверхностной поры, разновысотность зе-

рен, статическое количество зерен, приходящихся на единицу длины рабочей поверхности.

4. Определена зависимость предельной величины «граничной высоты» профиля от прочностных характеристик АИ, геометрических параметров режущего элемента правящего инструмента, размера абразивного зерна и условий правки. Введение в качестве аргумента относительного значения высоты профиля к граничной высоте позволило проводить сравнительный анализ параметров профилограмм рабочих поверхностей инструментов с различными зернистостями, структурами и твердостями.

5. Рассматривая процесс шлифования как систему массового обслуживания с отказами, состоящей из следующих подсистем: рабочей поверхности инструмента, процесса резания и поверхности обрабатываемой детали, были получены аналитические зависимости для расчета числа режущих зерен в контактной зоне шлифования.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИКА СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕТОВ

4.1. Теоретико-экспериментальные исследования по созданию высокоэффективных инструментов

4.1.1. Совершенствование инструментов с помощью мелкодисперсного абразивного наполнителя

При изготовлении АИ повышенной твердости и прочности таких как, например «шарошки», шарошлифовальные круги, высокоскоростные круги и т.п., искусственно составляют абразивную смесь с заданным распределением фракций их зернового состава, смешав в определенной пропорции несколько имеющихся зернистостей. Кроме того, создание таких смесей нередко требуется и для повышения прочности инструментов низкой твердости от F(ВМ) до J(М3), при открытых и высокопористых структурах [26, 67, 172, 200, 222, 223, 225, 244, 252, 277, 323, 329].

Одним из основных направлений технического и технологического обеспечения направленного совершенствования АИ является модернизация их зерновых составов. На основе теоретических и экспериментальных исследований в данной работе разработан ряд способов и технических решений улучшения характеристик АИ путем изменения зерновых составов абразивных материалов [27, 28, 140, 222, 223, 225].

Модернизация зерновых составов (рис. 4.1) возможна за счет нормированного введения в формовочную массу мелкодисперсного или порообразующего абразивного наполнителя, составления зерновых составов из смесей абразивных материалов разных номеров зернистостей или видов и использования зерен абразива, классифицированных по форме. К основным регулирующим эффектам от изменения зерновых составов относятся: упрочняющие черепок инструмента; образующие дополнительную закрытую пористость и

способствующие самозатачиваемости рабочей поверхности инструмента. Область применения формовочных смесей с модернизированными зерновыми составами достаточна широка: от изготовления инструментов с высокой твердостью и прочностью до изготовления высокопористых инструментов с высокой структурой и малой твердостью.



Рис. 4.1. Обобщенная схема способов модернизации зерновых составов

При решении поставленной задачи первоначально, исходя из технологических соображений, условий и режимов шлифования, выбирают номер зернистости проектируемого инструмента, который принимают за первоначальную основу по размеру зерна. Затем определяется градация зернисто стей, при которой каждый следующий номер зернистости в одно и то же число раз меньше предыдущего.

Выбор градации зернистостей зависит от поставленных целей при создании абразивных смесей. Например, при проектировании смеси с целью получения максимальной ее плотности можно рекомендовать, чтобы промежу-

точные и мелкие зернистости к основной зернистости были в 2,5 и 5,0 раз меньше соответственно. В этом случае зерна основной зернистости образуют своеобразный скелет, пустоты которого заполняются зернами промежуточной зернистости. Новые пустоты могут заполняться еще более мелкими зернами и т.д. Однако, как показано в работе [33] на примере зернистых оксидных порошков, излишне высокодисперсный материал при заполнении пор скелета упаковывается в них менее плотно. Это несколько снижает общую упаковку, вызывает дополнительную внутреннюю трещиноватость и ведет к понижению прочности при последующем обжиге изделия.

В связи с этим, при составлении рецептуры формовочных смесей из шлифзерен разных номеров зернистостей необходимо, в первую очередь, определить оптимальное соотношение количества и крупности входящих компонентов при условии получения изделий с наибольшей механической прочностью. Данная задача решалась теоретико-экспериментальными методами.

В настоящее время известны как графические способы составления смесей с заданными соотношениями между всеми фракциями зернового состава [73, 325, 329], так и аналитические методы определения оптимального содержания разных фракций в смеси [33, 115, 247, 322]. При использовании графических способов необходимо иметь гранулометрические кривые зернового состава, которые в каждом конкретном случае должны определяться экспериментально. При этом, если смешиваются три и более компонентов, нужно предварительно задаться некоторым соотношением n_1 для двух из них, а затем процедуру повторяют для получения смеси из трех и более компонентов. Если значение n_1 было выбрано неудачно, построение графика состава смеси приходится повторять при другом значении n_2 и т.д. Все это вызывает определенные трудности в использовании графических способов проектирования абразивных смесей.

Одной из первых работ по аналитическому определению оптимального количественного соотношения компонентов смеси из двух фракций зерен является работа [304], в которой теоретически показано и экспериментально

подтверждено, что такое соотношение зависит от размеров зерен в соответствии с уравнением:

$$\frac{b}{a} = \frac{\gamma}{\gamma_1} S\left(\frac{W_1}{S_1} - K\frac{r}{R}\right), \qquad (4.1)$$

где b и a – оптимальное содержание мелкой и крупной фракций, %; γ и γ_1 – плотность материала мелкой и крупной фракций; S и S_1 – относительная плотность упаковки мелкой и крупной фракций в отдельности ($S_1 = 1 - W_1$); W_1 – относительный объем пустот (пористость) отдельно взятой мелкой фракции; K – экспериментально определяемая константа ($K = 1{,}06$ [36]); r и R – радиусы зерен мелкой и крупной фракций.

Из уравнения (4.1) следует, что с уменьшением радиуса зерен мелкой фракции при R = const относительное содержание мелкой фракции в оптимальной смеси растет. При малых значениях $r/R \le 0{,}1$, $\gamma = \gamma_1$ и $S_1 = S = 0{,}6$ положение оптимума соответствует содержанию примерно 30 % мелкой фракции и 70 % крупной, что подтверждается и экспериментальными данными. Для трехфракционных керамических огнеупоров в работе [236] даются рекомендации по оптимальному составу, который должен содержать 60 – 65 % крупной фракции (зернистости), 25 – 30 % средней (промежуточной) и около 10 % мелкой.

Для получения максимальной плотности двухфракционной смеси в работе [129] приведены условия смешиваемости объемов частиц разных размеров в виде следующего выражения:

$$V_{\text{п}} + 0{,}65V_2 + 0{,}65V_1 = \frac{\pi}{6} N_{П} \cdot d_{\text{п}}^3 \cdot 1{,}64, \qquad (4.2)$$

где $V_{\text{п}}$, V_1 и V_2 – объемы пор, первой и второй фракций соответственно; $d_{\text{п}}$ – диаметр псевдофсер; $N_{П}$ – количество псевдосфер.

В этой работе приводится формула для определения минимальной пористости бифракционного материала, выведенная из условия (4.2):

$$n_{\min} = 0{,}35\frac{K_v}{0{,}65 + K_v}, \qquad (4.3)$$

где $K_v = \frac{V_2}{V_1}$ – соотношение объемов первой и второй фракций.

При определении коэффициента заполнения смеси $K_{\text{уп}}^{\text{см}}$, состоящий из крупной и мелкой фракций частиц, предлагается использовать следующую формулу:

$$K_{\text{уп}}^{\text{см}} = K_{\text{уп}}^{\text{м}} + \left(1 + K_{\text{уп}}^{\text{к}}\right)K_{\text{уп}}^{\text{м}}, \qquad (4.4)$$

где $K_{\text{уп}}^{\text{к}}$ и $K_{\text{уп}}^{\text{м}}$ – собственные коэффициенты упаковки крупной и мелкой фракций смеси соответственно.

Анализ уравнений (4.2), (4.3) и (4.4) показывает, что оптимальное количественное соотношение двухкомпонентной порошковой смеси зависит, в первую очередь, от объемов и размеров смешиваемых частиц.

При расчете полифракционных составов керамических порошков используются уравнения, определяющие рациональные зависимости количественного выхода фракций от назначенного размера частиц. Одним из вариантов закона оптимального зернового распределения является известное уравнение Андреасена-Фуллера [236, 280]:

$$X_i = \left(\frac{d_i}{D_з}\right)^n \cdot 100\%, \qquad (4.5)$$

где X_i – суммарный выход фракций, размер которых менее d_i, %; d_i – размер заданной фракции; $D_з$ – максимальный размер частиц (зерна) в данной смеси; n – показатель степени, зависящий от формы частиц, градации фракций, условий смешивания и уплотнения и др. (n = 0,3 ÷ 0,5).

В работе [327] показано, что оптимальные значения показателя степени n, полученные на порошках ряда огнеупорных материалов, составляют 0,33 – 0,40. Указывается, что в ряде случаев достаточно, чтобы кривая распределения, не имея обязательного вида степенной функции, лежала внутри области между кривыми соответствующими n = 0,3 и n = 0,5 (рис. 4.2). Такие составы во многих случаях можно получить непосредственно в процессе измельчения материалов, что обеспечивает пористость упаковки зерен примерно до 25 %.

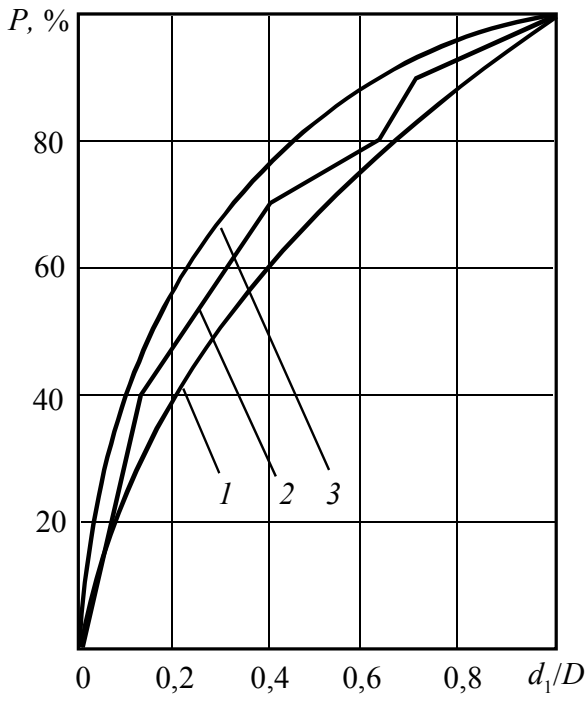


Рис. 4.2. Область высоких значений плотности упаковки по уравнению Андреасена-Фуллера [236]: *1* – нижняя граница, n = 0,5; *2* – верхняя граница, n = 0,3; *3* – произвольный зерновой состав внутри области

В некоторых случаях для улучшения технологических и прочностных свойств крупнозернистых порошковых и абразивных масс полезно дополнительно вводить некоторые количества наиболее мелкой фракции. Для подобных зерновых составов в исследовании [231] было применено уравнение Боломея:

$$X_i = \left[\alpha_M + (1 - \alpha_M) \left(\frac{d_1}{D} \right)^n \right] \cdot 100\%, \qquad (4.6)$$

где α – содержание (доля) наиболее мелкой фракции.

Если $\alpha_M = 0$, то выражение сводится к выражению (4.5). При значительных величинах α_M составы порошков фактически занимают среднее положение между типичными двухфракционными и полифракционными.

Следует отметить, что представленные выше исследования по выявлению закономерностей заполнения объемов порошковыми материалами и определению оптимальных смесей проводились, как правило, с двухкомпонентными смесями частиц или зерен узкофракционного состава. В то время

как зерновой состав абразивных материалов любой зернистости представляет собой полифракционный, непрерывный состав. Кроме того, оптимизировался не сам состав смеси, а определялся лишь объем наполнителя с заданными размерами частиц для обеспечения устойчивого каркаса изделия. При этом размеры частиц наполнителей назначались, а не определялись аналитическим путем.

В практике создания и совершенствования АИ, как было показано выше, имеется множество предложений, разработок и рекомендаций по модернизации зерновых составов формовочных смесей путем введения в них мелкодисперсных частиц наполнителей или смешивания абразивных материалов разных зернистостей.

В теоретическом плане эти вопросы затрагивались в ряде научных работ. Так, в работе [26] при рассмотрении условий обеспечения максимальной плотности упаковки, равномерности распределения компонентов АИ и его высокой механической прочности расчетным путем было показано, что содержание абразивных зерен основного размера должно быть 78,8 % по объему, а часть оставшегося объема желательно занимать наполнителем, имеющим абразивные частицы (зерна) размером, равным 22,3 % от диаметра основного зерна. Объем всей суммы зерен наполнителя рекомендуется определять по следующей формуле:

$$\sum V_2 = \frac{\pi}{6} d_2^3 \cdot n_2 = 0{,}0058 d_1^3 \left(\sqrt[3]{n_1} - 3\right)^3, \qquad (4.7)$$

где n_1 – количество основных зерен абразива; n_2 – количество зерен наполнителя.

Результаты исследований [172] позволили создать математическую модель поведения бинарной дисперсной системы «абразивное зерно – частицы наполнителя». За факторы модели приняты соотношения объемов абразивных зерен $V_з$ и наполнителя $V_н$ и соотношение средневероятных размеров абразивных зерен $d_з$ и частиц наполнителя $d_н$. Исследуемый параметр – коэффициент заполнения объема смеси составляющими ее компонентами $K_{см}$.

Изменение этого параметра было аппроксимировано тригонометрическим полиномом вида:

$$K_{\text{см}} = 0{,}5 + 0{,}054(0{,}92 + V) + 0{,}02(1 + \cos(163 \cdot V) + \\ + 0{,}07(1 + \cos(1 - d)) \cdot \cos(55 \cdot V), \tag{4.8}$$

где $V = \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{з}}}$ и $d = \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{з}}}$.

На базе данной формулы была построена номограмма (рис. 1.4) и разработана программа для определения минимально необходимого объемного содержания наполнителя $K_{\text{н}}$ при заданном объемном содержании в инструменте абразивного зерна $K_{\text{з}}$. По номограмме можно определить объемную долю материала наполнителя $K_{\text{н}}$ при известном соотношении $d_{\text{н}}$ / $d_{\text{з}}$, достаточную для обеспечения устойчивого каркаса из зерен.

Общим недостатком известных работ по теоретическому исследованию технологических процессов модернизации АИ является отсутствие адекватных математических моделей влияния размера частиц наполнителей и их содержания в формовочных смесях на прочностные свойства черепка инструмента. Кроме того, при определении расчетным путем размеров частиц наполнителей и их объемного содержания не учитываются такие факторы как вид, форма и зерновой состав абразивного материала, степень твердости и номер структуры модернизируемого инструмента. Все это затрудняет производить выбор рациональных размеров частиц и оптимального содержания наполнителя в формовочных смесях для изготовления инструментов с регламентированными структурно-механическими характеристиками.

В данной работе при исследовании влияния размера частиц абразивного наполнителя и его содержания в формовочной смеси на прочностные свойства образцов инструмента 25AF46K10V использовалось планирование эксперимента с применением центрального композиционного ортогонального плана. Для проведения эксперимента был выбран двухфакторный план 3х3, где три уровня размера частиц наполнителя x_1 (60, 80, 100 мкм) и три уровня содержания частиц x_2 (12, 16, 20%). Матрица плана и результаты из-

мерений предела прочности образцов $y = \sigma_р$ МПа приведена в табл. 4.1. Ошибка воспроизводимости опытов составила $S = 0{,}381$ МПа, что составляет около 8 % от средних значений параметра оптимизации – предела прочности на разрыв образцов инструмента.

Таблица 4.1

Матрица плана и результаты эксперимента

№ опыта	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	$У_{эксп}$	$У_{расч}$
1	–	–	+	+	+	9,8	9,3
2	–	0	0	+	0	13,3	12,7
3	–	+	_	+	+	9,4	9,7
4	0	–	0	0	+	4,9	4,7
5	0	0	0	0	0	8,0	8,5
6	0	+	0	0	+	6,7	5,9
7	+	–	–	+	+	5,0	4,7
8	+	0	0	+	0	8,7	8,9
9	+	+	+	+	+	6,4	6,7

После обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов полинома была получена адекватная модель:

$$y = 8{,}5 - 1{,}9x_1 + 0{,}6x_2 + 0{,}4x_1x_2 + 2{,}3x_1^2 - 3{,}2x_2^2 . \qquad (4.9)$$

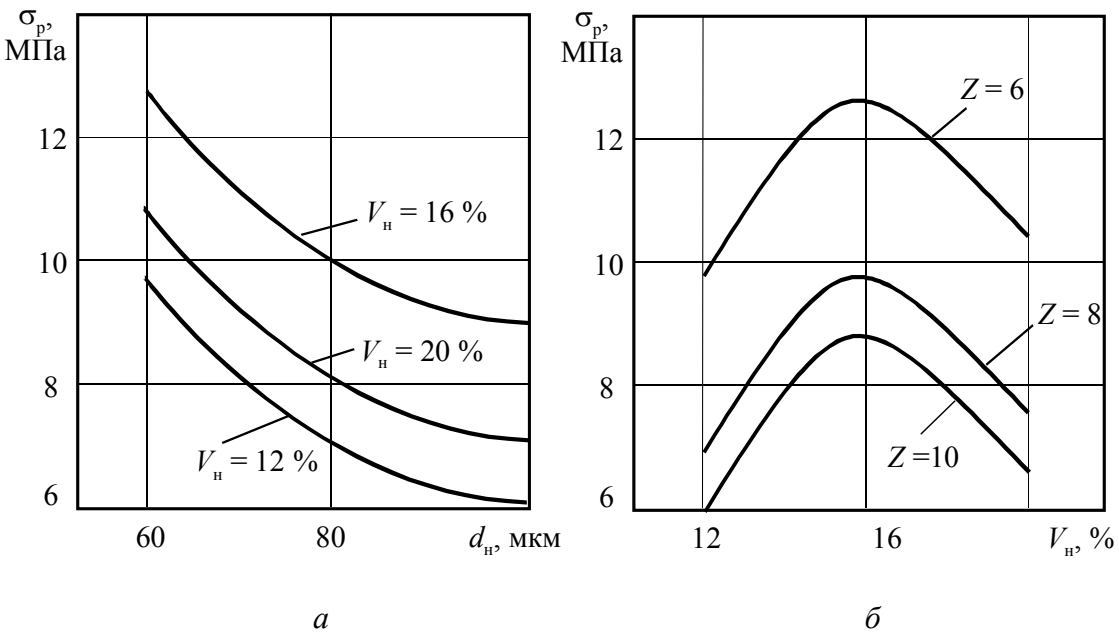
Из этого уравнения видно, что размер частиц наполнителя (x_1) оказывает большее влияние на прочность $\sigma_р$, чем содержание наполнителя (x_2). Однако, если по мере увеличения размера частиц предел прочности пропорционально уменьшается, то зависимость $\sigma_р$ от содержания наполнителя выражается параболой вида:

$$y = 12{,}7 + 0{,}2x_2 - 3{,}2x_2^2 \qquad (4.10)$$

при $x_1 = -1$ с точки перегиба $x_2 = 0(16\%)$, в которой $y = \sigma_р = 12{,}7$ МПа. Такую зависимость прочности образцов от содержания частиц наполнителя можно объяснить следующим образом. При недостаточном содержании наполнителя эффект «армирования» частицами черепка инструмента проявляется не в

полной мере. При избытке наполнителя в формовочной смеси происходит раздвижка абразивных зерен друг от друга, что ослабляет их связи и уменьшается прочность черепка инструмента.

Результаты исследований влияния размера частиц наполнителя и их содержания в формовочных смесях на изменения прочности образцов инструментов представлены на рис. 4.3.



а *б*

Рис. 4.3. Зависимости предела прочности $\sigma_р$ образцов от размера частиц наполнителя (*а*) и их объемного содержания (*б*)

Как видно из полученных зависимостей, с увеличением размера частиц наполнителя прочность на разрыв $\sigma_р$ образцов инструментов уменьшается. Эти результаты подтверждают ранее сделанные выводы о существенном влиянии дисперсности одного из компонентов дисперсной системы на характер ее структурообразования, координацию зерен и частиц и на плотность их упаковки в черепке инструмента.

Полученные экспериментальные данные (рис. 4.3) показывают, что изменяя только размер частиц наполнителя можно в достаточно широких пределах от 25 до 60 % изменять прочность инструмента по сравнению со стандартным. Однако следует отметить, что при чрезмерном уменьшении размера частиц наполнителя начинает действовать процесс их комкования и агре-

гатирования. Это будет нарушать равномерное распределение мелкодисперсных частиц наполнителя по объему формовочной смеси, что приведет к снижению эффекта упрочнения инструмента. В связи с этим, возникает необходимость в проведении исследований по определению рациональных значений размера частиц наполнителей для каждого конкретного случая с учетом зернистости, степени твердости и номера структуры АИ и некоторых других факторов. Кроме того, при выборе зернистости мелкодисперсного наполнителя, в первую очередь, следует исходить из того, что частицы наполнителя должны свободно размещаться в межзерновом пространстве, не раздвигая зерна основной фракции абразивного материала.

Для определения возможного размера частиц наполнителя и выбора рационального соотношения размеров абразивного зерна и частиц мелкодисперсного наполнителя использовалась физическая пространственная модель, разработанная в работе [200]. В качестве исходных данных брались параметры распределения и формы зерен и частиц наполнителя с учетом твердости и структуры инструмента. Количество частиц наполнителя с учетом тетраэдрической укладки принималось равным удвоенному количеству зерен основной фракции. Моделирование производилось с помощью системы компьютерной математики MathCAD.

В табл. 4.2 сведены результаты моделирования по изысканию геометрических параметров вписанной окружности между зернами и рациональной зернистости частиц наполнителя.

Таблица 4.2

Геометрические параметры межзернового пространства
и зернистость частиц наполнителя

Зернистость абразивного зерна	F100	F80	F60	F46	F35	F30	F24	F20
Диаметр вписанной окружности, мкм	48	64	100	160	200	252	320	400
Рекомендуемая зернистость частиц наполнителя	M28	M40	F220	F150	F120	F100	F80	F70

Анализ данных табл. 4.2 показывает, что диаметр вписанной окружности в 2,5 раза меньше размера зерна и на одну частицу наполнителя будет приходиться по два зерна основной фракции. Это будет способствовать образованию дополнительных контактов как между «зерно – зерно», так и между «зерно – частица наполнителя».

На рис. 4.4 представлены результаты цифрового эксперимента на модели по определению зависимости размера частиц наполнителя от плотности заполнения ρ зерном черепка инструмента и формы зерна, характеризуемой коэффициентом $K_ф$ [123].

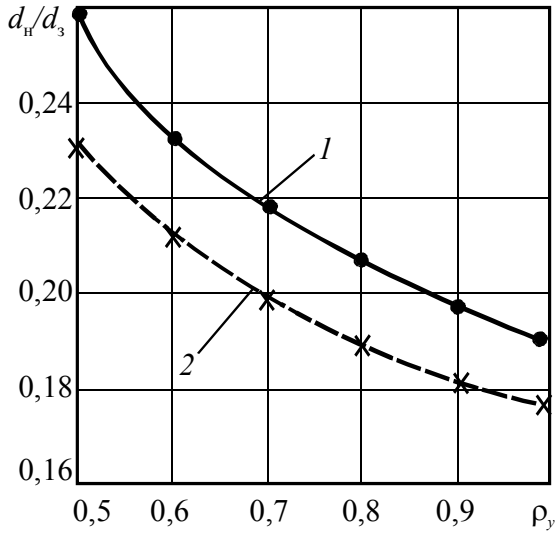


Рис. 4.4. Зависимость размера частиц наполнителя $d_н$, отнесенного к размеру зерна $d_з$ от плотности упаковки зерна в черепке инструмента: *1* – упаковка зерен с $K_ф$ = 1,7; *2* – упаковка зерен с $K_ф$ = 1,4

Анализ полученных зависимостей показывает, что при повышении плотности заполнения зерном черепка при постоянном значении $d_з$ размер частиц наполнителя $d_н$ уменьшается. Уменьшение размера частиц происходит и при увеличении коэффициента формы зерна $K_ф$. Это свидетельствует о том, что в каждом конкретном случае необходимо определять рациональный размер частиц наполнителя.

Используя результаты выше проведенных теоретико-экспериментальных и модельных исследований (рис. 4.4), была установлена расчетная мо-

дель для определения максимально возможного размера частиц мелкодисперсного наполнителя в следующем виде:

$$d_{\text{н}_\text{м}} \le 0{,}523 \cdot d_{\text{з}} \sqrt[3]{0{,}015\left(\frac{\pi}{2}+\frac{1}{\rho_y^2}\right)\cdot K_{\text{ф}}}. \qquad (4.11)$$

При этом плотность заполнения зерном черепка инструмента ρ_y определяется через твердость и структуру инструмента по формуле (3.12), тогда

$$d_{\text{н}_\text{м}} \le 0{,}129 \cdot d_{\text{з}} \sqrt[3]{\left[\frac{\pi}{2}+\left(\frac{49+1{,}5N}{62-2\text{C}}\right)^2\right]\cdot K_{\text{ф}}}. \qquad (4.12)$$

Максимально возможный размер частиц мелкодисперсного наполнителя обусловлен, в первую очередь, размерами пустот между основными зернами абразива. Если размер частиц наполнителя окажется больше, чем размеры пустот, то произойдет раздвижение абразивных зерен. В результате этого пустотность (пористость) черепка инструмента увеличится, а число контактов между зернами уменьшится, что приведет к уменьшению и эффекта упрочнения. С другой стороны, если размер частиц наполнителя будет значительно меньше, чем размер пустот, но объемное содержание частиц будет не достаточным, то не будет проявляться эффект заклинивания и армирования зерен и связки. Это также не приведет к повышению прочности черепка инструмента. Таким образом, наряду с определением рациональных размеров частиц наполнителя требуется определение и их оптимального объемного содержания в формовочной смеси.

В технологии и производстве АИ, как было показано выше, регламентированная плотность формовочных смесей играет важнейшую роль, так как во многом определяет, в конечном счете, качество и эффективность процесса шлифования. Многочисленные экспериментальные данные [26, 36, 52, 97, 184, 193, 200, 231, 234] по исследованию плотности упаковки порошковых керамических и абразивных материалов после смешивания и уплотнения путем утряски показывает, что значение плотности колеблется от 50 % до 58 %.

Такая плотность характерна для кубической укладки частиц шаровидной формы, имеющей плотность структуры, равной 52,4 %, а пустотность – 47,6 %. В связи с этим принимаем, что содержание пор в формовочной смеси перед вводом в нее частиц мелкодисперсного наполнителя будет составлять 0,476 частей от общего объема смеси.

Исходя из теории и практики упаковки частиц (зерен) шарообразной формы и учитывая условие смешиваемости объемов абразивного зерна и частиц наполнителя, а также зернистость Z, коэффициент формы зерна $K_{ф}$, зерновой состав через содержание основной фракции $O_{ф}$, шифр номера твердости N и номер структуры C инструмента и коэффициент вида зерна $K_{вз}$, была получена расчетная модель для определения оптимального содержания частиц наполнителя $V_{нм}$ в массовых частях в следующем виде:

$$V_{нм} = \frac{\pi}{3}\left(0{,}476 - \frac{1}{1{,}1 + \sqrt[3]{K_d}}\right) Z^{-\alpha} \cdot K_{ф}^{\beta} \cdot O_{ф}^{\gamma} \cdot N^{\varphi}(C+1)^{\psi} \cdot K_{вз}, \qquad (4.13)$$

где K_d – соотношение между размерами зерен $d_з$ и частицами наполнителя $d_н$, $\left(K_d = \frac{d_з}{d_н}\right)$; α= 0,08; β = 0,11; γ = 0,50; φ = 0,19 + 0,02 N; ψ = 1,21; $K_{вз}$ = 1,0 (24А, 25А); $K_{вз}$ = 0,96 (14А, 15А); $K_{вз}$ = 1,22 (63С, 64С); $K_{вз}$ = 1,26 (53С, 54С).

Расчет зернового состава формовочной смеси с мелкодисперсным наполнителем для рецептуры по изготовлению высокопористых шлифовальных кругов производился по формулам (4.12) и (4.13).

В табл. 4.3 представлена рецептура Волжского абразивного завода (ВАЗ) и разработанная и рекомендуемая автором рецептура для высокопористых кругов. Разработанная рецептура отличается от заводской значениями массовых частей зерна и наполнителя.

Так, по стандартной рецептуре независимо от твердости инструментов содержание наполнителя в формовочной смеси составляет 20 массовых частей, а по рекомендуемой рецептуре содержание наполнителя изменяется от 15 (G) до 35(О) массовых частей и для рассматриваемых твердостей инструмента является оптимальным. Все это будет способствовать, наряду с увели-

чением прочности высокопористых инструментов за счет армирования связки, повышению их эксплуатационных показателей (см. 4.2.1.).

Таблица 4.3

Рецептуры для высокопористых кругов из электрокорундовых материалов зернистости № 50, F36

Наименование компонентов	Заводская				Рекомендуемая			
	G	K	L	O	G	K	L	O
Зерно:	Массовые части				Массовые части			
25A50, F36	80	80	80	80	85	80	77	65
Наполнители:								
25A8, F150	20	20	20	20	15	20	23	35
Порообразователь	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Связка К5, К5С	10,0	14,0	16,5	17,0	5,6	11,0	13,0	14,5
Структура	10	10	10	10	10	10	10	10

4.1.2. Соверешнствование инструментов с помощью прочного и огнеупорного порообразующего наполнителя

Известно, что при структурах выше № 9, особенно для низких степеней твердостей F – J, проблемой является обеспечение достаточной «сырой» прочности заготовок инструментов [26, 193, 196, 201, 213]. Для этих целей используются определенного рода наполнители, которые позволяют за счет частичного и временного заполнения порового пространства структуры повысить прочность, жесткость и целостность заготовки. При введении наполнителей, образующих высокопористую структуру при изготовлении инструмента во время его обжига, в основном решается задача повышения прочности «сырых» заготовок, но не прочности готового инструмента. Как было показано выше, обеспечить необходимую прочность такого высокопористого инструмента можно путем дополнительного введения в формовочную смесь мелкодисперсного абразивного наполнителя. Однако имеются и другие пути повышения прочности таких инструментов и их «сырых» заготовок.

Используя теоретические изыскания [30, 132, 138, 144, 312] и экспериментальные исследования [137, 138, 144, 157, 312] в данной работе разработан и испытан высокопористый инструмент, имеющий сплошные частицы огнеупорного порообразующего наполнителя высокой прочности и одинаковые по форме с абразивными зернами [222, 225]. Кроме того, частицы наполнителя выполнены из адгезионно-инертного абразивного материала к керамическим связкам. Такое техническое и технологическое исполнение высокопористого инструмента позволяет решать сразу три выше поставленные задачи: обеспечивать необходимую и достаточную прочность «сырых» заготовок до и во время их обжига; иметь повышенную прочность черепка инструмента по сравнению с существующими высокопористыми инструментами, изготовленными с помощью выгорающих наполнителей, и обеспечивать регламентированную пористость рабочей поверхности высокопористого инструмента непосредственно в процессе шлифования за счет удаления слабо закрепленных частиц наполнителя при рабочих нагрузках.

При выборе зернистости частиц порообразователя необходимо исходить из условия их равномерного распределения в формовочной смеси и черепке инструмента, а также учитывать структуру и твердость инструмента через объемное содержание абразивного зерна и плотности его упаковки. Анализ результатов теоретических исследований порового пространства и плотности заполнения зерном черепка инструмента показал, что необходимый размер частиц порообразующего наполнителя можно определить по следующей зависимости:

$$d_{\text{нп}} = d_{\text{з}} \sqrt[3]{\left(\frac{1}{V'_{\text{з}}} - \frac{1}{\rho_y} \right) \cdot K_{\text{пз}}}, \qquad (4.14)$$

где $V'_{\text{з}}$ – объемное содержание зерна в долях единицы ($V'_{\text{з}} = 0{,}01\ V_{\text{з}}$);

$K_{\text{пз}}$ – коэффициент, характеризующий соотношение количества зерен и количества пор ($K_{\text{пз}} = 1 \div 4$ [26]).

При этом содержание зерна $V_з$ определяется по формуле (3.11), а плотность заполнения ρ – по выражению 3.12). Как показывают расчеты по формуле (4.14), для высокопористых инструментов низкой твердости F – J размер наполнителя

$$d_{нп} = (1{,}2 \div 1{,}7) d_з.$$

Исходя из наличия оптимальной плотности заполнения зерном шлифующей части черепка инструмента [154], при которой наблюдаются максимально возможные его прочность и показатели работы [26, 88, 203], и с учетом зон допустимого и взаимного варьирования оптимальными характеристиками инструмента получена зависимость для определения регламентированного объемного содержания порообразующего наполнителя в процентах

$$V'_{нп} = \frac{1}{3\pi}\left[\frac{(1-\rho_y)\rho_y}{V'_з} + \left(1 - \sum V_{пв}\right)\right] \cdot Z^{-0{,}12} \cdot K_{вз}^{-1} \cdot 100\%, \qquad (4.15)$$

где $\sum V_{пв}$ – суммарный объем пор в проектируемом высокопористом инструменте в долях единицы $\left(\sum V_{пв} = 0{,}5 \div 0{,}7[26]\right)$; $K_{вз}$ – коэффициент, характеризующий вид абразивного материала (электрокорунд – $K_{вз}$ = 1,0; карбид кремния $K_{вз} = 2 \div 3$).

При разработке рецептуры формовочных смесей необходимо рассчитывать массовое (весовое) содержание частиц наполнителя на 100 вес. ч. абразивного зерна. Для этих целей производится перевод объемных процентов наполнителя и основного зерна в массовые по следующей формуле:

$$V_{нп} = \frac{V'_{нп} \cdot \gamma_2 \cdot 100}{(V_з - V'_{нп})\gamma_1}, \text{ вес. ч.,} \qquad (4.16)$$

где γ_1 и γ_2 – удельные веса абразивного зерна и частиц наполнителя соответственно.

Для проверки выводов теоретического анализа (2.62) и эпюр напряжений (рис. 2.10) о возможности повышения прочностных свойств черепка инструмента за счет использования в качестве наполнителя прочных и огнеупорных частиц или зерен были проведены экспериментальные исследова-

ния, результаты которых представлены на рис. 4.5. Для сравнительных испытаний изготавливались образцы высокопористых инструментов 25AF60J10V с использованием разных наполнителей: фруктовых косточек КФ40; перлита П40; частиц карбида кремния КК32(54С32).

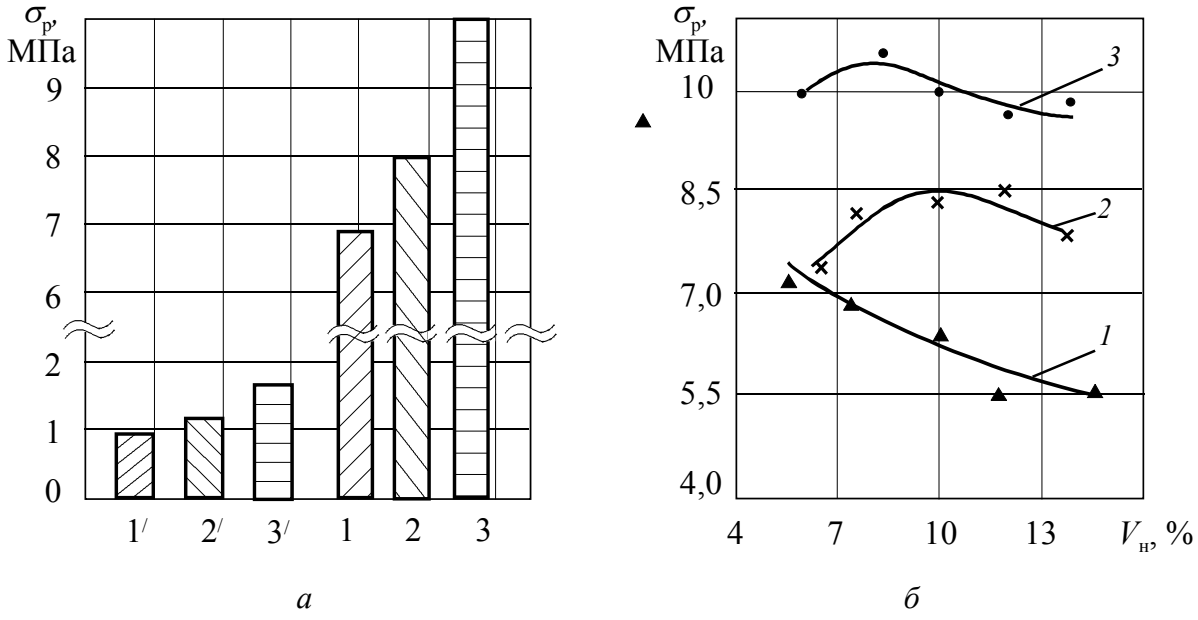


Рис. 4.5. Результаты испытаний (*а*) на прочность «сырых» заготовок (*1′*, *2′*, *3′*) для кругов 25AF60J10V и после их обжига (1, 2, 3) и зависимость (*б*) прочности образцов от объемного содержания наполнителей: *1* – выгорающего из фруктовых косточек КФ40; *2* – огнеупорного, перлит П40; *3* – огнеупорного, карбид кремния КК32

Как видно из рис. 4.5, *а*, прочность «сырых» заготовок повышается, особенно при введении в формовочную смесь прочных частиц карбида кремния КК32. При этом прочность образцов повышается в 1,8 – 2,0 раза по сравнению с образцами, где в качестве наполнителя были частицы из фруктовых косточек КФ40. Введение частиц перлита повышает прочность только в 1,2 – 1,3 раза. Значительное повышение прочности образцов с использованием частиц карбида кремния объясняется следующим образом. Частицы фруктовых косточек и перлита имеют прочность на сжатие на порядок ниже, чем зерна карбида кремния и электрокорунда. В связи с этим, во время смешивания и уплотнения (прессования) формовочных смесей в заготовках с частицами из перлита и фруктовых косточек происходит частичное их истирание и

разрушение, что приводит к ослаблению структурных связей между компонентами заготовки. Кроме того, имеются и другие различия, например, фруктовые косточки, плохо смачиваются водой, отличаются наполнители друг от друга и упругопластическими свойствами.

После обжига исследуемых образцов сохраняется тенденция к повышению прочности высокопористых инструментов с порообразующими огнеупорными наполнителями. В данном случае инструмент с частицами карбида кремния КК32 (54С32) имеет прочность в 1,45 раза больше, чем прочность инструмента с выгорающим наполнителем КФ40. Инструмент с наполнителем из перлита П40 прочнее инструмента с наполнителем КФ40 в 1,16 раза.

Представленные выше результаты экспериментальных исследований (рис. 4.5, *а*) свидетельствуют о значительном упрочнении черепка высокопористого инструмента с «закрытой» пористостью за счет использования в качестве порообразователя прочных и не выгорающих при обжиге частиц или зерен наполнителя.

Следует также отметить, что применение частиц огнеупорных наполнителя одинаковой формы и прочности с основными абразивными зернами позволяет получить равномерное перемешивание формовочной массы и однородность строения черепка инструмента. Кроме того, во время обжига заготовок с таким наполнителем не происходит образование дополнительных как открытых, так и закрытых пор в черепке, как в случаях, когда вводятся выгорающие наполнители в виде КФ40 или огнеупорные, но не достаточно прочные частицы перлита П40. В конечном счете, это приводит к повышению прочности предлагаемого высокопористого инструмента по сравнению с аналогами, в которых используются другие виды порообразующих наполнителей.

На рис. 4.5, *б* показаны зависимости прочности образцов высокопористых инструментов от объемного содержания наполнителей. Анализ этих зависимостей показывает, что для огнеупорных наполнителей имеется свое оптимальное содержание, при котором наблюдается максимально возможная

прочность черепка инструмента. В связи с этим, в каждом конкретном случае рекомендуется производить расчет объемного содержания предлагаемого наполнителя по формуле (4.16) с учетом зернистости, структуры и твердости инструмента, а также вида основного абразивного материала.

4.1.3. Совершенствование инструментов с помощью смесей абразивов из различных зернистостей

На ряде отечественных абразивных заводах выпускаются бруски и шлифовальные круги из абразивных материалов разных номеров зернистостей. Однако анализ рецептур этих изделий показал, что формовочные смеси одних и тех же по назначению, твердости и структуре инструментов составлены с различными соотношениями между номерами зернистостей абразивов и их объемными содержаниями. В табл. 4.4 приведены выписки из рецептур Челябинского абразивного завода (ЧАЗ) и Волжского абразивного завода (ВАЗ), а также соотношения между номерами зернистостей абразивных материалов и их содержанием в формовочных смесях из трех зернистостей.

Как видно из представленных данных, при одинаковой крупной зернистости ($Z_к$) смеси номера средней ($Z_с$) и мелкой ($Z_м$) зернистостей могут резко различаться в разных формовочных массах. То же самое наблюдается и по объемному или весовому содержанию абразивов в смеси. Это свидетельствует о том, что, несмотря на необходимость производства инструментов из таких формовочных смесей, выбор номеров зернистостей и их содержание в смеси производится чаще всего произвольно без достаточного обоснования.

Отсутствие до сих пор разработанных и апробированных научно-производственных рекомендаций по составлению оптимальных смесей абразивных материалов из разных зернистостей затрудняет изготовление инструментов с регламентированными структурно-механическими свойствами и повышенными эксплуатационными показателями.

Таблица 4.4

Выписка из заводских рецептур и соотношения между номерами зернистостей и их содержанием в формовочных смесях из трех зернистостей

Завод	ЧАЗ	ВАЗ		
Номера зернистостей	80/50/16	80/40/8	125/50/8	125/100/10
Содержание, % (вес. ч.)	63–29–8	60–25–15	60–25–15	45–45–10
Соотношение $K_{Z_1} = \frac{Z_к}{Z_с}$; $K_{Z_2} = \frac{Z_с}{Z_м}$	$K_{Z_1} = 1{,}6$ $K_{Z_2} = 3{,}1$	$K_{Z_1} = 2{,}0$ $K_{Z_2} = 5{,}0$	$K_{Z_1} = 2{,}5$ $K_{Z_2} = 6{,}25$	$K_{Z_1} = 1{,}25$ $K_{Z_2} = 10{,}0$
Соотношение $K_{V_1} = \frac{V_с}{V_к}$; $K_{V_2} = \frac{V_м}{V_с}$	$K_{V_1} = 0{,}46$ $K_{V_2} = 0{,}28$	$K_{V_1} = 0{,}42$ $K_{V_2} = 0{,}60$	$K_{V_1} = 0{,}42$ $K_{V_2} = 0{,}60$	$K_{V_1} = 1{,}0$ $K_{V_2} = 0{,}22$

Примечание: $Z_к$ и $V_к$; $Z_с$ и $V_с$; $Z_м$ и $V_м$ – номер зернистости и объемное содержание крупной, средней и мелкой зернистости соответственно

Для получения необходимых свойств и показателей инструмента абразивная смесь из разных номеров зернистостей должна быть подобрана так, чтобы обеспечивалась оптимальная плотность упаковки зерен [154]. Под оптимальной понимается такая плотность смеси, при которой зерна разной крупности по размерам располагаются в черепке инструмента с минимальными количеством степеней свободы и обеспечивают достаточную прочность «сырых» заготовок, обжиг без усадочных деформаций и повышенную прочность инструмента после его изготовления. Такую плотность можно достичь путем последовательного и рационального уменьшения размеров зерен и оптимального подбора объемного или весового их содержания. При этом нельзя допускать расслоения смеси при ее перемешивании, а при формовании заготовок инструмента должна обеспечиваться равномерная плотность во всем объеме изделия.

Для обеспечения этих условий наиболее рациональным является составление смесей из абразивных материалов смежных зернистостей через один номер, обеспечивающих равные соотношения зернистостей между собой и равные соотношения между их объемным или весовым содержанием в смеси.

При экспериментальном исследовании решалась задача по установлению количественных соотношений смешивания абразивов выбранных номеров зернистостей для получения смеси с максимально возможным насыпным весом. Объектом исследований были абразивные материалы зернистостью от № 100 до № 10 из белого электрокорунда 25А и карбида кремния зеленого 64С. Смеси готовились из смежных зернистостей через один номер: 100/63/40; 50/32/20 и 25/16/10. Во всех случаях соотношения K_Z между крупной зернистостью $Z_к$ и средней $Z_с$ $\left(K_{Z_1} = \frac{Z_к}{Z_с} \right)$ и средней зернистостью $Z_с$ и мелкой $Z_м$ $\left(K_{Z_2} = \frac{Z_с}{Z_м} \right)$ брались равными 1,6, а между крупной зернистостью и мелкой $K_Z = \frac{Z_к}{Z_м} = 2{,}5$. Объемное (весовое) количество зерен меньшего номера зернистости $V_м$, среднего – $V_с$ и крупного $V_к$ при заданных соотношениях K_v определялось по следующим расчетным формулам:

$$V_к = \frac{100}{1 + K_{V_1} + K_{V_1} \cdot K_{V_2}}; \qquad (4.17)$$

$$V_с = \frac{100 \cdot K_{V_1}}{1 + K_{V_1} + K_{V_1} \cdot K_{V_2}}; \qquad (4.18)$$

$$V_м = \frac{100 \cdot K_{V_1} \cdot K_{V_2}}{1 + K_{V_1} + K_{V_1} \cdot K_{V_2}}, \qquad (4.19)$$

где $K_{V_1} = \frac{V_с}{V_к}$; $K_{V_2} = \frac{V_м}{V_с}$.

Процентное содержание $V_к$, $V_с$ и $V_м$, определенное по формулам (4.17) – (4.19), представлено на рис. 4.6 в графическом виде. По этому графику мож-

но без расчета определять объемное содержание зерен по трем зернистостям в зависимости от задаваемого соотношения между их объемами в смеси.

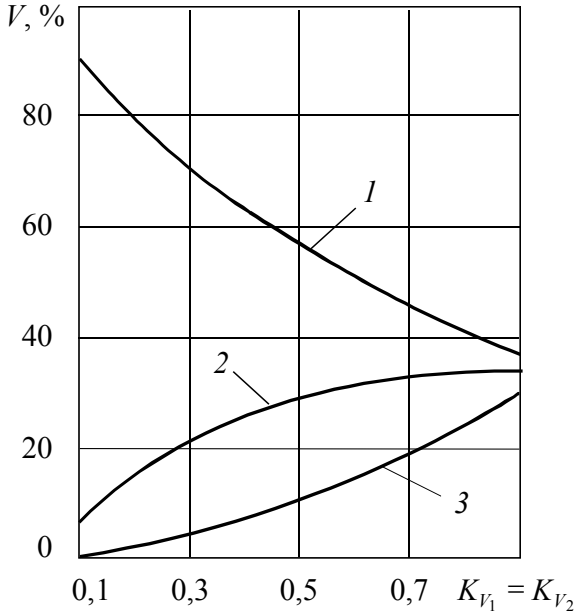
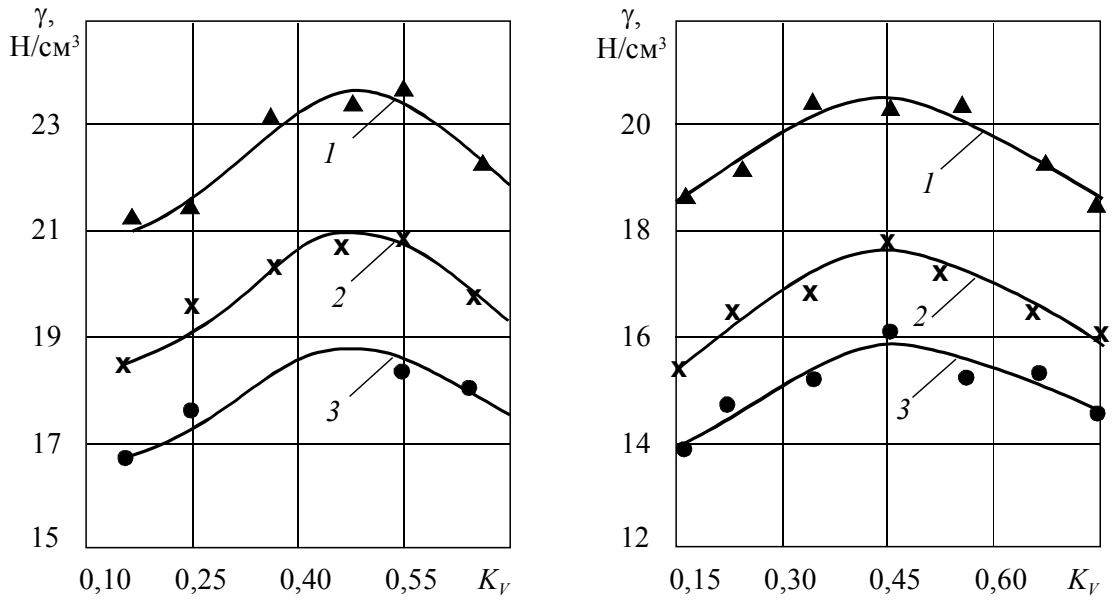


Рис. 4.6. Изменение процентного содержания зерен крупной (*1*), средней (*2*) и мелкой (*3*) зернистостей от соотношения K_V: *1* – $V_к = f(K_V)$; *2* – $V_с = f(K_V)$; *3* – $V_м = f(K_V)$

Для эксперимента соотношения K_{V_1} и K_{V_2} брались равными и изменялись в пределах от 0,1 до 0,7. Затем составлялись смеси из заданных трех зернистостей с интервалом $K_V = 0{,}1$ и по известной методике [193] определяли насыпной вес этих смесей.

На рис. 4.7 представлены полученные зависимости насыпного веса исследуемых смесей от соотношения их объемного содержания. Анализ этих зависимостей показывает, что существует оптимальное соотношение K_V, при котором наблюдается наибольший насыпной вес. Это соотношение как для электрокорунда, так и для карбида кремния, а также для смесей *1*, *2*, *3* равно 0,45 ÷0,02.

Экспериментами установлено, что из абразивных материалов разных номеров зернистостей можно получить трехкомпонентные смеси, насыпной вес которых для электрокорунда на 14 ÷18 %, а для карбида кремния на 16 ÷ 21 % выше, чем у зерен крупной зернистости.



а *б*

Рис. 4.7. Зависимость насыпного веса смеси зерен из трех зернистостей от соотношения их объемного содержания: *а* – белый электрокорунд 25А; *б* – карбид кремния зеленый 64С; *1* – $Z_к = 100$, $Z_с = 63$, $Z_м = 40$; *2* – $Z_к = 50$, $Z_с = 32$, $Z_м = 20$; *3* – $Z_к = 25$, $Z_с = 16$; $Z_м = 10$

Для тех случаев, когда необходимо определить оптимальные соотношения между объемами абразивов $K_{V_1\text{опт}}$ и $K_{V_2\text{опт}}$ при различных заданных соотношениях между их номерами зернистостей в данной работе, используя формулы Андреасена-Фуллера, были получены следующие уравнения:

$$V_к = 100K_{Z_1}^{-0,65}; \tag{4.20}$$

$$V_с = (100 - V_к)\left(1 + \sqrt{K_{Z_2}}\right)^{-0,5}; \tag{4.21}$$

$$V_м = 100 - (V_к + V_с). \tag{4.22}$$

Затем, подставляя эти уравнения в выражения $K_{V_1} = \frac{V_с}{V_к}$ и $K_{V_2} = \frac{V_м}{V_с}$ и проводя соответствующие преобразования, были определены оптимальные соотношения для заданных номеров зернистостей в следующем виде:

$$K_{V_1\text{опт}} = \frac{\sqrt{K_{Z_1}} - 1}{0,85\sqrt{K_{Z_1}}}; \quad K_{V_2\text{опт}} = \frac{\sqrt{K_{Z_1} \cdot K_{Z_2}} - 1}{1,5\sqrt{K_{Z_2}}}. \tag{4.23}$$

Для сравнения, в качестве примера, на рис. 4.8 показано процентное содержание в смесях абразивных материалов крупных $V_к$, средних $V_с$ и мелких $V_м$ зернистостей по заводской рецептуре (табл. 4.5) и рекомендуемых, которые рассчитывались по формулам (4.17), (4.18) и (4.19) с использованием оптимальных соотношений содержания зерен, определяемых по формуле (4.23).

Анализ данных по составу абразивных смесей, представленных на рис. 4.8, показал, что имеются существенные различия в процентном содержании зерен по всем зернистостям. Естественно, это будет влиять и на структурно-механические характеристики и эксплуатационные показатели абразивных инструментов, изготовленных из таких смесей. Ниже представлены результаты испытаний отдельных образцов инструментов, изготовленных из разных абразивных смесей (см. 4.2.3).

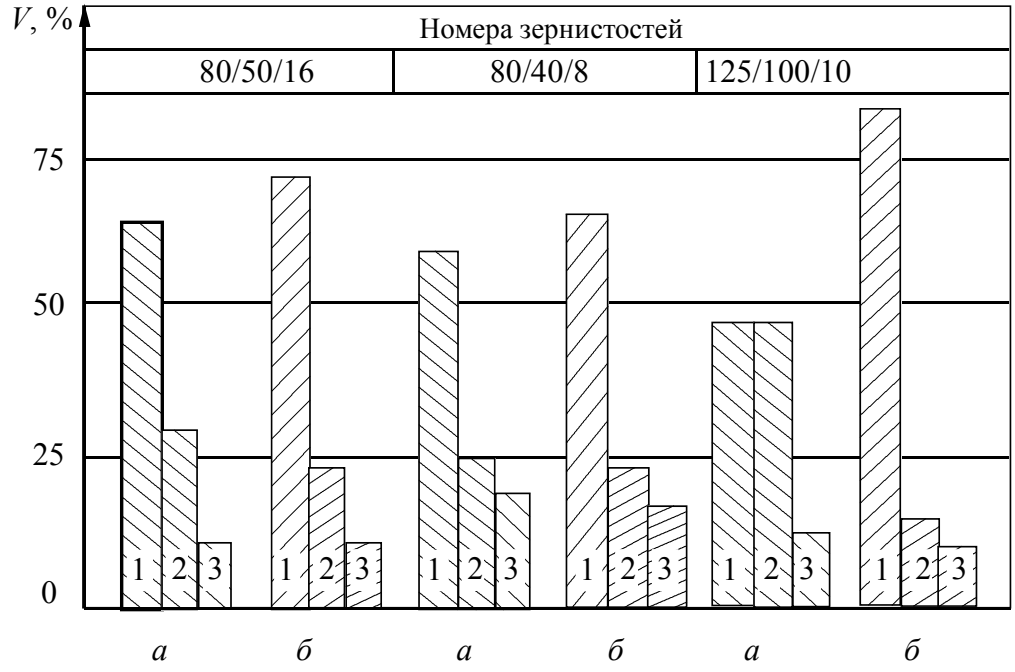


Рис. 4.8. Содержание в смесях зерен крупной (*1*), средней (*2*) и мелкой (*3*) зернистостей по заводской рецептуре (*а*) и рекомендуемой (*б*)

В данной работе на основе теоретических изысканий и экспериментальных исследований разработаны абразивные массы (смеси) [223, 225] с оптимальными соотношениями по зернистости и объемному их содержанию (табл. 4.5). Помимо этого, в рекомендуемых смесях для изготовления обдирочных инструментов используются абразивные зерна, разные по виду и форме.

Таблица 4.5

Варианты абразивных смесей из зерен трех номеров зернистостей и разных по виду и форме

Вид, зернистость и форма зерна	Варианты смесей			
	I	II	III	IV
54С100 F 20	60 %	56,0 %	56,0 %	56,0 %
54С63 F 30	25 %	27,3 %	26,4 %	26,4 %
54С25 F 60	15 %	16,7 %	–	–
25А20 F 70 (стандартное)	–	–	17,6 %	–
25А20 F 70 (игольчатое и пластинчатое)	–	–	–	17,6 %
Прочность, МПа	5,4	5,8	6,9	7,8

Первый вариант абразивной смеси соответствует заводской рецептуре по изготовлению обдирочных инструментов 54CF20/F30/F60T5V для обработки шлифовальных кругов. Состав второго варианта смеси рассчитывался по формулам (4.20), (4.21) и (4.22), исходя из соотношения номеров зернистостей по заводской рецептуре. Запатентованные [223, 225] и рекомендуемые в данной работе оптимальные абразивные массы (смеси) представлены третьим и четвертым вариантами.

Отличительной особенностью предлагаемых смесей III и IV вариантов является то, что вместо зерен карбида кремния зернистостью F60 используются зерна электрокорунда белого зернистостью № 20. Введение в смесь адгезионно-активных к керамической связке электрокорундовых зерен малой зернистости позволяет получить более прочные контакты между зернами карбида кремния, что в целом повышает прочность черепка инструмента. Использование вместо стандартного зерна 25AF70 игольчатого и пластинчатого дополнительно повышает прочность мостиков связки за счет их лучшего армирования.

Для проведения прочностных испытаний образцов инструмента в виде «восьмерок» готовились абразивные смеси согласно вариантам табл. 4.5,

смешивая их с керамической связкой, декстрином и водой. Из готовой формовочной массы изготавливались образцы «восьмерки», которые термообрабатывались пр 1250 °С. Механическая прочность образцов определялась на испытательной машине УММ-5 по общепринятой методике.

Результаты испытаний приведены в табл. 4.5, из которой видно, что образцы «восьмерки», изготовленные из предлагаемых смесей по III и IV вариантам, имеют прочность в 1,25 и 1,44 раза соответственно выше по сравнению с образцами I варианта. Замена стандартного зерна 25AF70 на зерно игольчатой и пластинчатой формы дает повышение прочности образцов в 1,13 раза. Использование в исследуемых абразивных смесях стандартного зерна 25AF70 вместо зерна 54CF60 увеличивает прочность образцов примерно в 1,2 раза. Анализ представленных данных свидетельствует о практической возможности значительного повышения прочности абразивных инструментов, изготовленных из смесей зерен разных номеров зернистостей, а также при замене одного вида зерна на другой и использовании зерен разной формы.

В ряде случаев на машиностроительных заводах возникает необходимость замены импортного абразивного инструмента на аналогичные по характеристикам типы инструментов отечественного производства. Трудность подбора таких инструментов заключается в том, что зерновые составы абразивных материалов зарубежных фирм отличаются от отечественных стандартных зерновых составов (табл. 1.1).

Используя разработанные в данной работе методы составления абразивных смесей зерен из нескольких номеров зернистостей, можно с достаточной идентичностью подобрать необходимый зерновой состав для замены импортного инструмента.

На рис. 4.9, *а* показаны кривые зерновых составов шлифзерна 25AF60 (*1*), смеси из зерен зернистостью F60, F80 и F120 с объемным их содержанием, равным 58,8, 28,0 и 13,2 % соответственно (*2*) и шлифзерна фирмы «Нортон» 32A60 (24A25) (*3*). Содержание основных фракций этих абразивных материалов представлено на рис. 4.9, *б*.

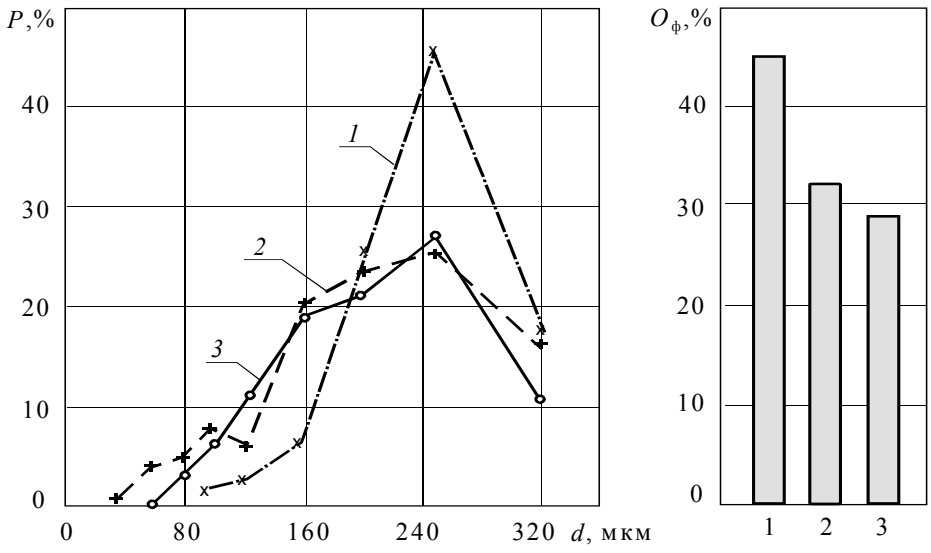


Рис. 4.9. Дифференциальные кривые зерновых составов (*а*) и содержание их основных фракций (*б*): *1* – стандартное шлифзерно 25AF60; *2* – абразивная смесь 25AF60/F80/F120; *3* – шлифзерно фирмы «Нортон» 32A60 (24A25)

Анализ кривых *2* и *3* показывает практически одинаковый их зерновой состав между составленной смесью (*2*) и шлифзерном фирмы «Нортон» (*3*), что свидетельствует о возможности проектирования и изготовления абразивных смесей, аналогичных шлифзерну, импортных инструментов.

Таким образом, используя зависимости (4.17) – (4.23), можно с достаточной степенью точности произвести расчет оптимальных соотношений номеров зернистостей K_Z и их объемных содержаний K_V и под эти соотношения определить объемное или весовое количество абразивных материалов трех зернистостей.

4.2. Экспериментальная проверка эффективности и качества шлифования опытными инструментами

4.2.1. Высокопористые круги с мелкодисперсным наполнителем

Первоначально в качестве опытных АИ были испытаны высокопористые шлифовальные круги с мелкодисперсным наполнителем, изготовленны-

ми по стандартной и предлагаемой рецептуре (табл. 4.3) при сравнительной оценке эффективности и качества шлифования использовались по два варианта высокопористых инструментов марки: 25AF36/F(150 – 120)G10V и 25AF36/F(150 - 120)O10V. Отличительной особенностью экспериментальных кругов, изготовленных по предлагаемой рецептуре, от стандартной являлось разное соотношение массового содержания основного абразивного зерна и наполнителя, а также уменьшенное содержание связки К5 (табл. 4.3).

В первой серии экспериментов испытаниям подвергались круги 1.500х40х76 25AF36/F120G10V (экспериментальные) и 25AF36/F150G10V (заводские) при шлифовании образцов из сталей 45(HRC 42 – 48), ШХ15 (HRC 56 – 60), 15ХГН (HRC 58 – 62), 4Х13 (HRC 45 – 52), Р18 (HRC 60 – 62) на плоскошлифовальном станке модели 3Е711В-1 на следующих режимах: скорость круга $V_к$ = 35 м/с, скорость стола $V_{ст}$ = 10 мм/мин. С подачей t_1 = 0,05 мм/ дв. ход и t_2 = 0,10 мм/ дв. ход. Шлифование проводилось без охлаждения «всухую» с целью исключения влияния СОЖ на структурно-механические характеристики кругов.

Эксплуатационные показатели кругов оценивались по следующим критериям (ГОСТ 2424-83): режущей способности кругов $Q_а$, мм^3/мин·мм; скорости изнашивания кругов $Q_а$, мм^3/мин·мм; коэффициенту шлифования $K_ш$; стойкости кругов T, мин. Наличие прижогов, трещин и других дефектов определяли визуально.

Результаты первой серии сравнительных испытаний высокопористых кругов при шлифовании образцов из стали 15ХГН представлены на рис. 4.10.

Анализ полученных данных показал, что исследуемые показатели кругов, изготовленных по предлагаемой рецептуре, имеют более высокие значения по сравнению со стандартными кругами. Режущая способность экспериментальных кругов повысилась в 1,30 – 1,42 раза, коэффициент шлифования увеличился в 1,10 – 1,25, а шероховатость поверхности уменьшилась в 1,15 раза по сравнению с показателями стандартных кругов, за исключением скорости их изнашивания.

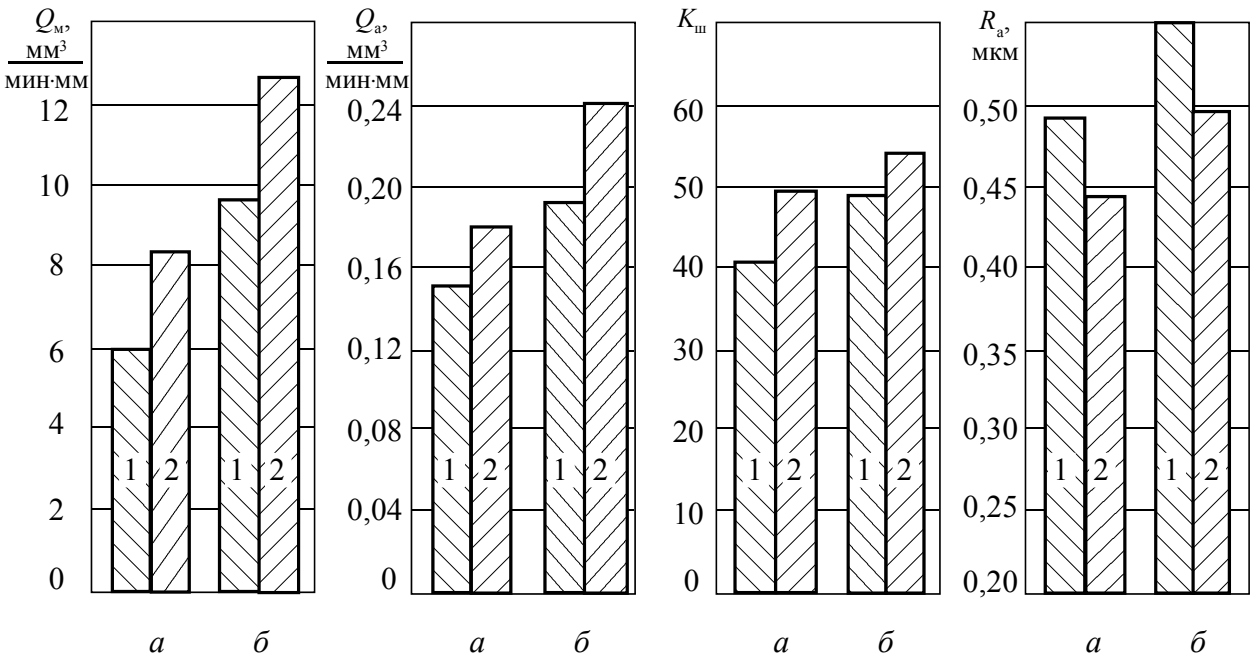


Рис. 4.10. Эксплуатационные показатели высокопористых кругов 25А50 / (8 – 10) ВМ210К5, изготовленных по заводской (*1*) и рекомендуемой (*2*) рецептуре:
а – t = 0,05 мм; *б* – t = 0,10 мм

Аналогичные результаты были получены и при шлифовании других сталей. При сравнительных оценках эффективности и качества работы исследуемых кругов большое значение имеют величина стойкости инструментов при шлифовании и шероховатость обработанных поверхностей образцов из различных сталей.

На рис. 4.11 представлены результаты по этим показателям, которые свидетельствуют об эффективности работы и повышением качества процесса шлифования кругами, изготовленными по предлагаемой рецептуре, на всех марках исследуемых сталей. Стойкость экспериментальных кругов в зависимости от марки стали повысилась в 1,3 – 3,0 раза, шероховатость поверхности снизилась в 1,2 – 1,4 раза по сравнению со стандартными кругами.

Из представленных выше данных видно, что у высокопористых шлифовальных кругов, изготовленных по предлагаемой рецептуре, значительно лучшие показатели, чем у стандартных кругов. Это объясняется тем, что стандартные круги быстрее засаливались особенно при легких режимах

шлифования (t = 0,05 мм / дв. ход) из-за повышенного содержания наполнителя. В экспериментальных кругах по рекомендуемой рецептуре в 1,33 раза меньше частиц мелкодисперсного наполнителя и почти в 2 раза меньше связки.

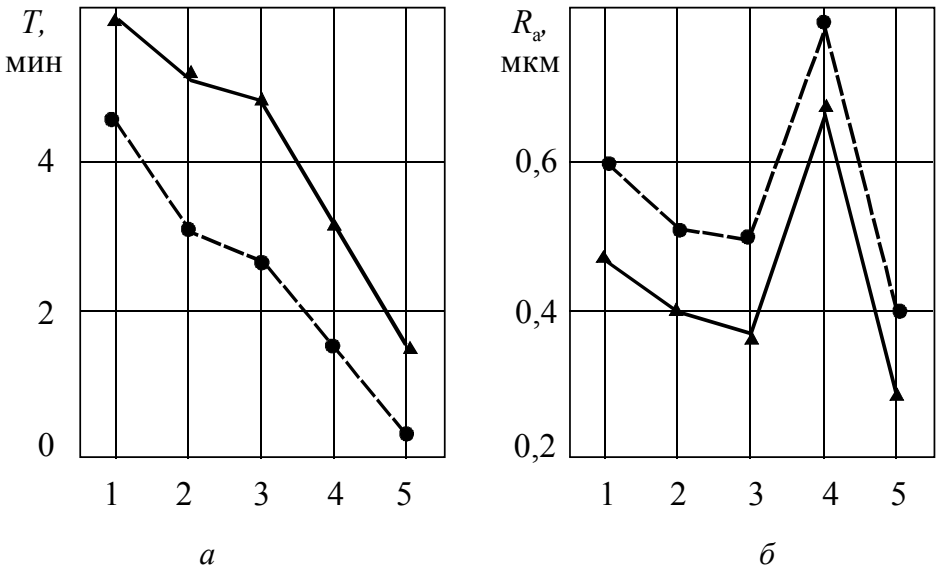


Рис. 4.11. Стойкость кругов (• – станд.; ▲– экспер.) и шероховатость обработанных поверхностей образцов из сталей: *1* – 45; *2* – ШХ15; *3* – 15ХГН; *4* – ЧХ13; *5* – Р18

Избыточное содержание наполнителя и связки в стандартных кругах приводит к снижению размера пор и пористости при их изготовлении, а также к прочному закреплению зерен и частиц наполнителя в черепке, а, следовательно, и на рабочей поверхности круга, что затрудняет ее самозатачивание и приводит к потере режущей способности круга из-за износа абразивных зерен и засаливания круга. Кроме этого, на отшлифованных стандартными кругами образцах были замечены отдельные очаги прижогов, особенно это наблюдалось на образцах из сталей 15ХГН, Р18. В то же время на поверхности образцов, обработанных экспериментальными кругами, полностью отсутствовали прижоги, а рабочая поверхность кругов оставалась чистой и свободной от налипшего металла.

Использование на производстве предлагаемого высокопористого круга позволит повысить производительность, стойкость и качество шлифовальных

поверхностей изделий. Об этом свидетельствуют и акты производственных испытаний экспериментальных кругов, представленных в Приложении.

Во второй серии экспериментов испытывались круги 1.500х20х305 25AF36/F120O10V (экспериментальные) и 25AF36/F150O10V (серийные) при шлифовании образцов из стали ШХ15 (HRC 56 – 60) на станке для глубинного плоского шлифования модели ЛШ-220. Режимы шлифования: $V_к$ = 26 м/с, $V_{ст}$ = 80 м/мин, t_1 = 1,0 мм и t_2 = 2,5 мм при встречном шлифовании «всухую».

Эксплуатационные показатели кругов оценивались по тем же критериям, что и в первой серии экспериментов.

На рис. 4.12 показаны результаты второй серии сравнительных испытаний кругов при шлифовании образцов из стали ШХ15.

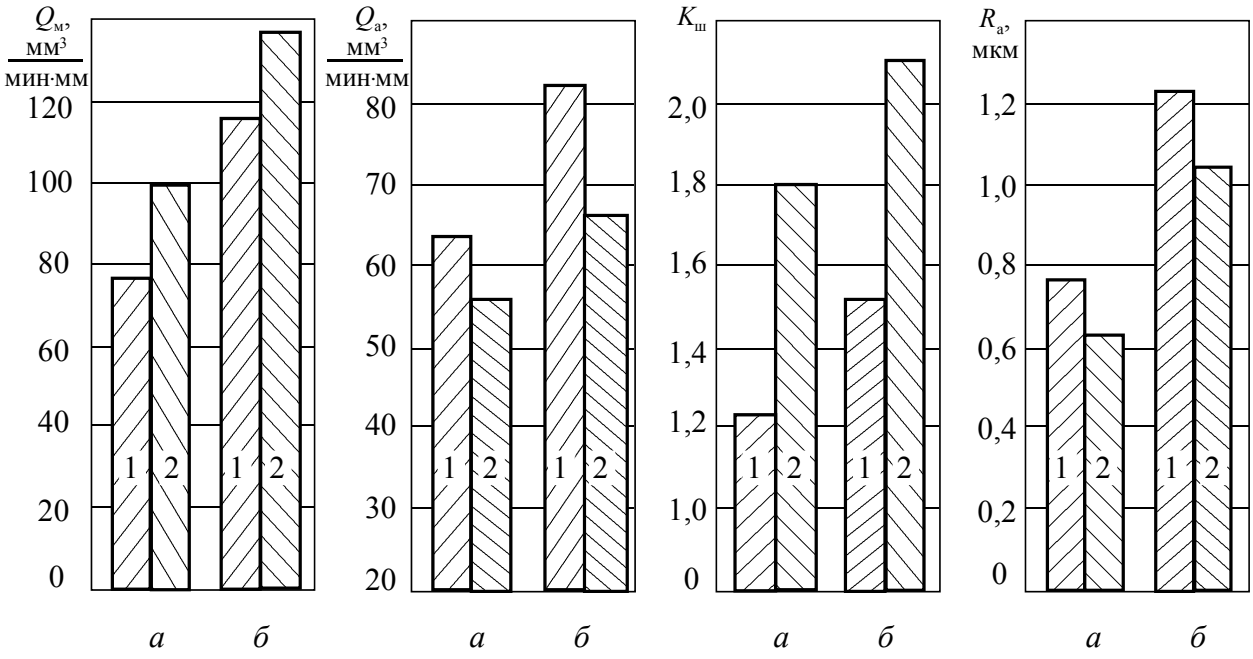


Рис. 4.12. Экспериментальные показатели высокопористых кругов 25А50/(8) СТ10 К5, изготовленных по стандартной (*1*) и рекомендуемой (*2*) рецептуре:
а – t = 1,0 мм; *б* – t = 2,5 мм

Анализ представленных данных показал, что экспериментальные круги имеют значительно лучшие показатели работы, чем стандартные круги, Так, режущая способность экспериментальных кругов увеличилась в 1,2 – 1,3 раза, скорость изнашивания кругов уменьшилась в 1,10 – 1,28 раз, коэффици-

ент шлифования повысился в 1,5 раза, а шероховатость обработанных поверхностей уменьшилась в среднем в 1,2 раза, по сравнению с показателями шлифования стандартными кругами. Это можно объяснить следующим образом. Оптимальное содержание наполнителя и связки в экспериментальных кругах, определяемых по формулам (4.12) и (4.13), способствует упорядочиванию структурного строения черепка инструмента, за счет чего повышается его прочность. Это дает возможность при тяжелых режимах врезного шлифования повысить режущую способность, снизить износ экспериментального высокопористого с дисперсным наполнителем круга и обеспечить регламентированное качество обработанных поверхностей.

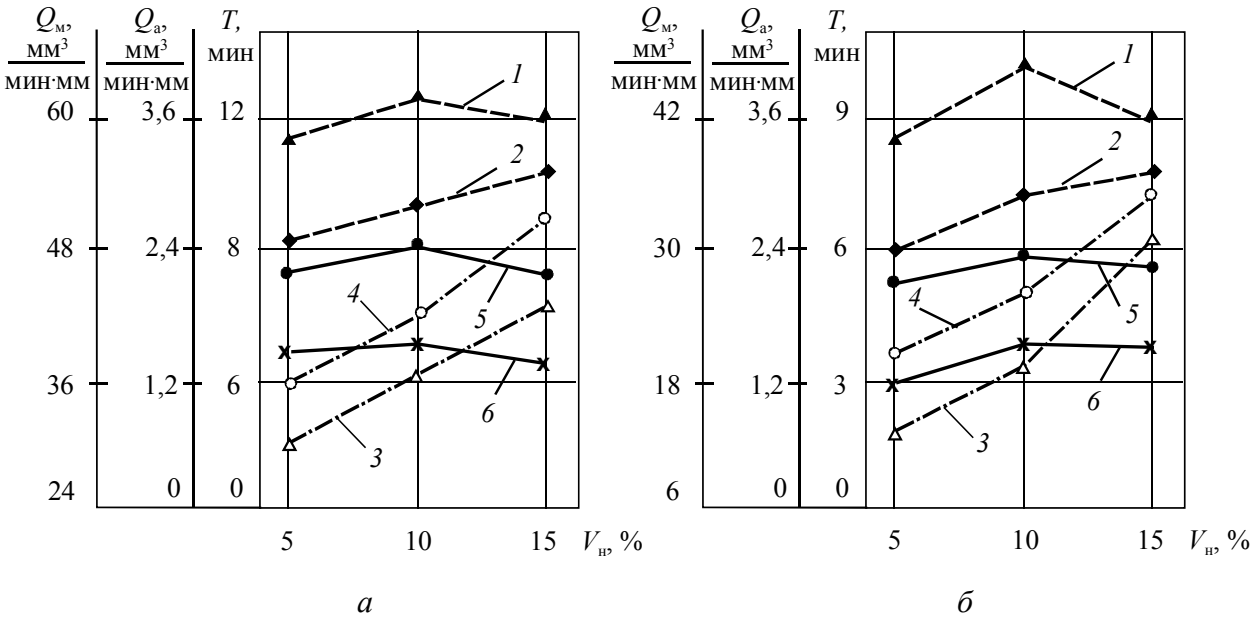
4.2.2. Высокопористые круги с «закрытой» пористостью

Экспериментальные исследования показателей шлифования высокопористыми абразивными кругами с закрытой пористостью проводилось на операциях внутреннего шлифования на станке модели 3К227В. В качестве объекта исследования были круги 1.80х35х20 с выгорающим наполнителем 25АF60J10V/КФ40 и огнеупорным наполнителем 25АF60J10V/КК32. В качестве обрабатываемых материалов испытывались: закаленная сталь 45 (HRC 48-52) и сталь ШХ15 (HRC58-62). Обрабатывались втулки размером 103х80х53. Режим работы: $V_к$ = 30 м/с; $V_д$ = 55 м/мин; подача t = 0,025 мм/дв. ход; S_n = 6 м/мин. Шлифование проводилось без охлаждения. Правка кругов велась алмазным карандашом с продольной подачей стола S_n = 1,0 ÷ 1,5 м/мин.

Показатели работы исследуемых высокопористых шлифовальных кругов представлены на рис. 4.13.

При обработке сталей 45 (рис. 4.13, *а*) и ШХ15 (рис. 4.13, *б*) наиболее эффективными являются экспериментальные круги с огнеупорным порообразующим наполнителем КК32(54С32). Режущая способность $Q_м$ таких кругов при шлифовании стали 45 в 1,1 – 1,2 раза, а при обработке стали ШХ15 – в 1,3

– 1,4 раза больше, чем у кругов, изготовленных с выгорающим наполнителем КФ40. Износ экспериментальных кругов $Q_а$ в 1,5 – 2,0 раза меньше, чем у высокопористых кругов с наполнителем КФ40.



а *б*

Рис. 4.13. Зависимости режущей способности $Q_м$ (*1*, *2*), скорости изнашивания $Q_а$ (*3*, *4*), стойкости T (*5*, *6*) кругов 25AF60J10V/КК32 (1, 3, 5) и 25AF60J10V/КФ40 (*2*, *4*, *6*) от объемного содержания наполнителей при шлифовании сталей: 45 (*а*) и ШХ15 (*б*)

При обработке исследуемых сталей стойкость экспериментальных кругов выше в 1,3 – 1,7 раза. При этом контроль качества обработанных поверхностей экспериментальными кругами показал полное отсутствие прижогов, а шероховатость поверхности $R_а$ уменьшилась в среднем на 15 – 20 %. Повышенные показатели предлагаемого высокопористого инструмента с «закрытой» пористостью обусловлены, в первую очередь, тем, что использование в качестве порообразующего наполнителя прочных и огнеупорных частиц (зерен) карбида кремния, подобных по форме основному абразивному электрокорундовому зерну, приводит к улучшению структурно-механических свойств инструмента по сравнению с инструментами, изготовленными с помощью выгорающих наполнителей.

Более прочное закрепление основных абразивных зерен на рабочей поверхности предлагаемых кругов способствует повышению их режущей способности и снижению скорости износа круга за счет уменьшения числа зерен, вырываемых из связки. Кроме того, находящиеся на рабочей поверхности порообразующие частицы карбида кремния до их удаления с поверхности также какое-то время производят резание, привнося свою долю к улучшению эксплуатационных показателей работы.

Применение предлагаемых высокопористых кругов с «закрытой» пористостью позволяет реализовать еще один резерв повышения производительности за счет увеличения скорости вращения кругов по сравнению с известными высокопористыми инструментами. Как показали пробные экспериментальные исследования, использование предлагаемых кругов с «закрытой» пористостью позволяет увеличить скорость вращения инструментов в 1,4 – 1,5 раза. Аналогичное повышение скорости для обычных высокопористых кругов невозможно из-за недостаточной их прочности и резкого ухудшения качества обработанных поверхностей изделий.

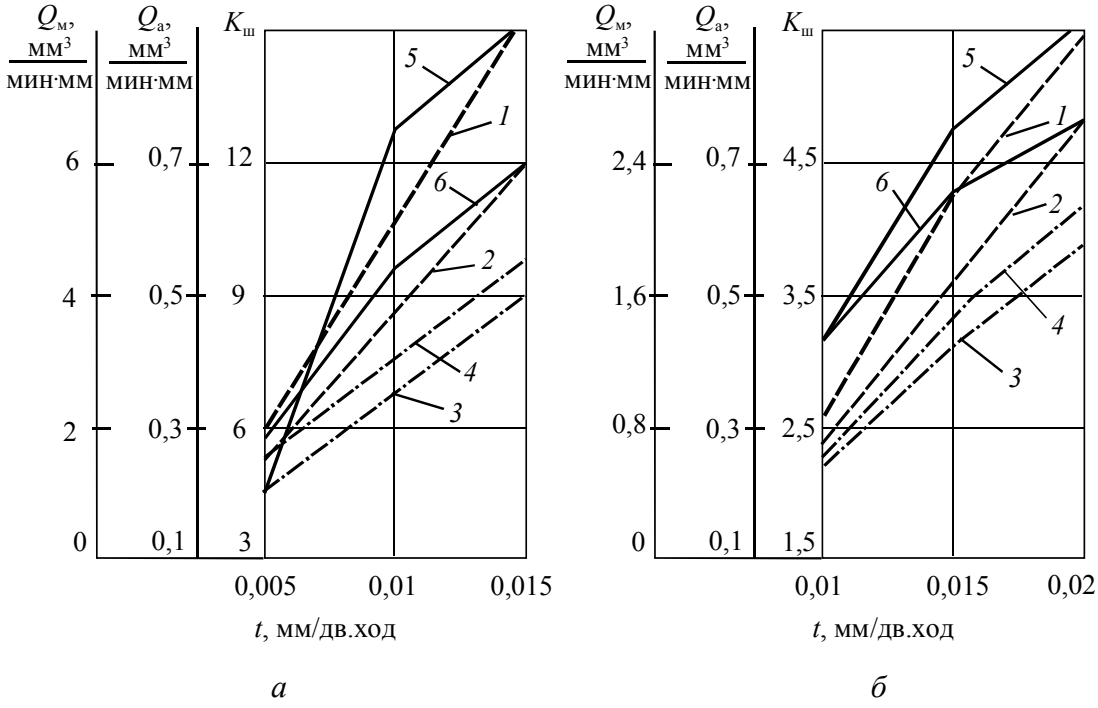
Выявленные особенности предлагаемого инструмента являются основой для повышения его механической прочности и пористости рабочей поверхности, а также для создания эффективного метода непрерывного восстановления режущей способности абразивного инструмента [222, 225].

4.2.3. Шлифовальные круги из смесей абразивных материалов различной зернистости

Для экспериментальных исследований эксплуатационных показателей использовались шлифовальные круги 1.250х25х76 из зерна различных номеров зернистостей 25AF46/F60/F80L6V и серийные – 25AF46L6V. Испытания проводились на плоскошлифовальном станке модели 3Г71М. Обрабатывались образцы из закаленных сталей ШХ15 (HRC 56 – 60) и Р18 (HRC 62 – 65). Обработка стали ШХ15 велась врезанием, а стали Р18 – с продольной

подачей. Режимы шлифования назначались с зависимости от обрабатываемой стали: для стали ШХ15 $V_{кр}$ = 35 м/с, $S_{пр}$ = 15 м/мин; для стали Р18 $V_{кр}$ = 35 м/с; $S_{поп}$ = 1,3 мм/ход; $S_{пр}$ = 18 м/мин.

Результаты исследований представлены на рис. 4.14. Данные испытаний показывают, что полученные зависимости эксплуатационных показателей как экспериментальными, так и серийными, шлифкругами имеют общие закономерности, которые полностью соответствуют теории и практике абразивной обработки.



а *б*

Рис. 4.14. Зависимость $Q_м$ (*1*, *2*), $Q_а$ (*3*, *4*) и $K_ш$ (*5*, *6*) от глубины шлифования: *а* – ШХ15; *б* – Р18; *1*, *3*, *5* – 25А40/25/16 СМ26К5; *2*, *4*, *6* – 25А40 СМ26К5

Как видно из графиков на рис. 4.14, режущая способность $Q_м$ с увеличением глубины шлифования имеет тенденцию к увеличению. При этом наибольшие результаты получены при шлифовании экспериментальным кругом, изготовленным из смеси зерен разной зернистости 25AF46/F60/F80L6V, превышающие результаты серийного круга 25AF46L6V по стали ШХ15 примерно в 1,4 раза, а по стали Р18 – в 1,2 раза. В то же время износ $Q_а$ экспериментальных кругов больше, чем серийных. При малой глубине обработки

коэффициент шлифования $K_{ш}$ у всех кругов практически одинаковый, а с увеличением глубины обработки этот коэффициент у экспериментальных кругов повышается в 1,18 – 1,43 раза по сравнению с серийными кругами. Помимо этого, при шлифовании рассматриваемых сталей экспериментальным шлифкругом шероховатость обработанных поверхностей снижается на 1 – 2 разряда класса чистоты, а его стойкость между правками повышается в 1,4 – 1,8 раза по сравнению с серийным кругом. Это объясняется тем, что экспериментальный круг имеет измененную структуру черепка (рис. 4.15, *а*) по сравнению с серийным кругом (рис. 4.15, *б*). В экспериментальном круге каркас черепка и рабочей поверхности состоит из зерен крупной зернистости, между которыми располагаются зерна средней и мелкой зернистостей. Зерна мелкой зернистости являются, в основном, армирующим элементом связки. Зерна средней зернистости зерен при выходе на рабочую поверхность инструмента в процессе резания вырываются из связки, образуя дополнительные поры между основными крупными зернами. Это устраняет практически полностью «засаливание» рабочей поверхности круга.

В связи с этим экспериментальные круги, изготовленные из смеси зерен разной зернистости, работают весь цикл обработки в режиме равномерного самозатачивания и непрерывной регенерации рабочей поверхности, что является одной из основных причин их высоких режущих свойств.

Применение предлагаемых шлифкругов позволяет реализовать еще один резерв повышения производительности шлифования за счет увеличения скорости вращения круга или глубины обработки. Использование повышенных режимов обработки обусловлено более высокой прочностью черепка экспериментальных кругов по сравнению с серийными инструментами таких же характеристик.

При решении задачи повышения производительности и качества шлифования возможно использование в абразивных смесях из зерен разных номеров зернистостей вместо одного вида и формы зерна другого вида и формы. Например, вместо зерен из карбида кремния использовать электроко-

рундовые зерна как адгезионно-активные к керамической связке, а стандартное шлифзерно заменить игольчатым и пластинчатым для упрочнения инструмента за счет лучшего армирования связки (табл. 4.5).

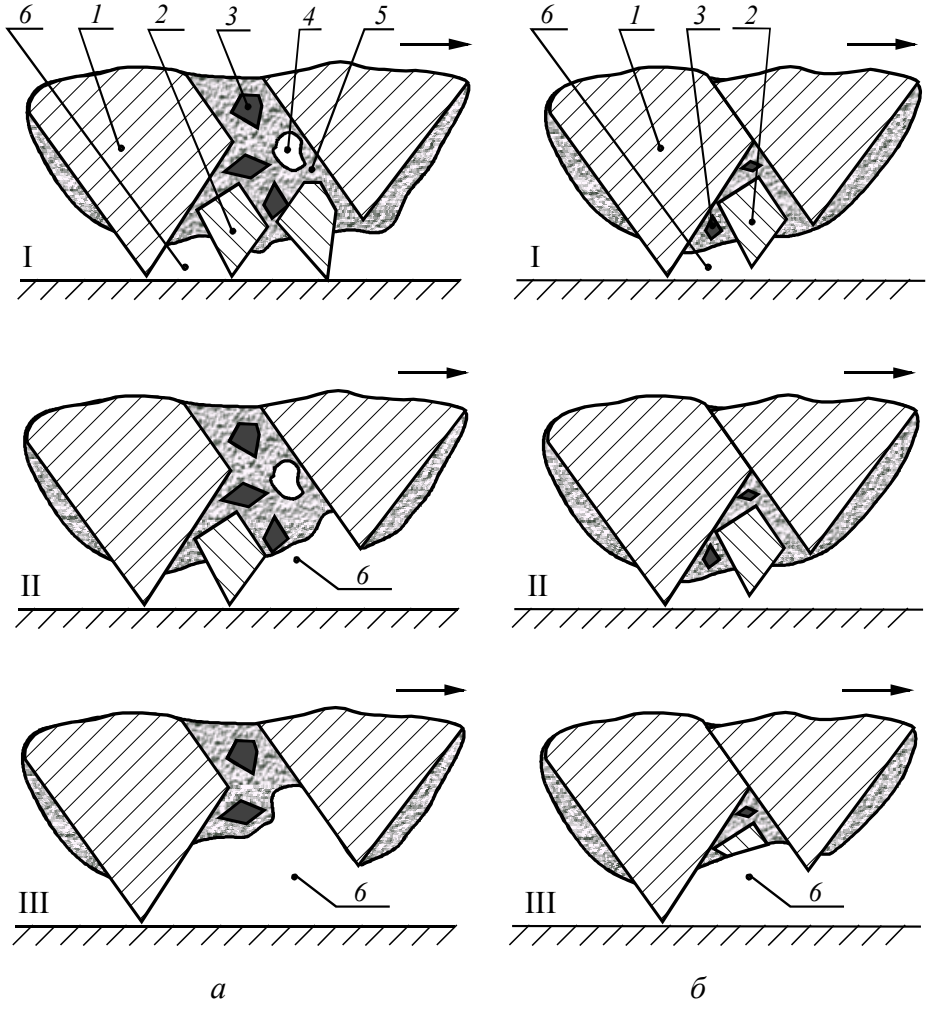


Рис. 4.15. Схемы последовательного образования поверхностной поры (I, II, III) в процессе шлифования инструментом из смеси зерен разной зернистости (*а*) и серийным инструментом (*б*): *1* – зерно крупной (основной) зернистости; *2* – зерно средней (дополнительной) зернистости; *3* – зерно мелкой зернистости; *4* – внутренние поры; *5* – связка; *6* – поверхностная пора, образующаяся в процессе шлифования

Для определения коэффициента шлифования и стойкости обдирочных шлифовальных кругов, изготовленных по вариантам I, II, III, IV табл. 4.5, проводили их испытания на станке модели РТ-103 при обработке посадочного отверстия и наружного диаметра кругов 1.400х63х127.

Результаты испытаний представлены на рис. 4.16. Анализ этих результатов показывает, что круги с оптимальным соотношением объемного содержания в смеси зерен по зернистостям (вариант II), аналогичным заводской рецептуре (вариант I), имеют коэффициент шлифования и стойкость в 1,17 и 1,13 раз соответственно больше, чем заводские круги. Замена в смеси шлифзерна 54CF60 на шлифзерно 25AF70 дает увеличение коэффициента шлифования в 1,53 раза, а стойкость круга – в 1,27 раз по сравнению с серийным кругом. Использование игольчато-пластического зерна вместо стандартного (вариант IV) дополнительно повышает значение коэффициента шлифования в 1,34 раза и стойкости – в 1,21 раза по сравнению с кругами, изготовленными из смеси III варианта.

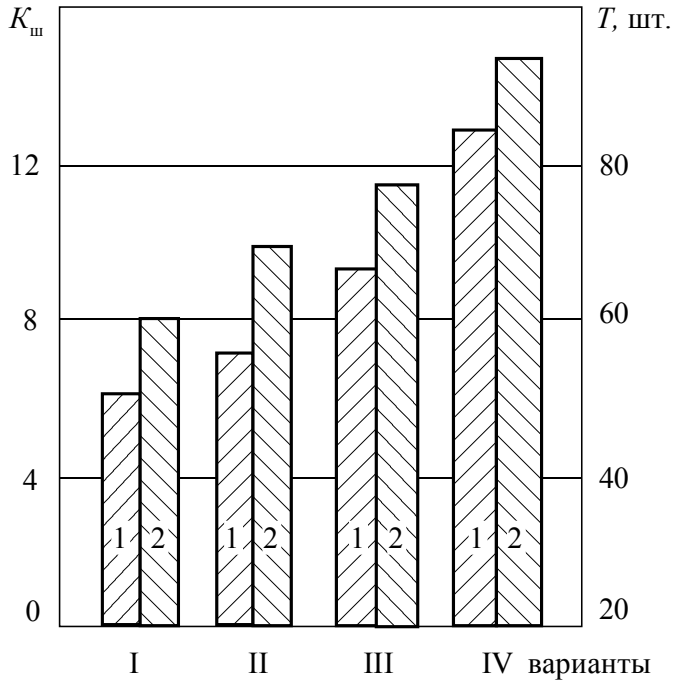


Рис. 4.16. Изменение коэффициента шлифования $K_ш$ (*1*) и стойкости T(*2*) в зависимости от варианта смесей зерен (табл. 3.10)

Таким образом, абразивные инструменты, изготовленные из оптимальных по составу и количеству смесей, обладают рядом преимуществ по сравнению с серийными образцами. Рекомендуемый инструмент имеет повышенную механическую прочность черепка; обладает свойством самозатачиваться и ре-

генерировать рабочую поверхность, образуя дополнительные поверхностные поры; может использоваться при повышенных режимах шлифования.

4.3. Определение содержания связки в формовочных смесях для стандартных и опытных инструментов

Для создания требуемой твердости АИ нужна строго нормированная дозировка и оптимальное содержание связки в формовочных смесях. Как недостаточное содержание связки, так и ее избыточное количество может существенно изменить структурно-механические характеристики и эксплуатационные показатели инструментов.

Как известно, при производстве АИ только на керамической связке, по данным [68], насчитывается около 1500 рецептур формовочных смесей (масс). Одним из основных компонентов рецептуры является объемное содержание связки. Она вводится в формовочную массу в определенных количествах в зависимости от твердости, структуры, зернистости, типа связки, марки абразивного материала, технологических режимов и т.п.

В настоящее время основным методом расчета состава формовочных масс, в том числе и определение необходимого количества связки, является классический план эксперимента Зайделя-Гаусса, предложенный В. Н. Любомудровым [193]. Этот метод требует большого количества экспериментов, связанных с изготовлением системы рецептов с учетом твердости, зернистости и структуры АИ.

В последнее время появились новые методики составления рецептов, основанные на применении многофакторного планирования эксперимента [102, 201, 282, 308]. Основными преимуществами таких методик являются: сокращение количества опытов в 10 – 12 раз по сравнению с классической методикой и получение уравнений регрессии, позволяющих моделировать и анализировать влияние отдельных технологических факторов на свойства инструмента, а также направлено регулировать технологию изготовления и характеристики абразивного инструмента. Методики факторного экспери-

мента и его применение для расчета рецептуры формовочных масс достаточно подробно освещены в работах [102, 201, 308].

Основным недостатком таких методик является узкая гамма исследуемых масс из-за ограничений в определенных пределах варьирования заданных параметров: зернистости абразивного материала, твердости и структуры инструмента.

Наиболее перспективным и рациональным методом расчета регламентированного количества связки в формовочных массах является использование математических моделей, учитывающих общие функциональные связи и зависимости структурных параметров абразивных инструментов, а также физические явления при их изготовлении.

В работе [270] впервые была сделана попытка формализовано определить, то потребное количество связки в рецептуре для изделий различных абразивных материалов, зернистостей, твердостей и режимов, применяемых в абразивной отрасли при работе на связке К5 для 24А и К10 для 63С. Для определения весовых частей связки на 100 весовых частей зерна с учетом структуры, твердости, номера зернистости и типа связки были предложены следующие формулы:

– для 24А $$Q_A = \frac{100\left[\left(N_{CT} - 2\right) + 1{,}25K_{HT}\right] \cdot K_{H3} \cdot K_{\text{СВ}} \cdot \gamma_{\text{СВ}}}{\left(62 - 2N_{CT}\right)\gamma_{\text{з}}}, \qquad (4.24)$$

– для 63С $$Q_C = \frac{100\left[\left(N_{CT} + 7\right) + 2K_{\text{НТ}}\right] \cdot K_{\text{НЗ}} \cdot K_{\text{СВ}} \cdot \gamma_{\text{СВ}}}{\left(62 - 2N_{CT}\right)\gamma_{\text{з}}}, \qquad (4.25)$$

где N_{CT} – номер структуры; $K_{\text{НТ}}$ – коэффициент, зависящий от твердости; $K_{\text{НЗ}}$ – коэффициент номера зернистости; $K_{\text{СВ}}$ – коэффициент типа связки; $\gamma_{\text{СВ}}$ и $\gamma_{\text{з}}$ – плотность связки и зерна соответственно.

Числовые значения коэффициента номера зернистости $K_{\text{з}}$ представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Числовые значения коэффициентов $K_{\text{з}}$

Номер зернистости	F36	F46 … F54	F60 … F80	F100	F120…F180

$K_з$	1,0	0,9	0,85 … 0,80	0,75	0,70

Анализ этих значений показывает, что при уменьшении зернистости абразивного материала количество связки в инструменте должно также уменьшаться.

По данным наших исследований такая зависимость наблюдается только в инструментах из карбида кремния. У инструментов из электрокорунда, как правило, более сложная зависимость количества связки от зернистости абразивного материала, т.е. формула (4.24) не соответствует действительному положению дел и требует существенного уточнения.

Основываясь на эмпирическом уравнении, определяющем зависимость степени твердости инструмента от параметров его структуры в работе [279] предложена расчетная формула для вычисления необходимого объема связки в следующем виде:

$$V_с = \frac{100(100 - V_з)}{(h-1)(0{,}65 + 0{,}13N)V_з + 100}, \%, \qquad (4.26)$$

где h – среднее значение глубины лунки пескоструйного прибора, мм; $V_з$ – объем зерна, %; N – номер зернистости.

Анализ формулы (4.26) и расчеты необходимого объема связки в зависимости от номера зернистости показали, что при изменении зернистости объем связки увеличивается в 2 – 3 раза, что не соответствует действительности. По данным рецептур Волжского абразивного завода объем связки для данного случая изменяется только на 10 – 15 %.

В работе [172] предложена расчетная модель объемного содержания связки в матрице инструмента, представляющая собой математическую зависимость в виде следующей формулы:

$$K_{св} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot P_{кр}^{2,14} \cdot \left(\frac{K_з^{0,75}}{d_з^3} \right) \cdot \left(\frac{K_{зо}^{0,53}}{\sigma_{P_0}^{2,13} \cdot d_{зо}^3 \cdot K_{сво}^{0,43}} \right), \qquad (4.27)$$

где $К_{св}$ – объемная доля связки; $Р_{кр}$ – критическая сила резания; $К_з$ – объемная доля зерна; $К_{зо,}$ $d_{зо,}$ $К_{св\ о}$ – параметры структуры абразивной композиции для определения прочности материала связки;

Эта зависимость была предложена исходя из условия, что необходимое количество связки должно обеспечивать прочное закрепление абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента конкретных характеристик с учетом размера зерен, объемной их доли в матрице и прочностных характеристик материала связки, а также режимов шлифования.

Однако в формуле (4.27) вызывает сомнение зависимость объемной доли связки от размера абразивного зерна. При увеличении номера зернистости в 4 раза от № 10 до № 40 при прочих равных условиях по формуле (3.32) объемная доля связки должна измениться в 64 раза, что явно не соответствует действительности. По данным [270] объем связки в диапазоне рассматриваемых размеров зерна изменяется только в пределах 19 – 30 %.

Кроме того, расчетная модель (4.27) требует установления дополнительных зависимостей, например, связь размера зерна с исходными данными, характеризующими процесс шлифования, и силу резания на зерне со структурными параметрами инструмента и режимами процесса шлифования. В связи с этим практическое использование этой расчетной модели затруднительно.

Необходимо отметить и общий недостаток известных расчетных и математических моделей, рассмотренных выше. Этот недостаток заключается в том, что модели основаны на экспериментальных зависимостях, характерных только для определенных условий, что ограничивает их научно-практическую ценность. В отдельных случаях вызывают сомнения о достаточности применяемых функциональных связей и зависимостей в моделях.

До сих пор нет единого взгляда на природу и ход физических явлений при формировании структуры черепка инструмента на плавящейся и спекающейся связках во время термообработки (обжига) и влияние зернистости и формы абразивного зерна на процессы взаимодействия зерна со связкой. Не

выявлены зависимости необходимого количества связки от номера зернистости и марки абразивного материала, что затрудняет разработку комплексных аналитических моделей для расчета регламентированного количества связки с учетом нормируемых ГОСТом характеристик инструмента, а также типа связки, марки и индекса качества абразивного материала. Кроме того, практически отсутствует информация о расчетных моделях для определения необходимого количества связки в формовочных массах с различными наполнителями, например при производстве высокопористых инструментов.

Для изучения влияния зернистости, твердости и структуры АИ на содержание связки в формовочных смесях были математически обработаны и проанализированы более 70 рецептур для инструментов из электрокорундов марки 14А, 24А и 25А на керамических связках К5, К8 и № 1, применяемых на ряде отечественных абразивных заводах (ВАЗ, ЛАЗ, ЗОАЗ, ЧАЗ, ЗАК, ТАК), а также обширный экспериментальный материал по рецептурам формовочных смесей, полученный специалистами ВНИИАШа (С. М, Федотова, С. Г. Воронов, Н. Д. Кочаргина и др.).

На основе этого в данной работе была предпринята попытка формализовано описать и определить регламентированное количество связки в рецептуре для изготовления инструментов из электрокорундов в зависимости от их параметров: зернистости, твердости и структуры. Дополнительно также учитывались: тип связки, марка и индекс качества электрокорунда. Полученные результаты при обработке и анализе рецептур ряда абразивных заводов позволили вывести аналитическое выражение для определения необходимого количества связки $V_{Сэ}$ в весовых частях на 100 весовых частей электрокорундового зерна в следующем виде:

$$V_{сэ} = 0{,}151 Z^{\alpha_э} \cdot N_T^{\beta_э} \cdot (C+1)^{\gamma_э} \cdot K_{св} \cdot K_{МЗ} \cdot K_{КЗ}, \qquad (4.28)$$

где $\alpha_э = 0{,}33 - 0{,}0015\ Z$; $\beta_э = 1 + 0{,}05\ N$; $\gamma_э = 0{,}51 + 0{,}02\ C$; $K_{св}$, $K_{МЗ}$, $K_{кз}$ – коэффициенты, учитывающие тип связки, марку зерна и индекс качества зерна соответственно, при этом: $K_{св} = 1{,}0$ (К5); $K_{св} = 1{,}15$ (К8); $K_{св} = 0{,}12$ (N1); $K_{МЗ}$

= 1,0 (24А); $К_{МЗ}$ = 1,08 (25А); $К_{МЗ}$ = 0,92 (14А); $К_{кз}$ = 1,05 (П); $К_{кз}$ = 1,0 (Н); $К_{кз}$ = 0,95 (*D*);

В табл. П.2 представлены данные по содержанию связки в весовых частях на 100 весовых частей зерна, рассчитанные по формуле (4.28). Для сравнения приведены данные по количеству связки, применяющиеся в системе рецептов, разработанных экспериментально для Волжского абразивного завода. Проведенный статистический анализ показал, что расчетные показатели при доверительной вероятности 95 % колеблются в пределах 0 ÷ 8 % от заводских рецептурных значений. При этом отклонения, превышающие 5 %, около 15 %, что вполне допустимо и практически не оказывает существенного влияния на структурно-механические свойства абразивного инструмента. Высокая сходимость данных рецептурных с расчетными позволяет с необходимой достоверностью пользоваться формулой (4.28) для определения регламентированного количества связки с учетом зернистости, твердости и структуры стандартного электрокорундового АИ, а также типа связки, марки абразива и индекса его качества.

Одним из основных вопросов в технологии производства модернизированных инструментов является определение нормированного содержания связки в формовочных массах с порообразующими или мелкодисперсными наполнителями. Несмотря на достаточно большой опыт создания и использования, например высокопористых инструментов [10, 68, 93, 102, 169, 238, 250, 267 и др.], до сих пор существуют различные принципы и методы разработки рецептур формовочных масс для такого типа инструментов. Помимо этого, при разработках технологии и рецептуры высокопористых инструментов их состав и свойства, как правило, не сопоставляются с внутренним устройством и характеристиками обычных серийных инструментов.

В связи с этим в основу методики определения содержания связки для инструментов с порообразующими и мелкодисперсными наполнителями был положен принцип конгруэнции структуры таких инструментов со стандартными инструментами. В работе [250] высокопористый инструмент рассмат-

ривается как один из видов обычных инструментов, отличающийся повышенной пористостью и наличием равномерно распределенных крупных пор, превышающих размер зерна абразива.

Следует отметить, что высокопористый инструмент своей шлифующей частью полностью соответствует рабочей поверхности серийного инструмента. Это позволяет считать, что структура высокопористого инструмента будет определяться объемным содержанием зерна в шлифующей части изделия. В данном случае взаимное расположение абразивных зерен, образующих каркас высокопористого и серийных инструментов, будут соответствовать друг другу независимо от объема искусственных пор. При этом объемное содержание и размеры дополнительных (искусственных) пор должны рассматриваться как самостоятельная характеристика, не зависимая от твердости и структуры инструмента.

Твердость высокопористых инструментов должна регулироваться, так же как и твердость обычных серийных инструментов, путем изменения количества связки на 100 весовых частей зерна при постоянном объеме зерна и порообразующего наполнителя. Зависимость твердости от количества связки для высокопористых и серийных инструментов будет одинаковой при равенстве объемов зерна в серийных и шлифующей части высокопористого инструмента. Однако для обозначения структуры высокопористого инструмента в общепринятом понятии необходимо принять объем зерна во всем инструменте, а не в шлифующей части. В этом случае объем зерна в шлифующей части $V_{зш}$ высокопористого инструмента увеличивается в зависимости от объема наполнителя и рассчитывается по следующей формуле:

$$V_{зш} = V_{зо} \cdot \lambda_з , \qquad (4.29)$$

где $V_{зо}$ – общий объем зерна в высокопористом инструменте, %; $\lambda_з$ – коэффициент, учитывающий относительное изменение содержания зерна в шлифующей части инструмента от объемного содержания наполнителя.

В связи с тем, что рецептуру формовочной массы рассчитывают по отношению к 100 весовым частям (в.ч.) абразивного материала, то при опреде-

лении необходимого количества связки переводят соотношение объемных процентов в весовые по следующей формуле:

$$V_{\text{св}} = \frac{V_{\text{с}}^{1} \cdot \gamma_{\text{св}} \cdot 100}{V_{\text{з}}^{1} \cdot \gamma_{\text{з}}}, \text{ вес. ч.,} \qquad (4.30)$$

где $V'_{\text{св}}$ и $V'_{\text{з}}$ – объемы связки и зерна, %; $\gamma_{\text{св}}$ и $\gamma_{\text{з}}$ – плотность связки и абразива соответственно.

Объемное содержание зерна $V'_{\text{з}}$, %, для стандартного инструмента можно определить по известной формуле [193]:

$$V'_{\text{з}} = 62 - 2C. \qquad (4.31)$$

Объемное содержание связки $V'_{\text{св}}$, %, в этом случае определяется по следующей зависимости:

$$V'_{\text{св}} = -13 + 1{,}5N_T + 2C. \qquad (4.32)$$

Без учета зернистости абразивного материала весовое содержание связки в формовочной массе для серийного инструмента можно определить по следующему выражению:

$$V_{\text{св ст}} = \frac{(-13 + 1{,}5N_T + 2C)\gamma_{\text{св}} \cdot 100}{(62 - 2C) \cdot \gamma_{\text{з}}}. \qquad (4.33)$$

При расчете весовых частей связки в формовочной массе для высокопористого инструмента используется формула (3.35) в следующем виде:

$$V_{\text{св вп}} = \frac{V_{\text{св}}^{1} \cdot \gamma_{\text{св}} \cdot 100}{V_{\text{зо}}^{1} \cdot \gamma_{\text{з}} \cdot \lambda} = V_{\text{св ст}} \cdot \lambda_{з}^{-1}, \text{ вес. ч.} \qquad (4.34)$$

Из формулы (4.34) видно, что количество связки для высокопористого инструмента требуется меньше, чем для серийного инструмента, из-за увеличения объема зерна в шлифующей части высокопористого инструмента и замещения части связки порообразующим наполнителем.

Следует отметить, что принцип конгруэнции структур и представленная выше методика расчета количества связки для АИ с порообразующими наполнителями полностью применим и для инструментов с мелкодисперсными наполнителями. Это объясняется тем, что введение в формовочную

смесь любого наполнителя также увеличивает объем зерна в шлифующей части черепка инструмента и замещает часть связки, сокращая ее количество.

Математическая обработка и анализ известных экспериментальных и рецептурных данных по высокопористым инструментам и инструментам с мелкодисперсным наполнителем разных характеристик [26, 68, 89, 200 и др.] позволили получить зависимости коэффициента относительного изменения количества зерна λ от содержания порообразующего и мелкодисперсного наполнителя $V_н$ в инструменте (рис. 4.17). Как видно из этих зависимостей, с увеличением содержания наполнителя в инструменте коэффициент λ повышается и в пределах содержания наполнителя от 5 до 25 % происходит увеличение объема зерна в шлифующей части, например высокопористого инструмента в 1,03 ÷ 1,41 раза.

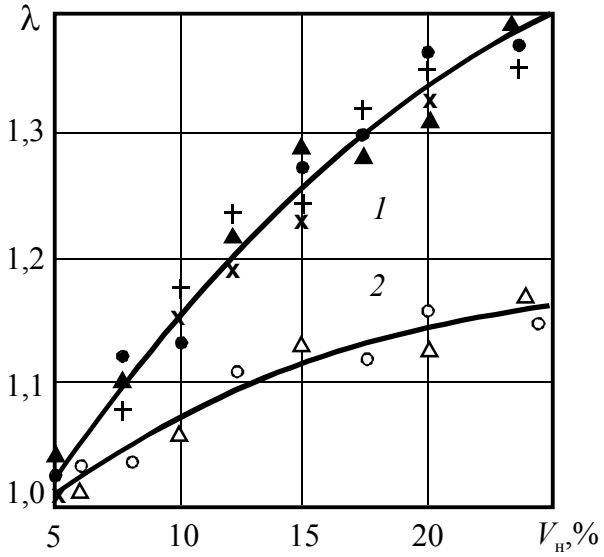


Рис. 4.17. Зависимость коэффициента $λ_з$ от содержания порообразующего (*1*) и мелкодисперсного (*2*) наполнителя

Представленные зависимости на рис. 4.17 с достаточной точностью описывается следующими уравнениями:

$$\lambda_{з1} = 1 + 0{,}01 V_{нп}^{1,2}, \tag{4.35}$$

$$\lambda_{з2} = 1 + 0{,}005 V_{нм}^{1,1}, \tag{4.36}$$

При определении количества связки $V_{\text{св ст}}$ рекомендуется использовать выше представленную аналитическую зависимость (4.28) регламентированного содержания связки в формовочных массах для изготовления стандартных АИ, а для модернизируемых инструментов – формулу (4.34). При этом следует отметить, что при одновременном введении в формовочную смесь как порообразующего, так и мелкодисперсного наполнителя величина коэффициента $\lambda_з$ будет равна сумме коэффициентов λ_{31} и λ_{32}, определяемых по заданным объемам наполнителей.

Таким образом, использование методики, основанной на принципе конгруэнции структур, позволило разработать аналитическую модель расчета нормированного количества связки для модернизируемых инструментов в зависимости от объемного содержания порообразующего или мелкодисперсного наполнителя.

4.4. Выводы

1. Разработаны теоретические основы создания высокоэффективных АИ путем регулирования и оптимизации зерновых составов, а также за счет использования различных наполнителей в формовочных смесях для изготовления инструментов. Дан анализ научных работ, разработок и рекомендаций по оптимизации зерновых составов и на основе этого выявлены основные недостатки предшествующих теоретических исследований по этому вопросу, которые были учтены в данной работе.

2. Решены поставленные задачи по совершенствованию АИ для обеспечения их регламентированных характеристик и показателей. Разработаны методики и алгоритмы расчета рациональных размеров частиц наполнителей и оптимального их содержания в формовочных смесях. Для совершенствования инструментов смесью абразивов из разных номеров зернистостей выведены расчетные зависимости их процентного содержания от соотношения номеров

зернистостей. Предложены соответствующие рецептуры формовочных смесей для изготовления высокоэффективных инструментов.

3. Проведена экспериментальная проверка работы опытных высокопористых шлифкругов с мелкодисперсным абразивным наполнителем и огнеупорным порообразующим наполнителем, а также шлифкругов, изготовленных из смесей абразивных материалов различной зернистости. Установлено, что опытные шлифкруги обладают более высокой эффективностью и качеством шлифования.

4. Разработана расчетная модель рецептурного обеспечения содержания связки в формовочных смесях с наполнителями, включающее в себя методики и расчетные зависимости для определения нормированного количества связки при составлении рецептур для изготовления стандартных и модернизированных инструментов.

5. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический регламент «Проектирование и изготовление шлифовальных кругов для высокоэффективной обработки» (Приложение П.2).

5. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ И ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

5.1. Феноменологическая модель механизма влияния внешних факторов на прочность абразивного композита

Эксплуатационные показатели АИ при шлифовании, в первую очередь, определяются прочностью зерен, мостиков связки и прочностью удержания зерна в связке. Исследования, посвященные изучению вопроса прочности абразивных зерен, связки и черепка инструмента в целом, рассмотрены во многих работах [26, 52, 83, 98, 179, 197, 234]. Однако большинство исследований этих вопросов носит эмпирический, описательный характер. Практически отсутствуют работы, касающиеся оценки прочности абразивного композита с точки зрения реальной структуры и физико-химической механики материалов, учитывающей изменчивость свойств при воздействии на них внешней среды. Имеющиеся информационные источники по этому вопросу зачастую противоречивы из-за отсутствия единого методологического подхода к изучению влияния внешней среды на структурно-механические характеристики инструмента. Выявив причины вариации этих характеристик, можно наметить пути повышения эффективности шлифования за счет рационального выбора соответствующих воздействий на АИ.

Получить правильное представление о влиянии внешней среды и воздействий на структурно-механические характеристики инструмента в настоящее время невозможно без привлечения положений физико-химической механики материалов [255], с позиций которой прочность любого материала в общем виде зависит от трех основных групп факторов:

$$\sigma_M = (\Phi_1; \Phi_2; \Phi_3), \qquad (5.1)$$

где Φ_1 – группа факторов, характеризующих реальную дефектную структуру материала; Φ_2 – группа факторов, отражающих физико-химическое взаимодействие материала с внешней средой; Φ_3 – группа факторов, учитывающих внешние физико-механические воздействия.

Для исследования зависимости прочности от первой группы факторов Φ_1, характеризующих реальную структуру материала, АИ представляли композитом, состоящим из матрицы (связующего), в котором случайным образом распределены зерна и поры [144, 155, 317]. Матрица в виде мостиков связки удерживает абразивные зерна и имеет дефектную структуру. Соотношение между разрушениями матрицы и зерна определяется как динамикой процесса шлифования, так и структурно-механическими характеристиками связки и абразивного зерна. Следует отметить, что реализация в полной мере режущей способности инструмента во многом предопределяется прочностью удержания связкой зерна, а уже затем другими его физико-механическими свойствами. Поэтому первоначальная оценка прочности должна основываться на прочности матрицы, имеющей дефекты в виде пор и включений (зерен).

Основными параметрами, характеризующими прочность матрицы, являются объемная доля открытых пор $П$, размер зерна d_3 и количество зерен N_3 на единицу площади, а также размер зоны контакта зерна с мостиками связки X. В общем виде предел прочности на разрыв композита $\sigma_р$ можно определить по следующей зависимости:

$$\sigma_р = \sigma_{ср} \cdot N_3 \cdot N_р \cdot S_м , \qquad (5.2)$$

где $\sigma_{ср}$ – среднее разрушающее напряжение в сечении мостиков связки; $N_р$ – число разрушаемых мостиков связки; S_M – площадь разрушаемых мостиков связки.

Значение $\sigma_{ср}$ зависит от сопротивления разрушению материала связки $\sigma_о$ и коэффициента концентрации напряжений в мостиках связки $k_р$

$$\sigma_{ср} = \frac{\sigma_о}{k_р} . \qquad (5.3)$$

Количество абразивных зерен на единице площади сечения разрыва определяется по формуле [129]:

$$N_3 = \left[(1 - П) \cdot \frac{3}{4\pi d_3^3} \right]^{2/3}. \qquad (5.4)$$

Для абразивного инструмента на керамическом связующем с пористостью $0{,}2 < П < < 0{,}5$ можно с достаточной точностью пользоваться следующей зависимостью определения среднего числа разрушаемых мостиков связки, приходящихся на одно зерно

$$N_{\text{р}} = (0{,}2...0{,}3) N_{\text{к}}, \qquad (5.5)$$

где $N_{\text{к}}$ – координационное число, определяемое по формуле (2.99).

Площадь сечения связки в зоне разрушения мостиков в первом приближении можно определить по следующему выражению:

$$S_M = \pi X^2 \cdot \cos\omega, \qquad (5.6)$$

где ω – средний угол ориентации мостиков связки к нормали на плоскость разрушения, $\omega_{\text{ср}} = 30^{\text{o}}$ [129]; X – размер зоны контакта зерна со связкой.

Подстановка в уравнение (5.2) значений, входящих в это уравнение величин (5.3) – (5.6), приводит к следующей формуле:

$$\sigma_P = \frac{\lambda_П \sigma_o \left[(1 - П)^{2/3} V_{\text{з}} X^2 \right]}{k_{\text{р}} \cdot d_3^2}, \qquad (5.7)$$

где $\lambda_{\text{П}}$ – коэффициент пропорциональности, $\lambda_П = 7 \ldots 8$; $V_{\text{з}}$ – объемное содержание зерна.

Из формулы (5.7) видно также, что при постоянных значениях $П$, $V_{\text{з}}$ и $\sigma_{\text{о}}$, т.е. при заданной структуре АИ и определенной связке, на предел прочности σ_P будут влиять размер зерна d_3 и размер зоны контакта X.

В свою очередь, размер X зависит от связки и характеристик режимов ее спекания [69] и определяется из соотношения:

$$\left(\frac{X}{d_3} \right)^2 = \frac{A_Ф}{d_3^{\mu}}, \qquad (5.8)$$

где A – функция поверхностной энергии, вязкости, коэффициентов диффузии и длительности процесса; μ – коэффициент, характеризующий механизм спекания, $0 < \mu < 1$.

В связи с этим можно принять, что

$$\sigma_p \sim d_3^{-\mu}. \qquad (5.9)$$

Следовательно, прочность АИ обратно пропорциональна размеру зерна. Полученная зависимость (4.9) хорошо согласуется с известными экспериментальными данными [65, 244, 278], согласно которых прочность повышается с уменьшением зернистости материала.

Известно, что в матрице любого композиционного материала, в частности, в АИ, кроме макродефектов в виде пор и включений, существуют разнообразные микродефекты в мостиках связки и самом зерне инструмента. Возникновение микродефектов есть следствие нарушения процесса роста кристаллов зерна и т.п. Микродефекты в мостиках связки и зерне являются концентраторами напряжений, снижающими прочность инструмента.

Для определения коэффициента концентрации напряжений K_p рассмотрим модель мостика связки с дефектом в виде эллиптической трещины (рис. 5.1).

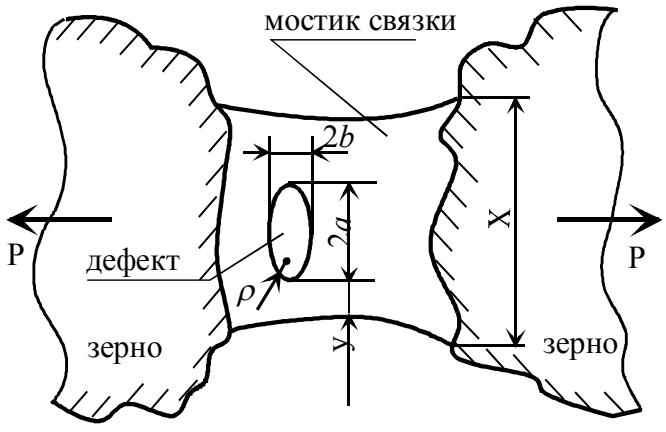


Рис. 5.1. Модель мостика связки с дефектом

С учетом положения микродефекта, расположенного внутри мостика связки, коэффициент концентрации напряжений $K_р$ можно оценивать по следующей формуле [56]:

$$K_р = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho_к}}\right)\left[\frac{\rho_к}{(\rho_к + 2y_м)}\right], \qquad (5.10)$$

где $\rho_к$ – радиус кривизны дефекта в вершине; $y_м$ – расстояние от периферии мостика связки до края дефекта.

Анализ этой формулы показывает, что наиболее опасными являются микродефекты, расположенные в периферийной части мостика связки, при y = 0, т.е. на наружной поверхности, а не внутри мостика связки. Устранение поверхностных дефектов, например, путем их «блокирования» специальными веществами, позволит значительно повысить прочность рабочей поверхности инструмента.

Аналогичные выводы можно сделать и относительно абразивного зерна, представляя его структуру в виде кристаллических блоков с порами и микротрещинами различного происхождения.

Следует отметить, что вследствие дефектности структуры мостиков связки природа величины σ_0 является статистической, что может приводить к отклонениям прочности $\sigma_р$ от значений, предсказываемых по формуле (5.7). Исходя из статистической теории разрушения хрупких материалов, в реальном АИ распределение мостиков связки и зерен по средним значениям их прочности можно описать функцией Вейбулла:

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left[-V_{мс}\left(\frac{\sigma_p - \sigma_{\min}}{P*}\right)^g\right], \qquad (5.11)$$

где $F(\sigma)$ – вероятность разрушения мостиков связки с прочностью в интервале от $\sigma_м$ до σ_P; $V_{мс}$ – объем мостиков связки; $\sigma_{\min}$ – минимальная прочность мостиков; g и $P*$ – параметры распределения.

Дифференцируя выражение (5.11) дважды и проводя алгебраические преобразования, получим вероятное значение прочности мостиков связки

$$\sigma_{мс} = \sigma_{\min} \cdot P^* \left[(g-1)/g\right]^{1/g} V_{мс}^{-1/g}. \qquad (5.12)$$

Из выражения (5.12) следует, что σ_0 возрастает с увеличением параметра g, характеризующего однородность (бездефектность) материала, и с уменьшением объема мостиков связки или с уменьшением размера абразивного зерна, так как уменьшение размера зерна в композите приводит и к уменьшению объема мостиков связки. Таким образом, исходная прочность АИ определяется его реальной структурой и, в частности, зернистостью инструмента, что было показано выше.

Рассмотрим вторую группу факторов Φ_2 и их влияния на изменения структурно-механических характеристик АИ, интегральным показателем которых является прочность. К этой группе факторов можно отнести параметры, характеризующие химический состав мостиков связки, абразивного зерна и окружающей его внешней среды, физико-химические потенциалы их взаимодействия в твердой и жидкой фазах, а также на межфазных границах их раздела.

Для решения данной проблемы в физико-химической механике используется полумакроскопический метод, основанный на выделении и анализе универсального макроскопического параметра, который связан как с химическим составом вещества и внешней среды, так и с величиной прочности изучаемого материала. Таким универсальным параметром является свободная поверхностная энергия $\Delta\sigma$ твердого тела, величина которой во всех случаях симбатна величине прочности тела [255].

Так как в данной работе изучается электрокорундовый абразивный материал и керамическая связка с известными физико-механическими свойствами и проводятся сравнительные оценки их механической прочности, группу факторов, отражающих химическую природу твердого тела, можно считать постоянными или заданными. В этом случае влияние второй группы факторов Φ_2 на прочность инструмента можно оценить, исходя из соотношения Гриффитса [253]:

$$\sigma_2 = \left(\frac{E\Delta\sigma}{L_d} \right)^{0,5}, \qquad (5.13)$$

где E – модуль упругости; L_d – размер дефекта структуры (трещины, поры и т.п.).

Для оценки изменения прочности инструмента по (5.13) при постоянных E и L требуется, прежде всего, знание причин и условий изменения свободной поверхностной энергии $\Delta\sigma$ исследуемых материалов под влиянием окружающей внешней среды. Априорным в физико-химической механике считается то, что одной из причин уменьшения величины $\Delta\sigma$ твердого тела, а, следовательно, и его прочности σ, является совместимость химической природы материала тела и внешней среды.

Компоненты электрокорундового АИ на керамической связке, т.е. абразивные зерна (Al_2O_3) и мостики связки (SiO_2), относятся к твердым телам с ионной связью и обладают сильной полярностью. По механизму действия на эти материалы внешняя среда делится:

– на поверхностно-активную (адсорбционно-активную) среду. Из этой среды происходит адсорбция ее поверхностно-активных элементов на поверхности компонентов АИ и по стыкам различных дефектов структуры, что приводит к адсорбционному понижению прочности зерен и связки [254]. К этой среде относятся вода, водяной пар, растворы электролитов, расплавы солей и металлов, водные СОЖ и т.п.;

– на неактивную (инактивную) среду – углеводородные вещества, которые практически не влияют на прочность и структуру корундового зерна и керамических материалов [50].

Существуют и другие виды внешних сред, относящиеся к агрессивным, такие как коррозионно-активные, химически растворяющие корундовые и керамические материалы и среды, образующие с этими материалами новые химические соединения. К таким средам относятся пары воды, растворы кислот и щелочей, расплавы солей и металлов и т.п. Эти среды, как правило,

сильно снижают прочность, вызывают старение, приводящее к необратимым изменениям в структуре рассматриваемых материалов.

В процессе шлифования, вследствие действия высоких удельных давлений и скоростей резания может образоваться среда, вызывающая эрозию абразивного зерна и связки [197, 288], что приводит к значительному снижению механической прочности зерна и связки.

Первичным актом действия внешней среды является адсорбция молекул ПАВ на поверхностях деформируемого тела. Оценить понижение поверхностной энергии тела $\Delta\sigma$ при адсорбции внешней среды можно по выражению [281]:

$$\Delta\sigma = RT\int_0^P \Gamma d(\ln p_П), \qquad (5.14)$$

где R – молярная газовая постоянная; T – абсолютная температура; Γ – величина адсорбции; $p_П$ – давление паров или жидкости среды.

Величина адсорбции, определяемая по уравнению Гиббса [5], зависит от концентрации поверхностно-активной среды и энергии смачивания.

В связи с тем, что при воздействии поверхностно-активной среды понижается свободная поверхностная энергия σ зерна, состоящего из кристаллов, то, исходя из положений физико-химической механики, можно ожидать не только понижение прочности, но и изменение характера его разрушения. При отсутствии такой среды будет наблюдаться как транскристаллитное, так и межкристаллитное разрушение с равной вероятностью, т.к. затраты энергии на эти виды разрушения практически одинаковы. Если же границы зерна находятся в контакте с активной средой, то межкристаллитное разрушение оказывается более вероятным [50].

Таким образом, приведенный анализ физико-химического состава электрокорундовых зерен и керамической связки абразивного инструмента, а также внешней среды (группа факторов Φ_2) показывает, что существуют определенные условия понижения исходной прочности исследуемых материа-

лов и характера их разрушения. Вместе с тем эти условия являются лишь необходимыми, но не достаточными.

Степень и форма влияния внешней среды на механическую прочность твердого тела зависит от его реальной дефектной структуры (группа факторов Φ_1). Разнообразные дефекты структуры, например, абразивного зерна как естественного (поры, спайности), так и искусственного (поверхностные микрощели и микротрещины) происхождения, обладая избыточной свободной энергией, становятся местами адсорбции активного компонента внешней среды и служат своеобразными каналами для его быстрой миграции к развивающимся новым зародышевым поверхностям микротрещин. Молекулы или атомы жидкости активной среды, диффундируя по стенкам микрощелей, достигают узкого участка, где давят на стенки щели. Возникающее при этом внутренние напряжения, в результате расклинивающего действия адсорбционных слоев молекул среды, могут достигать значительной величины – порядка 100 МПа [77]. Вследствие этого прочность тела при его разрушении будет снижаться.

Таким образом, дефекты структуры как первоначально присутствующие в твердом теле, так и возникающие в процессе его деформирования, при взаимодействии с активной внешней средой, облегчают его деформирование и разрушение.

Среди факторов третьей группы Φ_3, учитывающих внешние воздействия, важная роль принадлежит термообработке. Влияние температуры на изменение структурно-механических свойств сказывается различным образом. В результате термообработки дефектных хрупких тел возможны как случаи их упрочнения, так и случаи разупрочнения. Бездефектные высокопрочные хрупкие тела однозначно снижают свою прочность при нагревании [279, 291]. Кроме того, термообработка может также сильно влиять на исходные структурные свойства твердых тел, вызывая рекристаллизацию, фазовые превращения, перемещение дислокаций и другие изменения. Все это также может сказаться на степени проявления адсорбционных эффектов и измене-

ние прочности твердого тела. Степень и характер влияния температуры на структурно-механические свойства АИ зависят, в свою очередь, от ее величины, скорости нагрева, времени выдержки тела при заданной температуре и среды нагревания, а также от перепада температур и интенсивности охлаждения нагретого тела. Все это сильно затрудняет теоретическое предсказание поведения исследуемого материала после его термообработки.

Для выявления взаимосвязи степени влияния термообработки на прочностные свойства абразивных зерен при их разрушении необходимо знать, какие возникают напряжения внутри зерна после его нагрева и охлаждения. В работе [185] такие напряжения рекомендуется определять по следующему соотношению:

$$\sigma_{max} = \frac{E_з \cdot \alpha \cdot T_{ср} \cdot K_ф}{2(1-2\mu)}, \qquad (5.15)$$

где $E_з$ – модуль упругости зерна, $E = 36{,}5 \cdot 10^3$ МПа; α – коэффициент термического расширения, $\alpha = 6{,}4 \cdot 10^{-6}$ $^oК^{-1}$; $T_{ср}$ – среднеинтегральная температура по сечению зерна в $^oК$; μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0{,}10 \div 0{,}15$; $K_ф$ – коэффициент формы зерна, $K_ф = 1{,}1 \div 2{,}7$.

Кроме этого, при разрушении зерна на фронте образовавшихся трещин расходуется необходимое количество поверхностной энергии $\Delta\sigma$, которая по теории пластичности [90] определяется следующим образом:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{max}^2 \cdot A}{2E\rho_0}(1-2\mu), \qquad (5.16)$$

где A – плотность поверхностной энергии; ρ_0 – плотность материала зерна до разрушения.

Степень закалки при термообработке абразивных зерен можно характеризовать числом скалываний и размерами осколков зерен, образовавшихся при их разрушении путем раздавливания. Для вычисления геометрических размеров частиц осколков d_r необходимо дополнительно определить поверхностную энергию $\Delta\sigma$ для шаровидной частицы скола, которая равна

$$\Delta\sigma = \pi \cdot A \cdot d_r^2 . \qquad (5.17)$$

Совместно решая и преобразовывая уравнения (5.15), (5.16) и (5.17) получим, что

$$d_r = \frac{2\pi A(1-2\mu)}{E\alpha^2 \cdot T_{\text{ср}}^2 \cdot K_{\text{ф}}}. \qquad (5.18)$$

Предполагая, что размеры осколков одинаковы, искомое их число N при разрушении зерна будет

$$N = \frac{d_3}{d_r} = \frac{d_3 \cdot E\alpha^2 T_{\text{ср}}^2 \cdot K_{\text{ф}}}{2\pi A(1-2\mu)}. \qquad (5.19)$$

Отсюда минимально необходимая температура закалки зерна равна

$$T_{\text{ср min}} = \left(\frac{2\pi A(1-2\mu)N}{E\alpha^2 \cdot d_{\text{з}} \cdot K_{\text{ф}}} \right)^{0,5} . \qquad (5.20)$$

В результате проведенных теоретических исследований определена функциональная взаимосвязь числа осколков (скалываний) зерна со степенью его закалки и получены уравнения, дающие возможность рассчитать минимальную необходимую температуру термообработки зерна для обеспечения его самозатачиваемости в процессе шлифования. Полученные зависимости позволяют прогнозировать характер разрушения закаленного зерна, средний размер и число осколков с учетом физико-механических свойств абразивного материала, что имеет практическое значение для обеспечения технологий регуляции и стабилизации характеристик и показателей АИ.

Другим фактором, относящимся к третьей группе (Φ_3), является импрегнирование серой АИ. Это внешнее технологическое воздействие также будет влиять на прочность композита, блокируя различные дефекты его структуры и образуя дополнительный упрочняющий каркас внутри порового пространства инструмента. Как в случае термообработки, так и в случае импрегнирования инструмента задача определения зависимости прочности композита от этих воздействий возможна пока только экспериментальным путем. Несмотря на это, представленная модель влияния внешних факторов

на прочность композита позволяет выявить не только причины и условия изменения прочности, но и вскрыть механизм процесса влияния среды и внешних воздействий на структурно-механические характеристики инструмента, а также наметить пути устранения негативных явлений от действия внешней среды.

5.2. Экспериментальная проверка влияния внешних факторов на прочность абразивных зерен и черепка инструмента

Необходимость исследования влияния внешних факторов на прочностные свойства абразивных зерен диктуется следующими обстоятельствами. Во-первых, знание и оценка механических свойств абразивных зерен с точки зрения их структуры, имеющей различные дефекты, позволяет прогнозировать изменчивость их прочности при разрушении в различных средах.

Несмотря на многочисленные экспериментальные исследования [38, 84, 179, 180, 231 и др.] по определению макро- и микромеханических свойств различных абразивных материалов, до сих пор остаются не изученными многие вопросы, касающиеся влияния внешней среды на эти материалы. В связи с этим была предпринята попытка изучить характер изменчивости механических свойств абразивного зерна при воздействии на него внешней среды. В качестве объекта исследований были выбраны зерна электрокорунда белого марки 25А зернистостью F60, F46, F30. Прочность абразивных зерен определялась на приборе конструкции ВНИИАШ [297].

Выбор в качестве внешней среды воды и керосина, а в качестве воздействия термообработки обусловлено следующим. Вода является активной средой для гидрофильных электрокорунда и керамической связки, а также основной компонент водных СОЖ, керосин – инактивной средой и входит в состав керосиномасляных СОЖ, термообработка была применена в качестве воздействия, удаляющего адсорбционную влагу и загрязнения с поверхности абразивных зерен.

На рис. 5.2 представлены отдельные гистограммы распределения разрушающей нагрузки зерен (исходных, выдержанных в керосине, в воде, спирте и термообработанных). По оси ординат отложена частость, а по оси абсцисс – разрушающая нагрузка *P*.

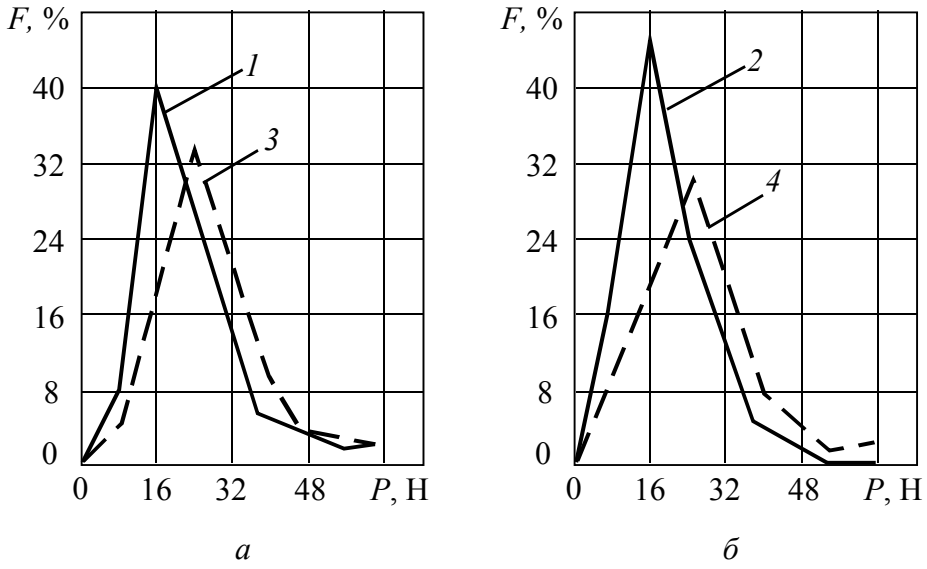


Рис. 5.2. Распределение разрушающей нагрузки: *1* – для исходных зерен; *2* – для зерен, выдержанных в воде; *3* – для зерен, выдержанных в керосине; *4* – после термообработки при $T = 450 \ldots 500$ °С

Анализ данных рис. 5.2 показывает следующее. Во-первых, отмечается крайняя степень неоднородности прочности зерен, пределы колебаний разрушающей нагрузки составляют от 3 до 64 Н. Во-вторых, вид распределения имеет несимметричный характер с максимумом в области достаточно малых нагрузок (от 16 до 24 Н). Для зерен, выдержанных в воде, гистограмма распределения сужается, и значения максимальных нагрузок уменьшаются по сравнению с исходными. Обратная тенденция наблюдается для зерен и после термообработки. Кривая распределения смещается в сторону большей вероятности разрушения при больших нагрузках. Керосин, являясь инактивным веществом, практически не изменяет прочностные свойства электрокорундового зерна.

Для аппроксимации экспериментальных данных была использована статистическая функция распределения Вейбулла [339]:

$$F(P) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{P}{P_o} \right)^m \right], \qquad (5.21)$$

где P – наблюдаемое значение разрушающей нагрузки; P_o – среднее значение нагрузки; m – показатель дефектности материала.

Следует отметить, что статистическая теория разрушения Вейбулла для хрупких материалов позволяет количественно описать распределение дефектов материалов через дисперсию прочности показателем m, характеризующим дефектность исследуемого материала [310, 324]. С повышением степени однородности материала увеличивается значение величины m. Параметр m также чувствителен к изменению состояния поверхности материала, температуры испытаний и воздействию внешней среды [56, 113].

Влияние внешней среды на прочность зерен и показатель m представлено на рис. 5.3. Из этого рисунка видно, что величина показателя m по Вейбуллу уменьшается при разрушении зерен, выдержанных в воде, и увеличивается у зерен, выдержанных в спирте и термообработанных по сравнению с исходными. Зерна, выдержанные в керосине, имеют практически такой же показатель m, как и исходные зерна. Это указывает на изменение дефектности исследуемых абразивных зерен под влиянием внешней среды при их разрушении.

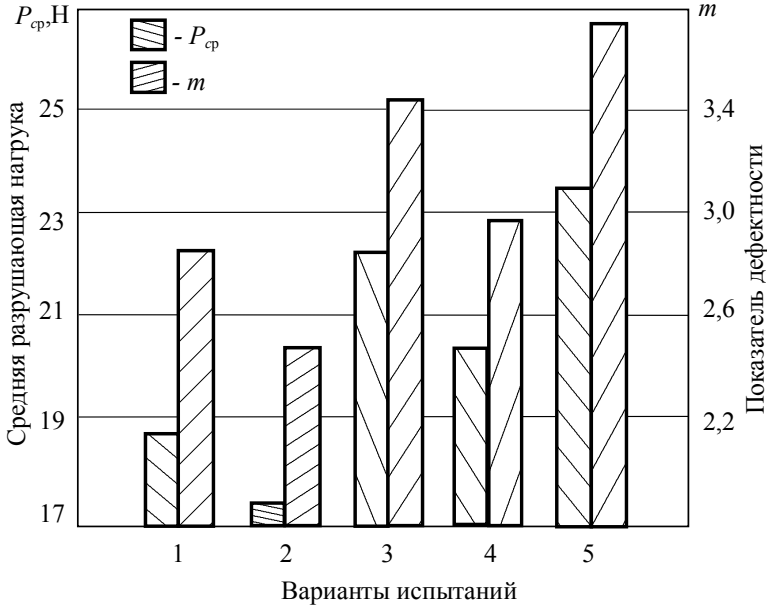


Рис. 5.3. Влияние внешней среды на прочность и показатель дефектности зерен 25А40: *1* – исходное; *2* – вода; *3* – спирт; *4* – керосин; *5* – термообработка

Как видно из рис. 5.3, более высоким значениям показателя m соответствует более высокая средняя прочность зерен. Эта связь между величиной m и средней прочностью зерен дает возможность управления структурно-механическими характеристиками абразивного зерна за счет изменения их первоначальной исходной дефектности, например, путем «залечивания» или «цементирования» микротрещин и других дефектов.

Анализ этих данных показывает следующее. Воздействие внешней среды на прочность абразивного зерна проявляется в разной степени. Термообработка и обработка абразивного зерна спиртом повышает его прочность по сравнению с исходным зерном на 18 … 20 %. Исходное зерно, выдержанное в воде, при испытаниях на сжатие имеет пониженную на 10 % прочность. Обработка керосином заметного влияния на среднестатистическую прочность зерна не оказывает. Следует отметить, что у термообработанного зерна после выдержки его в воде (10 суток) и на воздухе (40 суток) снижается прочность до прочности исходного значения с одновременным уменьшением числа зерен максимальной прочности. Это свидетельствует о действии адсорбционного эффекта понижения прочности. Покрытие термообработанных зерен пленкой серы повышает их прочность на 30… …35 % по сравнению с исходными и будет способствовать предохранению их от действия внешней среды.

Следует отметить, что после термообработки абразивных зерен при раздавливании изменяется характер их разрушения. Если исходное зерно разрушается за 1 … 2 скола, то термообработанное зерно разрушается постепенно за 4 … 7 сколов. При раздавливании исходного зерна наблюдается глухой звук разрушения, а термообработанное зерно при разрушении издает резкие хрустящие звуки при каждом сколе. Это можно объяснить следующим образом. При термообработке зерна протекают одновременно два процесса: разупрочнение и упрочнение. Первоначально при нагреве за счет растягивающих усилий идет образование новых микротрещин в тонком поверхностном слое зерна, и увеличиваются размеры уже существующих дефек-

тов. Одновременно с этим удаляются адсорбционная влага и другие загрязнения с поверхности микротрещин зерна. Затем при охлаждении за счет сжимающих напряжений в поверхностном слое происходит «залечивание» микротрещин путем уменьшения глубины дефектов, релаксации напряжений на дне микротрещин.

За счет появления новых микротрещин в поверхностном слое зерно после термообработки охрупчивается, но при этом повышается его прочность за счет «залечивания» опасных при разрушениях дефектов. Зерно становится более «однородным» по структуре, а значит и менее дефектным. Кроме этого, упрочнение термообработкой зерен происходит и за счет создания остаточных сжимающих напряжений на их поверхности, которые снижают растягивающие напряжения во внутренних слоях зерна при его разрушении.

Для подтверждения вышесказанного проводились дополнительные эксперименты, методикой которых было предусмотрено проведение термообработки зерен при следующих температурах: 150, 300, 450, 600 и 850 ^{o}C с последующим их охлаждением на воздухе. При раздавливании испытуемых зерен на приборе ВНИИАШ одновременно фиксировалась величина разрушающей нагрузки и характер разрушения по сколам. За меру охрупчивания зерна после термообработки принималось количество зерен, дающих при разрушении не менее 4 – 5 мелких сколов с резким хрустящим звуком. Результаты этих испытаний представлены на рис. 5.4.

Полученные зависимости прочности P и количества охрупченных зерен n от температуры обработки T носят возрастающий характер и описывается следующими формулами:

$$P = 10{,}5 + 5{,}4T^{(0{,}12+3{,}0T\cdot 10^{-5})}, \qquad (5.22)$$

$$n = 21{,}4 + 8{,}5T^{(0{,}16+1{,}2T\cdot 10^{-4})}. \qquad (5.23)$$

Анализ полученных данных позволяет отметить, что термообработанные абразивные зерна в интервале температур 20 … 850 ^{o}C после охлаждения их на воздухе увеличивают свою прочность и повышается степень их охруп-

чивания. При температуре (600 … 850 °С) нагрева интенсивность возрастания прочности зерен и их охрупчивание снижается. Оптимальным вариантом следует считать термообработку зерен в интервале температур 450 … 500 °С, в связи с тем, что при такой температуре обработки наблюдается и максимальное удаление адсорбционной влаги и органических загрязнений [24]. Ниже показано, что такой интервал температур термообработки инструмента в целом также соответствует требованиям по его термостойкости.

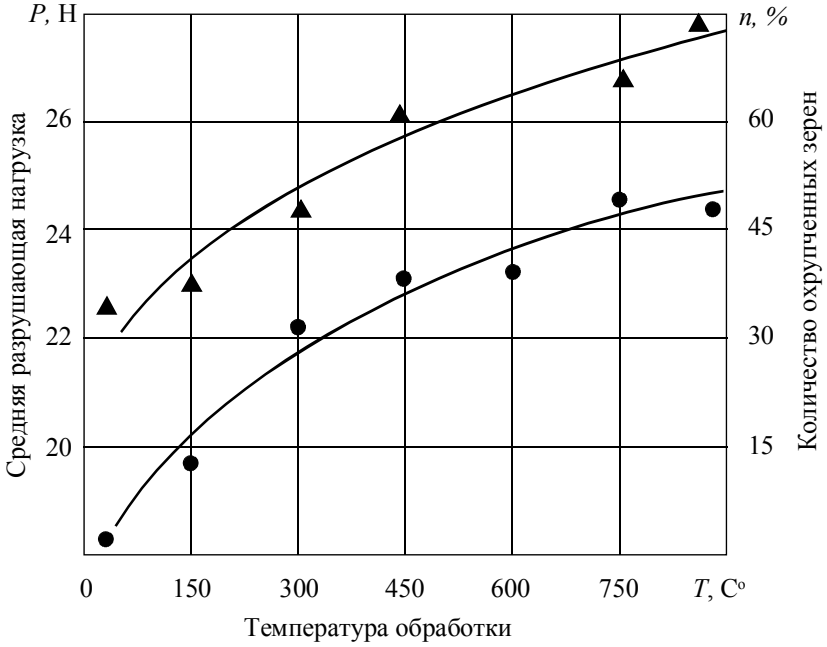


Рис. 5.4. Зависимость прочности и количества охрупченных зерен от температуры обработки: • – $P = f(T)$; ▲ – $n = f(T)$

Следует отметить положительную сторону охрупчивания зерен после термообработки. У таких зерен в процессе шлифования усиливается способность к самозатачиванию и обновлению своих режущих кромок, что благоприятно скажется на динамике процесса шлифования, стойкости инструмента и качестве обработанной поверхности изделия.

Представленные результаты исследований свидетельствуют о существенном влиянии среды и внешних воздействий на прочностные свойства электрокорундового абразивного зерна, что является основой для выбора рациональных способов регулирования его потенциальными возможностями с целью повышения эффективности процесса шлифования.

С целью проверки теоретических положений феноменологической модели механизма и установления закономерностей влияния внешней среды на механические свойства АИ были проведены испытания на статический изгиб брусков, вырезанных из шлифовальных кругов с характеристикой 25AF60L6V на керамическом связующем К5 с различными зернистостями – F80, F60, F46. Бруски имели размеры в сечении 20 х 20 мм и длиной 120 мм.

Методикой были предусмотрены следующие испытания: исходных брусков; брусков, выдержанных в дистиллированной воде в течение одних суток; брусков, термообработанных при 450 … 500 ^{o}C и охлажденных на воздухе; брусков, импрегнированных серой. Испытания проводились по схеме центрального нагружения двухопорной балки на испытательной машине ZDM 2,5/91. Все испытания проводились при 30 … 40 % относительной влажности воздуха и температуре 20 … 22 ^{o}C.

На рис. 5.5 представлены результаты определения предела прочности на изгиб брусков различной зернистости при воздействии внешней среды.

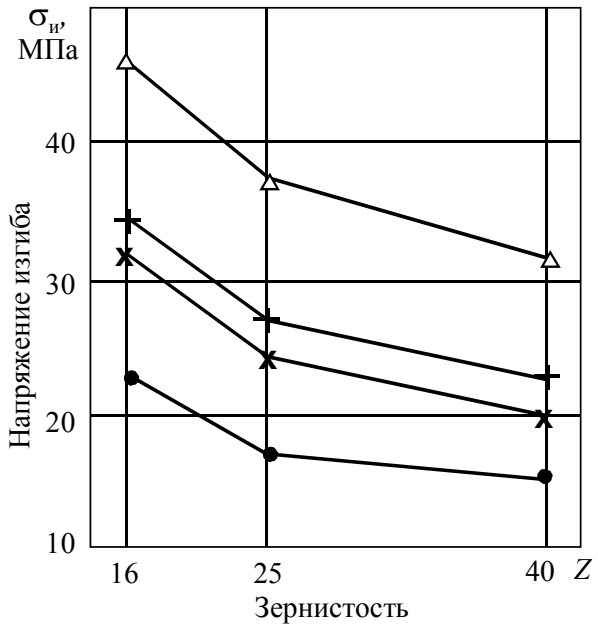


Рис. 5.5. Зависимость прочности от зернистости брусков и влияния внешней среды и воздействий: x – исходный; • – вода; + – термообработка; Δ – импрегнированный

Аппроксимация кривых на рис. 4.5 позволяет описать зависимость прочности на изгиб от зернистости образцов инструмента следующим выражением:

$$\sigma_u = A \cdot Z^{-\partial}, \qquad (5.24)$$

где A – постоянный коэффициент; ∂ – показатель степени.

Значения коэффициентов A и показателей ∂ представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Значения коэффициентов A и показателей ∂

Вид воздействия	Исходный образец	Образец, обработанный водой	Термообработанный образец	Импрегнированный образец
Постоянный коэффициент A	135,1	91,16	81,89	146,8
Показатель степени ∂	0,518	0,506	0,338	0,412

Характер изменения прочности брусков с заданной зернистостью меняется в зависимости от состава внешней среды. Бруски, выдержанные в воде, имеют прочность в 1,3 … 1,5 раза меньшую, чем исходные. У термообработанных брусков прочность повышается незначительно и практически равна прочности исходных брусков. Это связано с тем, что при термической обработке действуют сразу два механизма, влияющих на структурно-механические свойства брусков. Первый механизм за счет удаления адсорбционной влаги и других загрязнений с внешней и внутренней поверхностей пористого черепка бруска способствует залечиванию разнообразных дефектов структуры, особенно микротрещин. Другой механизм обратного действия разупрочняет структуру за счет термических напряжений, возникающих при нагреве и охлаждении из-за различных значений коэффициента термического расширения зерна и материала связки.

Импергнирование брусков серой резко повышает их прочность по сравнению с исходными. Импрегнированные бруски с зернистостью 16 имеют прочность в 1,4 раза, а с зернистостью 40 – в 1,6 раза большую исходных.

Это объясняется «цементирующим» действием импрегнатора. Расплав серы при пропитке проникает в доступные ему макро- и микротрещины черепка бруска, а при охлаждении сера, застывая, «цементирует» эти дефекты структуры черепка. По данным [78] твердость отвердевшей серы, замеренная при помощи твердомера ТП-2, соизмерима с твердостью черепка АИ на керамическом связующем.

Одновременно с этим ставилась задача определения периода времени, в течение которого сохраняются приобретенные при термообработке прочностные свойства АИ. Для этого проводились исследования с термообработанными образцами при различных условиях их хранения через равные промежутки времени. Полученные результаты исследований, представленные в табл. 5.2, показывают, что прочность термообработанных образцов 25AF60L7V при относительной влажности воздуха 60 … 75 % снижается до прочности исходного образца в течение 2 … 3 суток хранения, а при выдерживании их в воде – за три часа. Отсюда следует, что технологическая подготовка АИ только путем его термообработки и закалки с целью улучшения его эксплуатационных качеств практически не обосновано, особенно при работе с водными СОЖ.

Т а б л и ц а 5.2

Время сохранения прочности термообработанного образца инструмента 25AF60L7V

Время хранения	Условия хранения		
	На воздухе W = 25 – 40 %	На воздухе W = 60 – 75 %	Водная среда W = 100 %
t, ч	150 – 160	24 – 36	3 – 4

В этих случаях необходимо решение задачи по защите АИ от воздействия СОЖ и окружающей среды и дальнейшего повышения его твердости и прочности инструмента за счет «залечивания» дефектов в структуре инструмента.

Одним из эффективных путей защиты АИ на керамической связке от воздействия активной внешней или технологической среды (СОЖ) является гидрофобизация как внешней, так и внутренней поровой поверхности инструмента.

В настоящее время для этих целей широко используется импрегнирование абразивного инструмента серой, являющейся гидрофобным веществом. Из данных рис. 5.5 видно, что у образцов инструмента, импрегнированных серой, прочность в 1,44 … 1,58 раза выше, чем у исходных и в среднем в 1,3 раза больше по сравнению с термообработанными. Особенно важен тот факт, что у импрегнированных образцов, выдержанных в воде в течение двух месяцев, прочность и твердость не изменилась.

В связи с этим возникает необходимость введения в технологичсекую подготовку АИ второго регулирующего и стабилизирующего воздействия в виде операции импрегнирования инструмента не только гидрофобными веществами, но и способными «цементировать» микротрещины в зоне контакта зерна связкой, например, расплавом серы.

Параллельно с определением прочности образцов замерялась твердость этих образцов пескоструйным методом. Данные этих замеров представлены в табл. 5.3. Анализ данных показывает следующее. Образцы, выдержанные в воде, снижают свою твердость в пределах одной степени, что также свидетельствует об адсорбционном понижении прочности самих абразивных зерен, сцепления зерна со связкой и мостиков связки, соединяющих зерна между собой.

Обращает на себя факт, что термообработанные образцы имеют практически такую же твердость по глубине лунки, что и исходные. Это объясняется тем, что термообработка не устраняет тех изначальных дефектов в зоне контакта зерна со связкой в виде микротрещин разрыва, о которых упоминалось выше. Из табл. 5.3 видно, что твердость у импрегнированных серой образцов значительно выше, чем у исходных и термообработанных. Так, у им-

прегнированных образцов их твердость оказалась примерно в 1,5 раза (на 1 … 2 степени) больше, чем у исходных термообработанных образцов.

Таблица 5.3

Результаты измерений твердости пескоструйным методом

Характеристика образцов инструмента	Твердость по глубине лунки, мм			
	Исходный образец	Выдержанный в воде образец	Термообработанный образец	Импрегнированный серой образец
25AF46L6V	5,0	5,5	4,9	3,2
25AF60L6V	5,	6,3	5,6	3,6
25AF80L6V	5,7	6,4	5,8	3,7

Таким образом, полученные данные по прочности и твердости свидетельствуют о необходимости проведения, как термообработки АИ, так и его импрегнирования гидрофобными, способными «цементировать» дефекты структуры, веществами с целью повышения и стабилизации структурно-механических характеристик АИ.

5.3. Исследование влияния внешних факторов на износостойкость инструмента

Одним из основных эксплуатационных показателей АИ, характеризующих эффективность и качество шлифования, является их износостойкость. Этот показатель отражает не только физико-механические, но и технологические стороны процесса шлифования. При изнашивании инструмента теряются его первоначальная геометрическая форма рабочей поверхности и режущие свойства, приводящие к снижению интенсивности съема металла и ухудшению качества поверхностей деталей.

Результаты исследований по вопросам износа и износостойкости рассматривались практически во всех работах, посвященных абразивной обработке изделий. Однако в большинстве работ изучалось лишь влияние струк-

турных особенностей и состава черепка инструментов, режимов обработки, вида СОЖ и физико-механических свойств металлов и других материалов на процессы изнашивания АИ. До сих пор мало работ по исследованиям влияния внешней среды и технологических воздействий на износостойкость инструментов на керамическом связующем, а известные работы по этим вопросам носят в основном эмпирический характер без достаточного теоретического обоснования полученных результатов исследований.

Следует отметить работу В. М. Шумячера [311], в которой износ брусков при суперфинишировании исследован на основе положений кинетической и энергетической теорий разрушения композитов. Это позволило дать объяснение и выявить аналитические зависимости влияния различного вида СОЖ на процесс износа брусков. Было показано, что изменяя поверхностную энергию рабочего слоя инструмента путем подбора соответствующих СОЖ, можно в широком диапазоне понижать или повышать его износостойкость.

Развивая эти положения нами предпринята попытка исследовать влияние на износостойкость не только водных и углеводородных СОЖ, но и технологических воздействий, таких как термическая обработка и импрегнирование черепка инструмента. При этом, в первую очередь, ставилась задача получения взаимосвязи между износостойкостью $H_и$ инструмента и прочностными свойствами, а также удельной энергоемкостью процесса изнашивания.

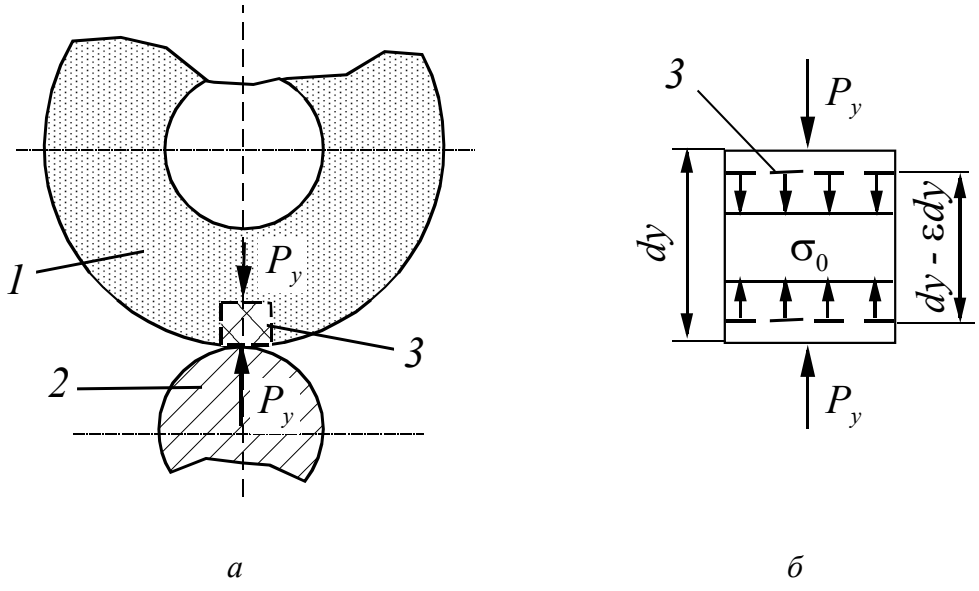
Известно, что износ АИ при шлифовании предопределяется первоначальным сжатием его поверхностного рабочего слоя в местах контакта с поверхностью обрабатываемой детали и последующими сдвиговыми деформациями, которые приводят, в конечном счете, к истиранию абразивных зерен, вырыванию их из связки и разрушению мостиков связки.

Для энергетической оценки параметров процесса изнашивания рассмотрим действие внешних сил P_y на объемный элемент *3* инструмента *1* (рис. 5.6, *б*). От действия сжимающей нагрузки P_y в сечениях элемента *3* возникают напряжения σ_0 и относительные смещения εdy. При этом работа

внешних сил *dA* при деформации и разрушении элемента *3* может быть определена следующим образом [43]:

$$dA = \frac{1}{2}\sigma \cdot \varepsilon dy \cdot F = \frac{1}{2}\sigma \cdot \varepsilon dV, \qquad (5.25)$$

где F – площадь сечения элемента; V – объем износа.



а *б*

Рис. 5.6. Схемы для определения работы сил P_y при деформации элемента *3* и удельной энергоемкости процесса изнашивания инструмента *1* при шлифовании детали *2*: *а* – общая схема; *б* – схема сил и напряжений в элементе *3*

Процесс изнашивания рабочей поверхности АИ будет происходить при условии превышения внутренних напряжений σ_0 предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ черепка инструмента. В таком случае, интегрируя выражение (5.25), получим, что затраченная работа *A* на изнашивание имеет прямо пропорциональную связь с квадратом прочности инструмента, величиной объемного износа *V* и обратно пропорциональную связь с удвоенным числом модуля упругости черепка инструмента в следующем виде:

$$A = \frac{\sigma_{сж}^2 \cdot V}{2E}. \qquad (5.26)$$

Отсюда определим величину износа *V* за время *t*:

$$V_И = \frac{2A_p \cdot E}{\sigma_{сж}^2 \cdot t} \qquad (5.27)$$

и износостойкость инструмента:

$$H_{\text{и}} = \frac{1}{V_{И}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}^2 \cdot t}{2EA_p} = \frac{\sigma_{\text{сж}}^2}{2EP_z \cdot V_{\text{р}}}, \qquad (5.28)$$

где P_z – сила резания при шлифовании; $V_{\text{р}}$ – скорость резания.

Анализ формулы (5.28) показывает, что износостойкость инструмента, в первую очередь, зависит от его прочностных и упругих свойств, а также от режима шлифования.

Как было показано выше, черепок инструмента на керамической связке представляет собой дефектную пористую структуру с гидрофильными свойствами. В связи с этим под влиянием внешней среды в виде повышенной влажности окружающего воздуха или водных СОЖ происходит адсорбционное понижение прочности черепка (рис. 5.5). В то же время под воздействием термообработки и импрегнирования черепка расплавом серы происходит его упрочнение. Поэтому, согласно выражению (5.28), будет соответственно изменяться износостойкость АИ.

Для экспериментальной проверки теоретических выводов о степени влияния внешней среды и оценки эффективности регулирующих воздействий на износостойкость АИ брались образцы, вырезанные из шлифовальных кругов, с характеристиками 25AF46L6V, 25AF60L6V и 25AF80L6V размерами 22 х 22 х 5 мм. Испытания образцов проводилось на приборе «Шлиф» конструкции ВНИИАШ, который представляет собой малогабаритную машину трения. Устройство и методика использования этого прибора подробно описаны в работе [246]. В качестве внешней среды применялись: дистиллированная вода и керосин с целью исключения побочных примесей в водных и углеродных СОЖ. В качестве регулирующих технологических воздействий использовались: термообработка при T = 500 $^{\text{o}}$C и импрегнирование образцов расплавом серы.

Полученные результаты экспериментальных исследований влияния внешней среды и воздействий на износостойкость инструментов представле-

ны на рис. 5.7. Видно, что образцы, выдержанные в воде в течение одних суток, в зависимости от зернистости имеют износостойкость в 1,17 ÷ 1,45 раз ниже, чем исходные образцы.

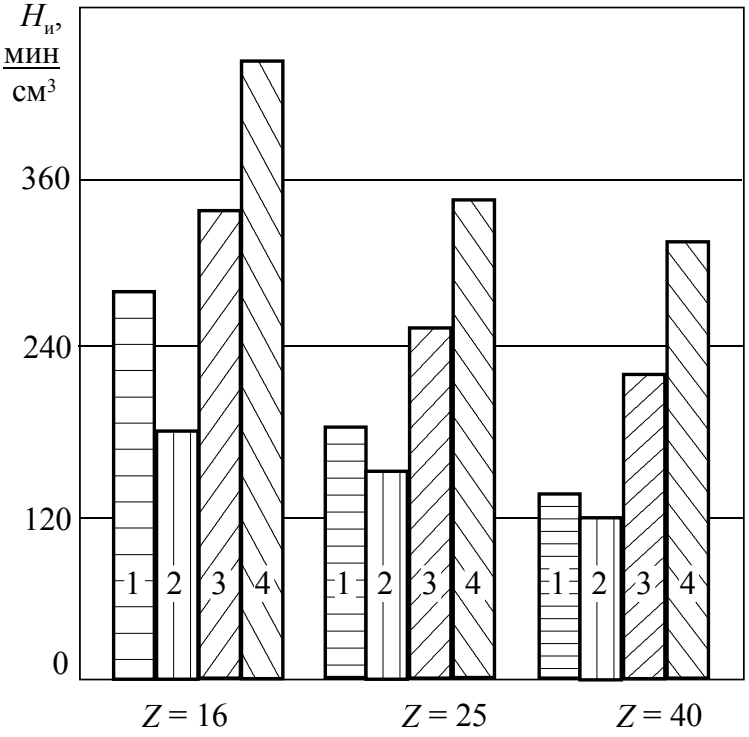


Рис. 5.7. Влияние внешней среды и воздействий на износостойкость инструментов 25А (F80 – F60– F46) L6V: *1* – исходный образец; *2* – вода; *3* – термообработанный; *4* – импрегнированный

Как показали испытания, керосин практически не оказывает влияния на износостойкость АИ. Образцы инструментов, выдержанные в керосине, при диспергировании имеют износостойкость в зависимости от зернистости только в 1,10 ÷ 1,15 раз выше, чем исходные образцы. Керосин, являясь неполярным углеводородным веществом, инактивен к электрокорунду и керамической связке. В связи с этим при изнашивании образцов, выдержанных в керосине, не проявляется эффект адсорбционного понижения твердости. Наоборот, образцы, выдержанные в керосине, имеют прочность несколько выше, чем исходные (рис. 5.5). Это, по нашему мнению, вызвано тем, что керосин вытесняет с поверхности образцов адсорбированную влагу и различные загрязнения, которые всегда присутствуют при хранении АИ.

Термообработка образцов, путем их прокалки при T = 500 ^{o}C и последующей закалкой с охлаждением на воздухе, как видно из рис. 5.7, дает повышение износостойкости в 1,2 ÷ 1,3 раза по сравнению с исходными образцами. Это можно объяснить следующим образом. При такой температуре прокалки с поверхности и порового пространства образцов полностью удаляются как адсорбционная влага, так и другие загрязняющие вещества, способствующие понижению прочности (твердости). Результаты взвешивания образцов до и после термообработки на аналитических весах показывают уменьшение массы исследуемых образцов на 0,3 … 0,8 %, что подтверждает вышесказанное. Аналогичные результаты были получены и в работе [321] при термообработке шлифовальных кругов на керамической связке с различными характеристиками. Таким образом, за счет устранения причин адсорбционного понижения прочности путем термообработки происходит повышение износостойкости исследуемых образцов АИ. Однако, как было показано выше (табл. 5.2), эффект упрочнения АИ за счет термообработки сохраняется непродолжительное время при хранении инструмента, а при использовании водных СОЖ пропадает практически мгновенно.

Из рис. 5.7 видно, что у образцов инструмента, импрегнированных серой, износостойкость в 1,8 ÷ 2,1 раза выше, чем у исходных и в 1,4 ÷ 1,7 раза больше по сравнению с термообработанными образцами. Это объясняется тем, что сера является гидрофобным веществом и, попадая внутрь черепка инструмента в виде расплава, способствует «цементированию» макро- и микротрещин в зоне контакта абразивных зерен с мостиками связки. Гидрофобизация как внешней, так и внутренней поровой поверхности АИ, а также «залечивание» дефектов их структуры способствует значительному повышению прочности черепка, что сказывается и на износостойкости инструмента.

Для выявления характера корреляционной связи между показателями износостойкости $H_{и}$ образцов инструментов и их прочностью было проведено сопоставление этих показателей при одинаковых условиях влияния внеш-

них факторов. Установленная зависимость представлена на рис. 5.8, которая с практической достоверностью аппроксимируется следующей формулой:

$$H_{\text{и}} = \sigma_{\text{и}}^2 \left(1 + \exp 0{,}027\sigma_{\text{и}}\right)^{-1}. \qquad (5.29)$$

Рассматривая и сравнивая структуру формул (5.28) и (5.29) между собой, видно, что зависимость износостойкости от прочности, полученной при теоретических исследованиях, имеет такую же зависимость, определенной экспериментальным путем. Это дает возможность обоснованно с учетом влияния внешней среды и воздействий прогнозировать величину износа и расход АИ через их прочностные характеристики.

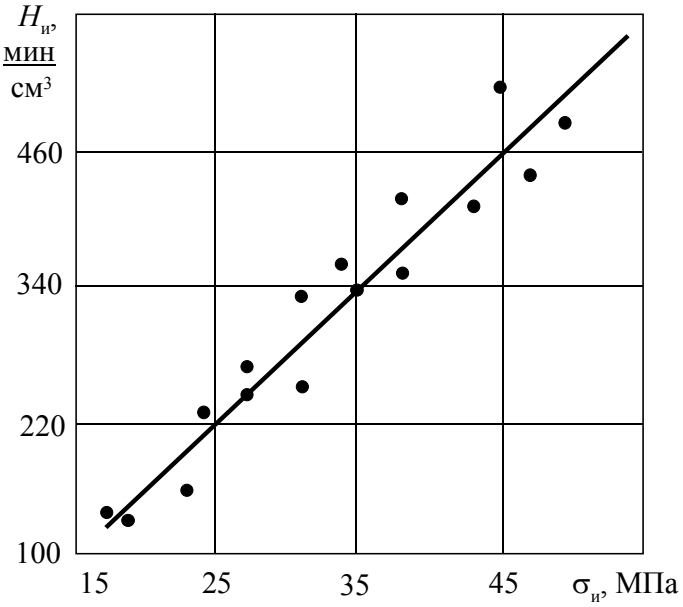


Рис. 5.8. Зависимость износостойкости $H_{\text{и}}$ образцов инструментов от их механической прочности $\sigma_{\text{и}}$

Отмеченные выше особенности влияния внешних факторов на прочностные свойства и износостойкость позволяют рассматривать, например использование термообработки и импрегнирования черепка инструмента как важнейшие средства модификации АИ при их совершенствовании.

5.4. Выводы

1. Разработана феноменологическая модель механизма влияния внешних факторов на прочностные свойства АИ на керамическом связующем, учитывающая реальную структуру композита, физико-химические взаимодействия зерна и связки с внешней средой, а также физико-механические воздействия на инструмент. Экспериментально подтверждена зависимость прочности абразивного зерна и инструмента в целом от действия внешних факторов. Установлено, что прочность в зависимости от состава среды может как повышаться, так и понижаться, и эти изменения носят обратимый характер.

2. Вскрыт механизм процесса упрочнения и охрупчивания термообработанных абразивных зерен, выражающийся в повышении микрохрупкости за счет уменьшения их дефектности. Определен характер изменения дефектности зерен под влиянием внешних воздействий.

3. Установлены зависимости изменения прочности и твердости от зернистости инструмента и внешних факторов, в том числе от продолжительности и условий хранения инструмента, которые указывают на необходимость разработки технологических мероприятий по защите инструмента от негативного воздействия внешней среды.

4. Теоретически и экспериментально подтверждена зависимость износостойкости АИ от действия внешних факторов через изменение их прочностных свойств. Установлена тесная корреляционная связь между износостойкостью и механической прочностью инструментов.

5. В результате комплексных теоретико-экспериментальных исследований вскрыты и научно обоснованы физико-химические особенности влияния внешней среды, термообработки и импрегнирования на структурно-механические свойства электрокорундового абразивного зерна и инструмента не керамическом связующем. Полученные результаты позволяют наметить пути создания инструмента с регламентированными и стабильными во времени функциональными характеристиками.

6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ИМПРЕГНИРОВАНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

6.1. Исследование процесса пропитывания абразивных инструментов импрегнаторами

В качестве импрегнаторов используются различные составы химических веществ в виде жидкостей, растворов, эмульсий, суспензий, расплавов и т.п. Эти вещества, проникая в черепок инструмента в процессе его пропитки, фиксируется в порах и капиллярах. К основным технологическим свойствам импрегнаторов относятся их смачиваемость, растекаемость, адгезия и способность впитываться в пористые материалы. На эти свойства оказывают существенное влияние внешние факторы: температура, влажность, состояние межфазного контакта, концентрация и полярность загрязняющих веществ.

Аналитический обзор [47, 66, 230, 275, 305, 306] по физико-химическим основам процессов смачивания и пропитывания различных материалов и тел позволил разработать структурную схему влияния внешних факторов на эти процессы (рис. 6.1). Из этой схемы видно, что при заданных свойствах жидкости и твердого тела на смачивание и пропитывание существенное влияние оказывают свойства их межфазного состояния и внешние физико-химические воздействия.

Рассматривая систему «твердое тело – жидкость – газ», в которой жидкость и твердое тело взаимно нерастворимы и не вступают в химическую реакцию, можно выразить условие равновесия действующих сил следующим образом:

$$\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ} = \sigma_{ЖГ} \cdot cos\theta, \qquad (6.1)$$

где $\sigma_{ТГ}, \sigma_{ТЖ}, \sigma_{ЖГ}$ – поверхностные натяжения; $Г$ – газ, $Ж$ – жидкость, $Т$ – твердое тело; θ – краевой угол смачивания.

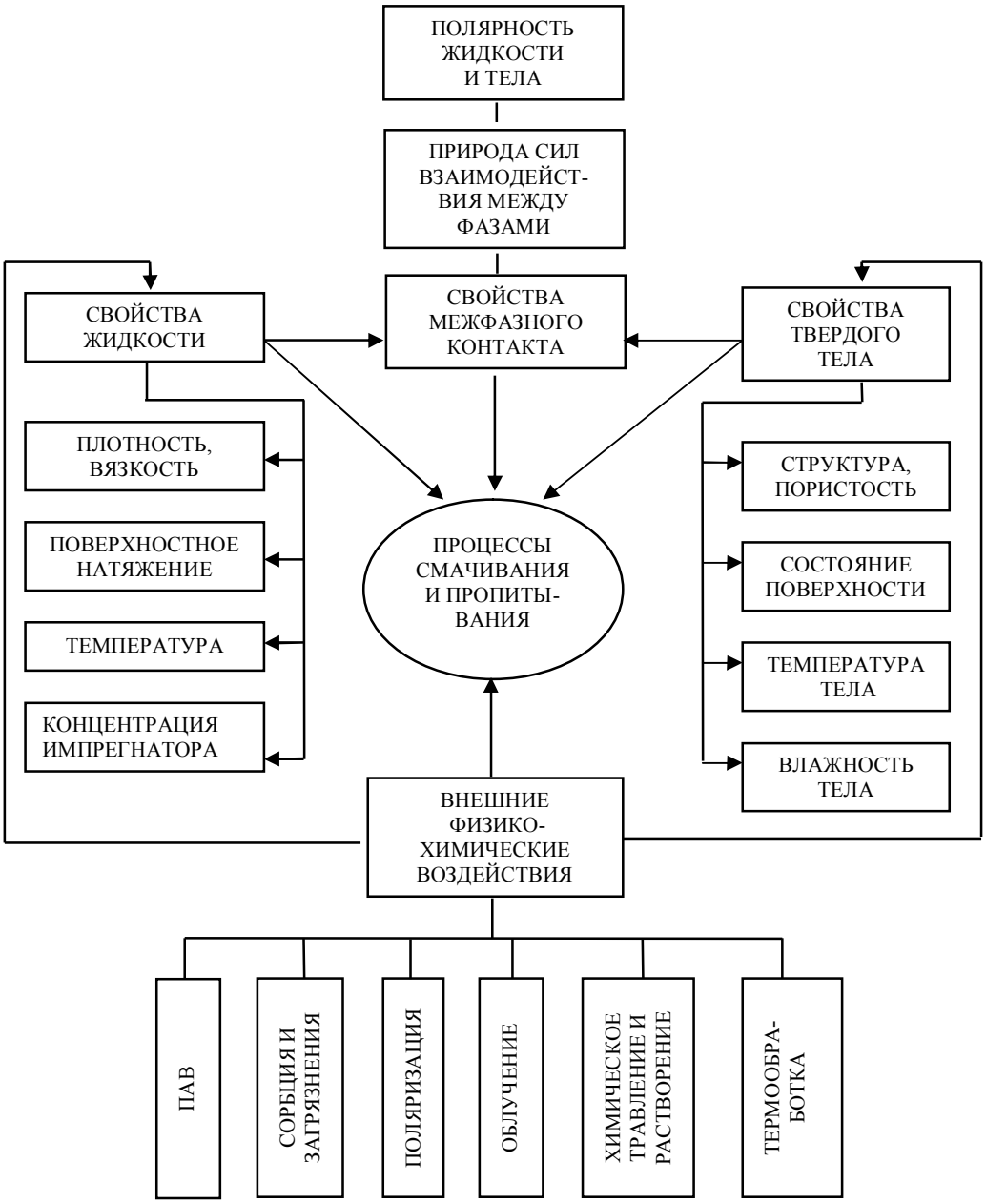


Рис. 6.1. Структурная схема влияния внешних факторов на процесс пропитывания

Способность жидкости смачивать данную поверхность принято называть смачиванием и обозначать через:

$$B = \cos\theta = \frac{\left(\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}\right)}{\sigma_{ЖГ}}. \qquad (6.2)$$

Если во время смачивания составы жидкой и твердой фаз не меняются, то остаются постоянными поверхностные натяжения жидкости на границе с твердым телом и газом. В случае нахождения на поверхности твердого тела адсорбционной влаги и загрязнений происходит понижение поверхностного

натяжения твердого тела – газ. Адсорбционный слой влаги и загрязнений экранирует силы молекулярного притяжения, действующие со стороны твердого тела на жидкость. Поэтому уравнение (6.2) с учетом адсорбции принимает вид [281]:

$$\cos\theta = \frac{\left[\left(\sigma_{ТГ} - RT\int_0^P \Gamma d\ln p_a\right) - \sigma_{ТЖ}\right]}{\sigma_{ЖГ}}, \qquad (6.3)$$

где R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; Γ – удельная адсорбция; p_a – давление адсорбата при постоянной температуре.

Следует отметить, что адсорбции и загрязнениям поверхности абразивного пористого композита до настоящего времени уделялось мало внимания, особенно при изучении смачивания и пропитывания. Работами ряда исследователей [5, 24, 48, 85, 281] показано, что присутствие адсорбционного слоя на поверхности фаз, в частности, на границе «газ – твердое тело» вызывает измеримые изменения межфазного потенциала, что сказывается на процессах смачивания и пропитывания.

Наряду со способностью жидкости смачивать данную поверхность надо рассмотреть и механизм процесса растекания этой жидкости по поверхности для выяснения причин, влияющих на пропитывание твердого тела. Скорость растекания зависит от соотношения движущих сил и сил сопротивления. При полном смачивании движущая сила растекания $\Delta\sigma_p$ равна:

$$\Delta\sigma_p = \sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ} - \sigma_{ЖГ}. \qquad (6.4)$$

Видно, что изменение поверхностных натяжений вследствие разной природы сил взаимодействий между веществами или внешних физико-химических воздействий в значительной мере будет определять значение движущей силы растекания, т.е. влиять на процесс пропитывания.

Другим немаловажным фактором, влияющим на процесс и качество пропитывания, является адгезия жидкости к поверхности твердого тела. Величина адгезии также зависит от поверхностного натяжения (поверхностной

энергии) как жидкости, так и твердого тела. Величину энергии адгезии ΔA можно определить по формуле Юнга:

$$\Delta A = \sigma_{ЖГ}(1+\cos\theta). \qquad (6.5)$$

Чем больше работа адгезии для данных значений поверхностных натяжений твердого тела и жидкости, тем меньше их межфазное натяжение, что будет способствовать лучшему смачиванию поверхности и увеличению скорости пропитывания.

Анализ различных теорий пропитывания пористых систем [66, 305] показывает, что максимальная высота и скорость поднятия жидкости в пористом теле, в первую очередь, зависит от способности заданной жидкости смачивать данную поверхность. Максимальная высота поднятия жидкости $h_{\max}$ определяется по формуле:

$$h_{\max} = \frac{2\sigma\cos\theta}{r\rho g}, \qquad (6.6)$$

где r – радиус капилляра; ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести.

Скорость впитывания (поднятия) жидкости dh/dt в пористом теле можно определить по уравнению Уошбурна [66]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2\sigma r\cos\theta}{8\eta h}, \qquad (6.7)$$

где η – вязкость жидкости;

или по уравнению Дерягина [77]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{kS\sigma\cos\theta}{\delta_n h}, \qquad (6.8)$$

где k – коэффициент фильтрации по Дарси; S – удельная поверхность пор; δ_n – отношение объема пор ко всему объему тела; h – толщина пропитанного слоя.

Видно, что во всех случаях при постоянных значениях r, ρ, η, δ_n, k, S смачивание $\cos\theta$ будет определять кинетику процесса пропитывания пористого тела.

Таким образом, из числа внешних физико-химических воздействий адсорбция и загрязнение внешней и внутренней поровой поверхностей абразивного инструмента будет оказывать отрицательное влияние на процесс пропитывания за счет снижения смачивания и движущей силы растекания.

Регулирование смачивания с помощью поверхностно-активных веществ (ПАВ) осуществляется практически в двух случаях: при необходимости изменения поверхностного натяжения жидкости и при решении задачи гидрофилизации твердой поверхности. При помощи ПАВ можно как повысить смачивание и растекание жидкости, так и замедлять эти процессы. Следует отметить, что эффективность ПАВ в большей степени зависит от оптимальной их концентрации в растворе с другой жидкостью, которая всегда находится в узком пределе, что, безусловно, затрудняет сам процесс регуляции в условиях любого производства.

Другие известные регулирующие внешние воздействия, такие как поляризация и облучение, мало применимы для пористого тела, каким является абразивный инструмент, так как их воздействие распространяется, как правило, на небольшую глубину от поверхности тела. Кроме того, изменения смачивания, вызванные этими воздействиями, нестабильны и исчезают через непродолжительное время [77, 281].

Эффективность ультразвукового облучения на скорость движения смачивающих жидкостей в капиллярах общеизвестна [275]. Однако применение ультразвука для пропитывания значительно усложняет технологическое оборудование и увеличивает затраты энергии.

Можно применить химические методы для управления смачиванием, основанные на осуществлении химических реакций в адсорбционных слоях или растворения адсорбционных загрязнений. Чаще для этих целей используют различные органические растворители: эфир и спирты, бензол, толуол, очищенный бензин и др. [5, 24]. Однако не всегда этими растворителями удается полностью удалить адсорбционные слои с поверхности тела. Кроме то-

го, после растворения остаются тонкие пленки вещества раствора, которые могут также находиться в адсорбционной связи с поверхностью тела.

По утверждению [24] единственным эффективным регулирующим воздействием, положительно влияющим на смачивание и растекание жидкости, является термообработка (прокалка). Термический метод очистки наружных и внутренних поверхностей пористого тела способен полностью снять относительно толстые адсорбционные слои влаги и других загрязнений. Это утверждение хорошо подтверждается рядом работ [103, 170, 248, 319] по изучению капиллярности абразивных материалов.

Несмотря на то, что пропитке АИ посвящено немало исследований [78, 111, 215, 276], сам механизм процесса пропитывания АИ до сих пор еще недостаточно изучен, а вопросы влияния термообработки на кинетику пропитывания и качество импрегнирования вообще не затрагивались.

При соприкосновении инструмента со смачивающими веществами импрегнаторов последние впитываются в поры и капилляры его черепка под воздействием капиллярных сил. Поскольку параметры порового пространства черепка инструмента имеют стохастический характер распределения, то целесообразно рассмотреть кинетику капиллярной пропитки, исходя из статистических представлений о поровой структуре, считая при этом, что технологически процесс капиллярной пропитки происходит при свободном выходе газовой фазы из пор, подлежащих заполнению жидкостью.

При рассмотрении единичного цилиндрического капилляра, если его ось совпадает с осью координат, фронт пропитки имеет подвижную координату x_0, причем [281]:

$$x_0 = \sqrt{2\sigma \cdot \cos\theta / 2\eta} \cdot \sqrt{t}, \qquad (6.9)$$

где σ – поверхностное натяжение; η – динамический коэффициент вязкости; t – время пропитывания.

Если угол между осью капилляра и осью координат равен φ, то

$$x_\varphi = x_0 \cdot \cos_\varphi .$$

При описании порового пространства инструмента с помощью системы нормальных и параллельных к плоской поверхности тела капилляров различного радиуса с известной функцией распределения $f_V(r)$, объемная скорость проникновения жидкости через единицу поверхности выражается для этого частного случая формулой [66, 281]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \dot{Q} = \Pi \sqrt{\frac{\sigma \cos\theta}{8\eta t}} \cdot \left(\mu_r^{0,5}\right), \tag{6.10}$$

где Π – пористость; μ_r – момент распределения капилляров.

Следует отметить, что известные уравнения Дерягина и Уошбурна по расчету скорости поднятия (впитывания) жидкости в пористом теле не учитывают форму инструмента, вероятностное распределение капилляров и пор по их размерам, вида внешнего давления и способа пропитки.

Параметры капиллярной пропитки инструмента с любым расположением капилляров могут определяться по выражению (6.10), умноженному на константу, которая будет зависеть от формы и угловой ориентации капилляров.

В случаях, когда пропитку инструмента производят при сочетании внешнего давления и капиллярных сил, объемная скорость проникновения жидкости определяется следующим образом:

$$\dot{Q} = \frac{\Pi}{4\sqrt{\eta t}\mu_r^2} \int_0^{r_{\max}} r^3 \sqrt{P_0 + P_к} f_v(r) dr, \tag{6.11}$$

где P_0 – внешнее давление; $P_к$ – капиллярные силы $\left(P_к = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}\right)$; r – радиус капилляра.

При определении объемной скорости $\dot{Q}$ используется логарифмически нормальный закон распределения пор по размерам $f_v(r)$.

Эффективность пропитывания черепка инструмента импрегнаторами оценивалась коэффициентом проницаемости

$$K = \frac{\dot{Q}\eta}{S_{пр} \cdot \frac{dP_{уд}}{dL_0}}, \qquad (6.12)$$

где $S_{пр}$ – площадь поверхности пропитывания; $P_{уд}$ – давление жидкости; L_0 – длина капилляра.

Одним из важнейших параметров кинетики пропитки является продолжительность полной пропитки инструмента.

Для АИ в виде призматического бруска толщиной l продолжительность полной односторонней пропитки при воздействии внешнего давления P_0=const:

$$t_0 = \frac{l^2\eta}{2KP_0}, \qquad (6.13)$$

а при двусторонней пропитке:

$$t_D = \frac{l^2\eta}{8KP_0}, \qquad (6.14)$$

где K – коэффициент проницаемости.

Для инструмента в виде бесконечного цилиндра (шлифкруги) радиусом R с координатой фронта пропитки r_0 имеем:

$$\frac{KP_0t_ц}{\eta} = \left(r_0^2/2\right)\left[\ln\left(r_0/R\right) - 0{,}5\right] + \left(R^2/4\right), \qquad (6.15)$$

а продолжительность полной пропитки круга

$$t_ц = \frac{R^2 \cdot \eta}{4KP_0}. \qquad (6.16)$$

При комбинированном воздействии, когда пропитка происходит под совместным действием внешнего давления P_0 и капиллярных сил $P_к$, продолжительность полной пропитки бруска составит:

$$t_Б = \frac{l^2\eta}{8K\left(P_0 + P_к\right)}, \qquad (6.17)$$

а для инструмента в виде круга

$$t_К = \frac{R^2 \cdot \eta}{4K\left(P_0 + P_к\right)}. \qquad (6.18)$$

Для сравнительного анализа отдельных параметров кинетики пропитки разных по форме образцов инструмента на рис. 5.2 приведены графики зависимости глубины пропитки $h_{\text{пр}}$ для бруска толщиной l и круга радиусом $R = l$ от приведенного времени $\dfrac{KP_0t}{\eta} = t_{\text{пр}}$.

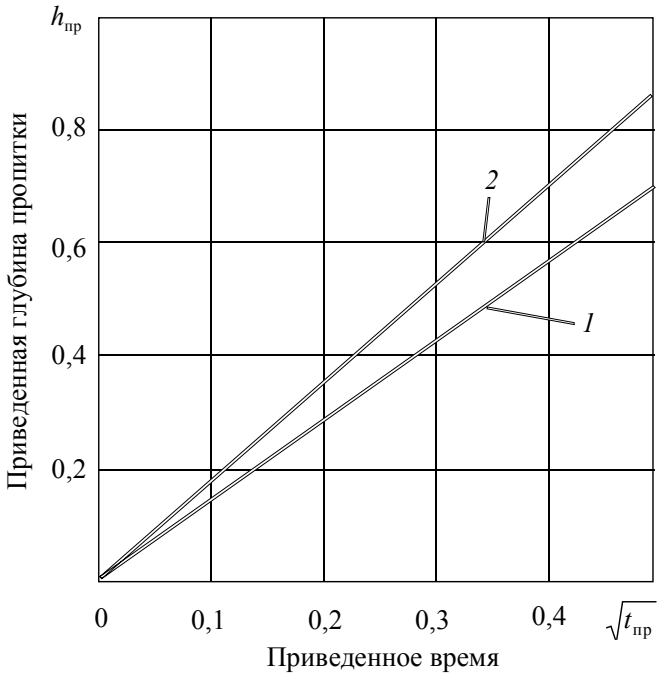


Рис. 6.2. Зависимость глубины пропитки $h_{\text{пр}}$ от времени $\sqrt{t_{\text{пр}}}$: *1* – брусок; *2* – круг

На графике зависимости представлены в виде функции

$$h_{\text{пр}} = \frac{x_0}{l} = \frac{(R - r_0)}{R} = f\left(\sqrt{\frac{KP_0t}{\eta}}\right), \qquad (6.19)$$

а для расчета кинетики пропитки приведенное время $\sqrt{t_{\text{пр}}}$ для угловых точек безразмерных величин x_0/l или $\dfrac{(R - r_0)}{R}$ приведено в табл. 6.1.

Как видно из рис. 6.2, при заданных характеристиках образцов инструмента на кинетику пропитки оказывает влияние и форма образцов, что необходимо учитывать при разработке режимов технологического обеспечения импергнирования абразивного инструмента. Инструменты, имеющие форму круга (цилиндра), на пропитку импрегнатором будут требовать меньше вре-

мя, чем инструменты, изготовленные в виде призматических брусков того же объема.

Таблица 6.1

Данные для расчета кинетики пропитывания

Приведенная глубина пропитки $h_{пр}$	Приведенное время $\sqrt{t_{пр}}$		Приведенная глубина пропитки $h_{пр}$	Приведенное время $\sqrt{t_{пр}}$	
	бруска	цилиндра		бруска	цилиндра
0,1	0,07	0,06	0,6	0,42	0,36
0,2	0,14	0,12	0,7	0,49	0,42
0,3	0,21	0,18	0,8	0,56	0,48
0,4	0,28	0,24	0,9	0,63	0,54
0,5	0,35	0,30	1,0	0,70	0,60

Для определения конкретного времени пропитки, например инструмента цилиндрической формы радиусом R до заданного r_0, необходимо приведенное время $\sqrt{t_{пр}}$ для данного отношения $\frac{(R-r_0)}{R}$ умножить на R^2 и $\frac{\eta}{KP_0}$.

Например, требуется определить время пропитки расплавом серы АИ 1.60х32х20 24AF80L6V с R = 30 мм до r_0 = 10 мм при $K = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ Дарси (мм^2), η = 0,78 Па·с (расплав серы при T = 130 °С), $P_к$ = 830 Па. Так как $\frac{(R-r_0)}{R} = 0{,}66$, то приведенное время $\sqrt{t_{пр}}$ из табл. 6.1 равно 0,15, и соответственно

$$t = 0{,}15 \cdot 30^2 \frac{0{,}78}{0{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 830} = 317 \text{ с}.$$

Для определения коэффициента проницаемости черепка инструмента использовалась эмпирическая зависимость [321]:

$$K = 0{,}32 П^{1{,}81} \cdot d_n^{3{,}54}, \qquad (6.20)$$

где $П$ – пористость инструмента в долях; d_n – средний размер пор, мм.

Данные расчета по кинетике пропитки инструмента разными имперг-наторами подтверждаются результатами экспериментальных исследований

[78, 153, 263, 276]. Расхождение расчетных значений времени пропитки от экспериментальных лежит в пределах 10 – 15 %.

Процесс пропитки абразивного инструмента импрегнаторами можно исследовать на физических моделях, параметры которых определяются законами движения жидкости через капиллярные отверстия, находящиеся в черепке инструмента. Известно, что эффективность пропитки определяется скоростью проникновения жидкости в поры материала на требуемую глубину или коэффициентом проницаемости:

$$K = \frac{\dot{Q}\eta}{\left(S\frac{dP_{\text{уд}}}{dL_K}\right)}, \qquad (6.21)$$

где $\dot{Q}$ – объемная скорость проникновения жидкости в капилляры; S – площадь пропитки; η – вязкость жидкости; $P_{\text{уд}}$ – давление жидкости на поверхность; L_K – длина отверстия капилляра.

Объемная скорость проникновения жидкости в капилляры, расположенные на площади dS, равна:

$$d\dot{Q} = V \cdot dS, \qquad (6.22)$$

где V – скорость движения жидкости.

Сила сопротивления при движении вязкой жидкости по капиллярам определяется следующей зависимостью [281]:

$$P = 2\pi r \tau L_K, \qquad (6.23)$$

где r – условный радиус капилляра; $\tau = \frac{\eta dV}{dr}$.

Критерии подобия, определяющие процесс пропитки при моделировании имеют следующий вид [269]:

$$\frac{P}{\tau \cdot r \cdot L}; \qquad \frac{\eta V}{\tau \cdot r}; \qquad \frac{P}{P_{\text{уд}} \cdot r^2}; \qquad \frac{\dot{Q}}{V \cdot S}. \qquad (6.24)$$

Сокращая количество критериев, содержащих определяемые величины, получим новую систему критериев:

$$\frac{P_{\text{уд}} \cdot r^2}{\eta \cdot L \cdot V}; \quad \frac{P_{\text{уд}} \cdot r}{\tau \cdot L}; \quad \frac{\dot{Q}}{V \cdot S}; \quad \frac{P}{P_{\text{уд}} \cdot r^2}. \tag{6.25}$$

Анализ параметров, составляющих условия однозначности, не приводит к новым критериям. Отношения между масштабами параметров определяются следующим образом:

$$K_{P_{\text{уд}}} \cdot K_r^2 = K_\eta \cdot K_L \cdot K_V; \qquad K_{P_{\text{уд}}} \cdot K_r = K_\tau \cdot K_L;$$

$$K_Q = K_V \cdot K_F; \qquad K_P = K_{P_{\text{уд}}} \cdot K_r^2.$$

Критерий подобия по проницаемости равен:

$$\frac{\dot{Q} \cdot \eta}{\left(KS \frac{dP_{\text{уд}}}{dL} \right)}. \tag{6.26}$$

При этом связь между масштабами соответствующих параметров имеет вид:

$$K_{\dot{Q}} \cdot K_\eta \cdot K_L = K_K \cdot K_F \cdot K_{P_{\text{уд}}}. \tag{6.27}$$

Если при моделировании параметры импрегнатора и черепка абразивного инструмента остаются такими же, как у оригинала (натуры), то имеют место следующие соотношения:

$$K_\eta = 1; \; K_r = 1; \; K_L = 1; \; K_F = 1; \; K_{P_{\text{уд}}} = 1. \tag{6.28}$$

Следовательно, $K_\tau = 1$ и $K_V = 1$, т.е. скорость пропитки остается равной скорости, которая имеет место в натуре: $V_\text{м} = V_\text{н}$. Коэффициент проницаемости в этом случае упрощается и имеет вид:

$$K_{\dot{Q}} = K_K \cdot K_F, \tag{6.29}$$

откуда масштаб коэффициента:

$$K_K = \frac{K_{\dot{Q}}}{K_F}. \tag{6.30}$$

Таким образом, при соблюдении выше рассмотренных положений, эффективность пропитки можно установить при испытании образцов абразивного инструмента определенного размера. Следует отметить, что линейные

размеры образцов, подвергаемых пропитки, хотя и не связаны непосредственно с масштабами параметров, определяющих свойства жидкости и режим пропитки, но минимально допустимые размеры имеют ограничения, определяемые необходимым числом пор и пустот черепка инструмента, приходящихся на единицу площади (объема), которые отражают соответствующий показатель оригинала. При этом толщина образца не должна быть меньше длины микротрещин и микропустот. Для испытания на практике можно использовать образцы с минимальным размером 8 х 15 х 100 мм. Моделирование технологического процесса пропитки (импрегнирования) абразивного инструмента значительно сокращает трудоемкость экспериментальных исследований и позволяет с большой вероятностью предсказывать эффективность пропитки тем или другим импрегнатором.

6.2. Влияние термообработки на кинетику и качество пропитывания инструментов расплавом серы

Для экспериментального изучения кинетики пропитывания расплавом серы АИ в зависимости от температуры термообработки инструмента первоначально определялся краевой угол смачивания. Исследования проводились на установке для замера краевого угла смачивания [85]. Первую серию опытов проводили с образцами, которые после 20-ти суточного хранения в условиях цехового склада завода ВПЗ-15 нагревались лишь до температуры расплава серы 145 … 150 ^{o} С. Вторая серия опытов предусматривала нагрев этих образцов до 250 ^{o} С с выдержкой 20 … 30 мин, затем образцы охлаждали на воздухе до температуры расплава. Третья серия опытов проводилась с образцами, которые первоначально были нагреты до 500 ^{o} С и затем охлаждены до 145 … 150 ^{o} С.

Результаты этих опытов сведены в табл. 6.2. Анализ данных, приведенных в табл. 6.2, показывает, что в зависимости от состояния поверхности АИ до и после термообработки краевой угол смачивания расплава серы изменя-

ется в достаточно большом диапазоне. Краевой угол смачивания уменьшается в 2,2 раза у образцов инструмента термообработанных при 500 °С по сравнению с исходными образцами. Нагрев инструмента до 250 ° С перед его пропиткой расплавом серы, как это делается в производственных условиях ВПЗ-15, не дает существенного снижения краевого угла смачивания. Это можно объяснить тем, что, несмотря на то, что адсорбционная влага удаляется с поверхности инструмента при температуре примерно 200 … 250 °С [321], остальные загрязнения органического и неорганического происхождения с гладких и пористых поверхностей полностью удаляются только при температуре выше 400 … 500 °С [24].

Таблица 6.2

Влияние режима термообработки образцов на краевой угол смачивания расплава серы

Варианты опытов	Температура расплава серы, °С	Краевой угол смачивания θ, °
Нагрев до 150 °С	145	40 ± 2
Нагрев до 250 °С и охлаждение до 150 °С	145	32 ± 2
Нагрев до 500 °С и охлаждение до 150 °С	145	13 ± 2

Известно, что адгезия жидкости к поверхности твердого тела является случаем более общего явления процесса смачивания, а также оценкой технологичности жидкости в процессах пропитывания и импрегнирования [66, 78, 112, 216, 281]. В связи с этим были проведены эксперименты по определению адгезии расплава серы к образцам, изготовленным из одной керамической связки без абразивных зерен. Для изучения влияния внешних воздействий и среды на адгезию серы к керамической связке методикой было предусмотрены следующие варианты экспериментов: нанесение расплава серы на исходную поверхность образца; на предварительно обработанную этиловым спиртом и бензином поверхность; образцов, подвергнутых термообработке при температуре 250 °С и 500 °С с выдержкой по 30 мин и последующим ох-

лаждении их до температуры расплава серы. Эксперименты по определению адгезии серы к керамической связке проводились согласно ГОСТ 6768-75.

Результаты испытаний адгезии серы к керамической связке сведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Величина адгезии серы к керамической связке

Варианты испытаний	Адгезия F, Н/м	Среднеквадратическое отклонение σ, Н/м	Доверительный интервал при $P = 0{,}95$
1. Исходная поверхность	33,2	10,1	28,0 … 38,4
2. Поверхность, обработанная спиртом	76,4	12,0	71,1 … 81,7
3. Поверхность, обработанная бензином	74,7	13,5	69,1 … 80,3
4. Термообработанная поверхность при $T = 250\ ^{o}C$	65,3	14,1	58,7 … 71,9
5. Термообработанная поверхность при $T = 500\ ^{o}C$	169,5	12,2	165,1 … 173,9

Анализ результатов, представленных в табл. 6.3, показывает, что адгезия серы к керамической связке в сильной степени зависит от состояния и чистоты ее поверхности. Очистка поверхности керамической связки от адсорбционного «загрязнения» при помощи спирта и бензина позволила повысить адгезию серы в 2,2 … 2,3 раза. Термообработка поверхности при $T = 250\ ^{o}C$ увеличила адгезию примерно в 2 раза. Термообработка при $T = 500\ ^{o}C$ дала увеличение адгезии в 5,1 раза по сравнению с исходной поверхностью за счет полного удаления с поверхности керамической связки адсорбционных «загрязнений» органического и неорганического происхождения. Таким образом, очищая поверхность порового пространства АИ от различных загрязнений, можно в достаточно широких пределах изменить смачиваемость и адгезию расплава серы, а, следовательно, и улучшить пропитывание и качество импрегнирования.

Далее при изучении механизма процесса пропитывания определялись кинетические зависимости высоты капиллярного поднятия расплава серы по вертикально установленному образцу от времени. Для этих целей использовались вырезанные из шлифовальных кругов 25AF60L6V и 25AF80L6V образцы разного срока хранения размером 120 х 20 х 10 мм. Термообработка образцов производилась при температуре 150, 250, 350, 450 и 600 ^{o}C. Для исследования брали образцы со сроком хранения в течение 1, 10, 20, 30 и 40 суток в производственных условиях завода. Результаты исследований процесса пропитывания образцов абразивного инструмента расплавом серы представлены на рис. 6.3 и 6.4.

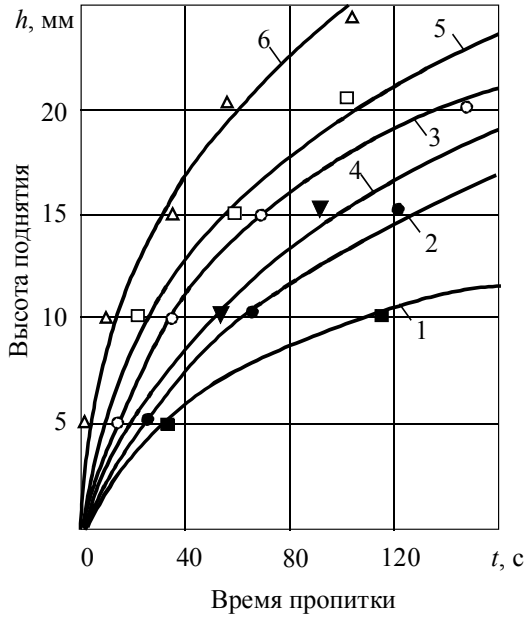


Рис. 6.3. Кинетика пропитывания образцов расплавом серы:
1, *2*, *3* – 25AF80L6V; *4*, *5*, 6 – 25AF60L6V; *1*, *4* – исходные образцы (30 сут.);
2, *5* – исходные образцы (10 сут.); *3*, *6* – термообработанные образцы (500 ^{o}C)

Кинетические зависимости высоты поднятия расплава серы от времени пропитки, срока хранения и термообработки образцов представлены на рис. 6.3. Анализ этих зависимостей показывает следующее. В начальный момент высота поднятия расплава серы быстро увеличивается, а затем замедляется, приближаясь к некоторой максимальной величине. Это свидетельствует о том, что кривые кинетики пропитывания пористых образцов АИ аналогичны кривым зави-

симостей высоты поднятия жидкости в капиллярных системах, определяемых по уравнениям (6.7) и (6.8). Если проинтегрировать эти уравнения при постоянных r, η, θ, ρ, δ, *K*, *F*, то получим следующую зависимость:

$$h = A\sqrt{t}\,, \qquad (6.31)$$

где A – коэффициент пропорциональности.

Как видно из рис. 6.3 на кинетику процесса пропитывания образцов инструмента существенное влияние оказывают их зернистость, сроки хранения и термообработка. С увеличением срока хранения высота подъема расплава серы уменьшается из-за адсорбционного загрязнения пор. Термообработанные образцы пропитываются на большую высоту, чем исходные. Во всех случаях образцы инструмента зернистостью 25 пропитываются с большей скоростью, чем образцы с зернистостью 16, обладающие меньшей площадью сечения пор.

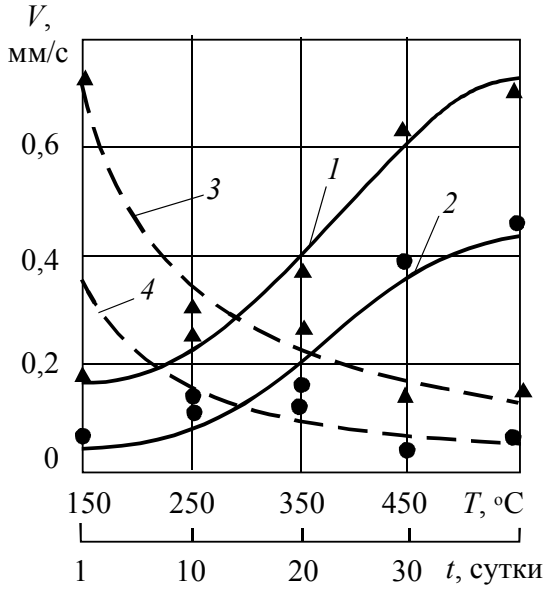


Рис. 6.4. Зависимости скорости пропитывания от температуры термообработки (*1*, *2*) и срока хранения (*3*, *4*) инструментов: ▲ – 25AF60L6V; • – 25AF80L6V

На рис. 6.4 показана зависимость скорости пропитывания образцов при h = 10 мм от температуры термообработки. Видно, что если у образцов зер-

нистостью 25 существенно возрастает скорость пропитывания, начиная с 250 ^{o}C до 450 ^{o}C, то у образцов зернистостью 16 с 350 ^{o}C до 500 ^{o}C. Таким образом, интервал рациональной температуры термообработки абразивного инструмента зернистостью F80 и F60 перед их импрегнированием следует считать 400 … 500 ^{o}C. Такой же интервал температуры рекомендуется для удаления адсорбционного «загрязнения» мелкозернистого инструмента и в работе [321].

Зависимость скорости пропитывания образцов исследуемого инструмента от срока хранения в производственных условиях показана на рис. 6.4.

Интенсивное снижение скорости пропитывания наблюдается в первые дни хранения до 10 суток. Это наводит на мысль о необходимости организации импрегнирования инструмента непосредственно на абразивных заводах в период охлаждения инструмента после его обжига в печах. В этот период абразивный инструмент будет иметь ювенильно-чистые наружные и внутренние поровые поверхности, что повысит полноту и качество его пропитывания импрегнатором, а совмещение операций охлаждения изготовленного инструмента и его импрегнирования позволит сэкономить значительное количество электроэнергии. Во всех остальных случаях на абразивных заводах необходимо организовать консервацию инструмента после его охлаждения, например, помещая его в воздухонепроницаемую упаковку с целью защиты от загрязнений во время транспортировки и хранения.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о существенном влиянии предварительной термообработки при температуре 400 … 500 ^{o}C АИ на механизм его пропитывания расплавом серы и изменение кинетических зависимостей от срока хранения инструмента в производственных условиях.

Другой немаловажной задачей исследований являлось установление влияния термообработки на качественные показатели пропитывания АИ и неуравновешенность шлифкругов. Исследования проводили на участке пропитки абразивного инструмента завода ВПЗ-15. Пропитыванию расплавом

серы подвергались круги 1.25 х 25 х 75, 25AF80L7V со сроком хранения 10 суток. Перед этим из серии кругов выбирались круги, имеющие одинаковую пористость в пределах 38,0 ± 0,8 %, которая определялась по общепринятой методике [170]. Из выбранных кругов подбирались опытные круги для пропитывания с ± 5 % -ными отклонениями по неуравновешенным массам. Контроль неуравновешенности кругов проводили согласно ГОСТ 3060-75. Одна партия опытных кругов пропитывалась по заводской технологии с предварительной термообработкой при 250 °С, а другая партия – по предлагаемой нами технологии с термообработкой при 450 … 500 °С с последующим охлаждением на воздухе до температуры расплава серы (Прил. П. 2). Степень (полнота) пропитывания шлифовальных кругов определялась методом измерения количества поглощенного импрегнатора, взвешивая их до и после пропитывания. Количество поглощенной кругом серы $G_с$ определялось по формуле:

$$G_с = \frac{\left(G_{пр} - G_{исх}\right)}{G_{исх}}, \qquad (6.32)$$

где $G_{пр}$, $G_{исх}$ – вес соответственно пропитанного и непропитанного (исходного) круга.

Одновременно определяли коэффициент пропитывания $K_{пр}$, характеризующий полноту заполнения серой объема порового пространства шлифовального круга, по формуле:

$$K_{пр} = \frac{G_с \rho_к}{П \rho_с}, \qquad (6.33)$$

где $\rho_к$, $\rho_с$ – плотность соответственно круга и серы; $П$ – пористость круга.

Результаты исследований по определению влияния термообработки на степень и коэффициент пропитывания шлифовального круга 25AF80L7V представлены в табл. 6.4.

Как видно из данных табл. 6.4 в результате пропитывания инструмента по предлагаемой технологии, включающей операцию по термообработке кругов перед пропиткой при 500 °С с выдержкой 30 мин и последующим охлаждением их до температуры расплава серы, степень и коэффициент пропи-

тывания по их средним значениям увеличиваются на 36%. Следует при этом отметить, что при охлаждении круга в таком режиме происходит и закалка абразивных зерен, способствующая повышению эксплуатационно-технологических качеств инструмента.

Таблица 6.4

Оценка степени и коэффициента пропитывания расплавом серы шлифовального круга 25А16СМ2К5

Технология пропитки	Пористость $П$, %	Количество поглощенной серы $G_с$, %	Коэффициент пропитывания $K_{пр}$
1. Заводская технология (термообработка при 250° С)	38,0 ± 0,8	24,5 ± 0,7	0,68
2. Предлагаемая технология (термообработка при 500° С)	38,0 ± 0,8	33,4 ± 0,5	0,93

Наряду с этим определяли неуравновешенность исследуемых кругов методом статической балансировки. Величину неуравновешенной массы измеряли с точностью 0, 5 г, погрешность опытов была в пределах 5 %. Результаты определения неуравновешенности кругов, пропитанных по заданным технологиям, по сравнению с непропитанными кругами представлены на рис. 6.5.

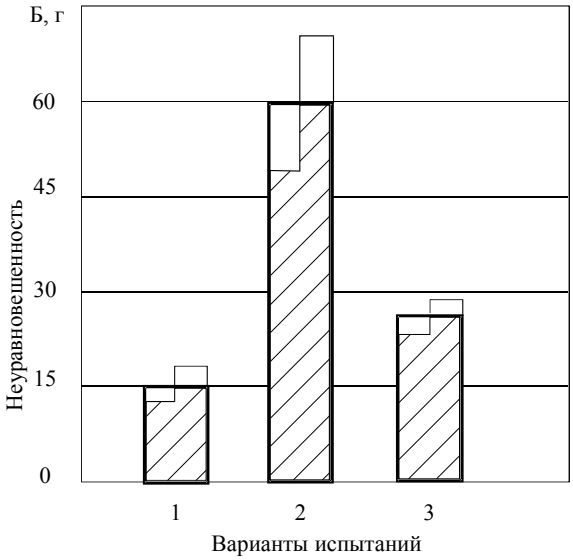


Рис. 6.5. Влияние способа пропитки на изменение неуравновешенности шлифовального круга: *1* – круг не пропитан; *2* – пропитан по заводской технологии; *3* – пропитан по предлагаемой технологии

Анализ результатов показывает, что круги, пропитанные по заводской технологии, имеют неуравновешенные массы в четыре раза больше, чем непропитанные круги. В то время, как у кругов, пропитанных серой по предлагаемой технологии, неуравновешенные массы увеличились в среднем только в 1,33 раза, что допустимо в пределах одного класса неуравновешенности шлифовальных кругов [3].

Следует также отметить, что у всех шлифовальных кругов после пропитки серой повышалась твердость по глубине лунки на 2 … 3 степени, но какой-то зависимости твердости от технологии не наблюдалось.

6.3. Экспериментальная оценка свойств и показателей инструментов, импрегнированных по заводской и предлагаемой технологиям

В качестве объекта исследований использовались шлифовальные круги из электрокорунда 25А на керамической связке К5 различных зернистостей, твердостей, геометрических размеров и неуравновешенных масс, импрегнированных серой по заводской и предлагаемой нами технологиям. Исследования проводились в Испытательном центре абразивов и шлифования (ИЦ ВНИИАШ ВПИ). Прочность кругов на разрыв определялась методом центробежного вращения до их разрушения на испытательных станках.

Испытания шлифовальных кругов проводились по методу планирования эксперимента с реализацией матрицы центрально-композиционного рототабельного факторного эксперимента (ЦКРФЭ).

Прочность шлифовальных кругов исследовалась в зависимости от влияния технологии импрегнирования и изменений следующих доминирующих факторов: X_1 – зернистости; X_2 – твердости; X_3 – геометрических размеров; X_4 – неуравновешенной массы круга.

Выбранные уровни факторов с учетом «звездных» точек для ЦКРФЭ приведены в табл. 6.5. Величина звездного плеча $\pm \alpha = 2^{3/4} = \pm 1{,}682$.

Таблица 6.5

Уровни значений факторов для ЦКРФЭ

Наименование факторов	Схема кодирования	Уровни факторов				
		Звездная точка с плечом –1,682	Нижний уровень – 1	Центральная точка 0	Верхний уровень + 1	Звездная точка с плечом + 1,682
Зернистость (X_1)	lg Z	1,079 12	1,204 16	1,398 25	1,602 40	1,699 50
Твердость (X_2) по звуковому индексу	*ЗИ*	40	43	48	53	56
Геометрические размеры (X_3) по D и d при H = const (H = 40 мм)	$\frac{D}{d}$	1,64 ПП500х 40х305	1,97 ПП400х 40х203	2,36 ПП300х 40х127	2,76 ПП350х 40х127	3,14 ПП400х 40х127
Неуравновешенная масса (X_4)	*Б*, г	19	23	30	37	42

Максимальные тангенциальные напряжения при разрыве кругов определяли по формуле:

$$\sigma_{\tau max} = \frac{\rho\omega^2}{4g}\left[(3+\mu)\frac{D^2}{4} + (1-\mu)\frac{d^2}{4}\right], \qquad (6.34)$$

где ω – частота вращения шпинделя в момент разрыва круга; ρ – плотность материала круга, $\rho = 2{,}1$ г/см^3; μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0{,}24$.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных регрессионные уравнения зависимостей прочности от исследуемых факторов имеют следующий вид. Для кругов импрегнированных по заводской технологии:

$$\sigma_{\tau max\,I} = 28{,}9 - 2{,}6X_1 + 1{,}6X_2 + 2{,}1X_3 + 1{,}8X_4 + 1{,}4X_1X_2 + 0{,}9X_2X_3 + \\ + 0{,}8X_2X_4 + 2{,}5X_1^2 - 3{,}6X_2^2 - 3{,}0X_3^2 - 2{,}3X_4^2. \qquad (6.35)$$

Для кругов импрегнированных по предлагаемой технологии:

$$\sigma_{\tau\max II} = 34{,}2 - 2{,}6X_1 + 1{,}9X_2 + 2{,}8X_3 + 1{,}8X_4 + 1{,}4X_1X_2 + 0{,}8X_2X_3 + \\ + 0{,}7X_2X_4 + 3{,}0X_1^2 - 3{,}3X_2^2 - 2{,}6X_3^2 - 1{,}9X_4^2. \quad (6.36)$$

Проведенный статистический анализ показал, что исследуемые показатели испытаний кругов при доверительной вероятности 95 % колеблются в пределах 8 … 12 % от их экспериментальных значений. Это свидетельствует о том, что уравнения (6.35) … (6.36) являются адекватными для описания зависимостей разрывной прочности кругов от исследуемых факторов.

Т а б л и ц а 6.6

Граничные значения прочности шлифовальных кругов для звездных точек ЦКРФЭ по факторам и технологиям импрегнирования

Звездные точки плана	Зернистость (X_1)		Твердость (X_2)		Геометрические размеры (X_3)		Неуравновешенность (X_4)	
	З.Т	П.Т	З.Т	П.Т	З.Т	П.Т	З.Т	П.Т
- 1,682	40,31	47,03	16,06	21,70	16,91	22,16	19,39	25,82
+ 1,682	31,58	38,29	21,44	28,08	23,97	31,57	25,44	31,86
	З.Т (X_1, X_2, X_3, X_4)				П.Т (X_1, X_2, X_3, X_4)			
- 1,682	13,86				22,29			
+ 1,682	23,62				35,37			

Примечание. З.Т. – заводская технология импрегнирования кругов;
П.Т. – предлагаемая технология импрегнирования кругов

Как видно из данных табл. 6.6 расчетные значения прочности кругов, импрегнированных по предлагаемой технологии, во всех случаях значительно больше значений прочности кругов, импрегнированных по заводской технологии. Так при учете влияния одновременно всех факторов прочность кругов, импрегнированных по предлагаемой технологии при верхнем уровне факторов в 1,49 раза, а при нижнем уровне – в 1,60 раза больше, чем прочность кругов, импрегнированных по заводской технологии. Это объясняется тем, что предлагаемая технология обеспечивает более качественное пропитывание инструмента расплавом серы, увеличивает адгезию серы к черепку

круга, за счет чего образуется дополнительный упрочняющий каркас внутри порового пространства инструмента, снижающий степень влияния исследуемых факторов на изменение предельной прочности кругов при их разрыве.

Представленные выше результаты исследования свидетельствуют об эффективности и практической ценности применения предлагаемой технологии импрегнирования для повышения прочностных свойств АИ. Полученные уравнения регрессий ((5.25) и (5.26)) методом планирования экспериментов позволяют проводить сравнительную оценку прочности на разрыв шлифовальных кругов различных характеристик.

Влияние термообработки и импрегнирования серой шлифовальных кругов на их эксплуатационные показатели определялось сравнительными испытаниями кругов до и после импрегнирования по заводской технологии, а также до и после термообработки и импрегнирования по предлагаемой технологии.

Результаты сравнительных испытаний шлифовальных кругов представлены на рис. 6.7. Анализ полученных результатов показал, что все исследуемые эксплуатационные показатели шлифовальных кругов, импрегнированных серой, имеют значительно более высокие значения по сравнению с исходными кругами. Режущая способность импрегнированных кругов повысилась в 1,4 … 1,8 раза, коэффициент шлифования увеличился в 3,5 … 5,4 раза, в то же время скорость изнашивания снизилась в 2,5 … 3,1 раза, а шероховатость поверхности уменьшилась с 0,87 мкм до 0,70 … 0,55 мкм. В основу объяснений значительного улучшения эксплуатационных показателей шлифовальных кругов, импрегнированных серой, положены следующие факторы. Во-первых, сера, являясь химически активным к металлам веществом, в процессе шлифования активизирует режущую способность инструмента, снижает трение, теплонапряженность и динамику процесса. Во-вторых, сера, как импрегнатор, залечивает микродефекты черепка инструмента и создает в поровом пространстве дополнительный упрочняющий каркас, повышая твердость и прочность инструмента. Кроме того, сера экра-

нирует абразивные зерна, поры и связки от налипа металла. Все это способствует снижению степени засаливания и скорости изнашивания инструмента.

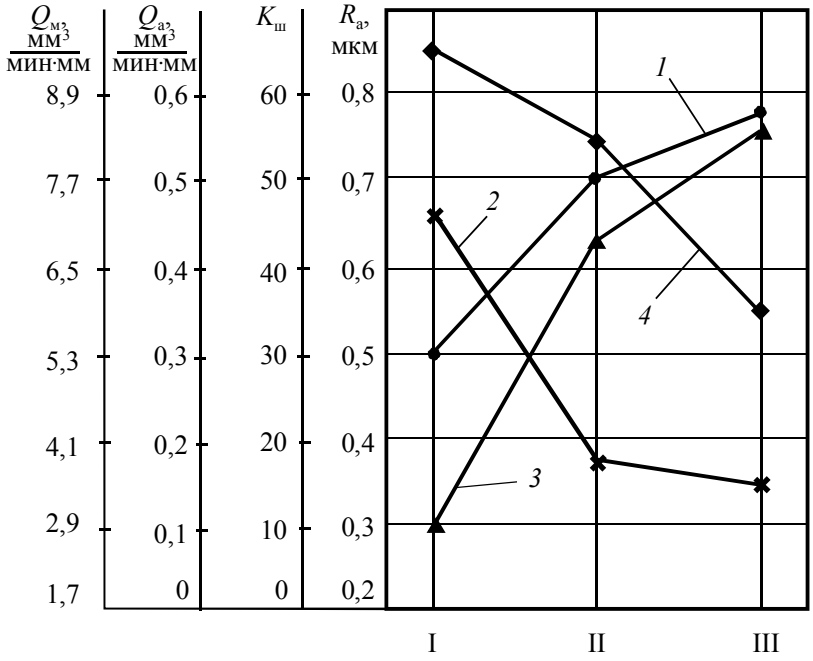


Рис. 6.7. Эксплуатационные показатели импрегнированных серой кругов 25А16СМ2К5 (режим шлифования: $V_{кр}$ = 35 м/с; $V_{ст}$ = 12 м/мин; t = 0,01 мм/дв.ход.): *1* – режущая способность круга $Q_м$; *2* – скорость изнашивания круга $Q_а$; *3* – коэффициент шлифования $K_ш$; *г* – шероховатость обработанной поверхности $R_а$; *I* – исходный круг; *II* – круг, импрегнированный по заводской технологии; *III* – круг, импрегнированный по предлагаемой технологии

Анализ результатов сравнительных испытаний кругов, импрегнированных серой по заводской и предлагаемой технологиям, показал следующее. Режущая способность кругов, импрегнированных по предлагаемой технологии, повысилась примерно в 1,3 раза, коэффициент шлифования увеличился в 1,5 раза, скорость изнашивания снизилась в 1,2 раза, шероховатость поверхности уменьшилась в 1,27 раза по сравнению с кругами, импрегнированных по заводской технологии. Повышение эксплуатационных показателей в данном случае объясняется следующим образом. Предварительная термическая обработка шлифовального круга, включающая термопрокалку (450 … 500 ^{o}C) и закалку на воздухе, улучшает его структурно-механические характеристики. Абразивные зерна увеличивают свою прочность и микрохруп-

кость, что способствует их самозатачиванию и повышению режущей способности круга. Скорость изнашивания круга понижается за счет уменьшения числа зерен, вырываемых из связки при их затуплении, и уменьшения сил резания, действующих на зерна и мостики связки. Кроме того, термопрокалка инструмента повышает полноту и качество пропитки расплавом серы, что также сказывается на улучшении эксплуатационных показателей.

Проведены испытания импрегнированных шлифовальных кругов по предлагаемой технологии в производственных условиях Волжского подшипникового завода (ВПЗ-15). Испытаниям подвергались шлифовальные круги 1.350 х 8 х 127 25AF80L7V при шлифовании упорного борта внутреннего кольца подшипника 7909К1 на бортикошлифовальном станке модели ХШ-285 на режимах по действующей технологии с охлаждением водным раствором кальцинированной соды (0,8 … 1,2 %) с нитритом натрия (0,2 … 0,3%).

Результаты испытаний показали, что круги, импрегнированные по предлагаемой технологии, дают 80 % колец без прижогов и 20 % имеют штриховые прижоги, а круги, импрегнированные по заводской технологии, соответственно – 32 % и 68 %. Шероховатость обработанной поверхности кольца во всех случаях независимо от технологии импрегнирования кругов отвечает требованиям согласно техническим условиям. Стойкость опытных кругов была примерно в 1,4 раза выше стойкости кругов, импрегнированных по заводской технологии (см. Приложения).

Таким образом, экспериментально подтверждено положительное влияние совмещения термообработки и импрегнирования на стабилизацию и повышение эксплуатационных показателей АИ. Раскрыт механизм влияния, выражающийся в уменьшении периода приработки и затупляемости режущей поверхности инструмента за счет повышения прочности и самозатачиваемости термообработанных зерен, увеличения количества режущих зерен, увеличения твердости поверхностных слоев и прочности закрепления зерен в черепке инструмента импрегнированного серой.

6.4. Исследование термостойкости абразивных инструментов на керамической связке

Определение параметров технологического процесса термообработки инструмента является важным условием повышения его структурно-механических характеристик и эксплуатационных показателей в процессе шлифования. При термообработке инструмента на керамической связке может происходить ряд физико-химических и механических процессов: десорбция, дегидратация, изменение структуры за счет полиморфных превращений физико-механических свойств и др. [33, 84, 117, 170, 248]. Степень влияния термообработки на структурно-механические свойства инструмента зависит от величины возникающих термических напряжений, их распределения по объему изделия, условий теплопередачи, а также от гомогенности строения, хрупкости, пористости, первоначальной механической прочности черепка инструмента. Поэтому возникают определенные трудности в выборе количественной характеристики термостойкости, справедливой для многих случаев температурных воздействий.

Под термостойкостью принято считать способность материалов противостоять, не разрушаясь, резким колебаниям температуры при нагревании или охлаждении [69, 84, 96, 185]. В основе явлений, вызывающих термическое разрушение, лежат процессы, связанные с возникновением в материале внутренних напряжений. При этом различают термические напряжения двух видов [185, 284]:

– напряжения I-го рода, вызываемые градиентом температур;

– напряжения II-го рода, вызываемые анизотропией температурного коэффициента линеного расширения, а также возникающих в результате физико-химических процессов.

Механизм возникновения напряжений I-го рода обусловлен тем, что при нагревании любого тела поверхностные слои его нагреваются и расширяются быстрее, чем внутренние. В связи с этим напряжения, возникающие в

поверхностных слоях в результате сопротивления материала расширению, являются сжимающими, а при охлаждении – растягивающими. Величина этих напряжений прямо пропорциональна перепаду температур ΔT, коэффициенту линейного температурного расширения α, модулю упругости E и обратно пропорциональна значению модуля Пуассона μ:

$$\sigma_{max} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \mu}. \qquad (6.37)$$

Таким образом, напряжения I-го рода зависят от теплофизических и деформативных свойств материала, а также от формы и размеров изделий. Последнее свидетельствует о том, что термостойкость является не физическим свойством, а лишь условным показателем состояния структуры материала при изменении его температуры.

Абразивный инструмент при закалке может разрушиться, если его прочность окажется меньше образующихся в нем максимальных термических напряжений. Такое состояние можно условно охарактеризовать критерием термостойкости R_T, который выражается отношением предельного напряжения при разрушении к величине напряжения, возникающего при перепаде температур в один градус [185]:

$$R_T = \frac{\sigma_P(1-\mu)}{E \cdot \alpha}. \qquad (6.38)$$

Из уравнения (6.38) видно, что чем выше напряжение разрушения или прочность материала инструмента и ниже модуль упругости и коэффициент линейного температурного расширения, тем выше критерий термостойкости.

С учетом скорости распространения температуры при нагревании (охлаждении) критерий термостойкости принимает следующий вид:

– при медленном изменении температуры

$$R_T^I = R_T \cdot \lambda_T; \qquad (6.39)$$

– при постоянном тепловом потоке

$$R_T^{II} = R_T \cdot a_T; \qquad (6.40)$$

где λ_T – теплопроводность, Вт/м· ^oC; a_T – температуропроводность, м^2/с.

Разрушение хрупких материалов под влиянием термических напряжений происходит в две стадии: зарождение трещин и их рост. Критерии термостойкости R_T, R_T^I, R_T^{II} относятся к стадии возникновения трещин. Появившаяся трещина в гетерогенных материалах, к которым относится и материал черепка инструмента, развивается, как правило, медленно.

По теории Гриффитса трещины будут расти в том случае, если упругая энергия, высвободившаяся из-под напряженной области, будет больше энергии, необходимой для создания двух новых поверхностей раздела. Критерии термостойкости в стадии распространения трещин, будут иметь следующие выражения:

$$R_T^{III} = \frac{E}{\left[\sigma_P \cdot (1-\mu)\right]}; \tag{6.41}$$

$$R_T^{IV} = R_T^{III} \cdot U_{\text{эф}}, \tag{6.42}$$

где $U_{\text{эф}}$ – эффективная энергия, необходимая для создания двух новых поверхностей раздела, Дж.

В результате преобразования уравнения (6.42) критерий термостойкости в стадии развития трещин при термическом напряжении принимает вид:

$$R_T^{IV} = \frac{E \cdot U_{\text{эф}}}{\sigma_{\text{изг}}^2}, \tag{6.43}$$

где $\sigma_{\text{изг}}$ – предельное напряжение материала при изгибе, МПа.

При анализе критериев термостойкости в стадиях зарождения трещин ((6.38) … (6.40)) и их роста ((6.41) – (6.42)) отмечаются следующие противоречия:

– высокотермостойкий материал во избежание зарождения в нем трещин должен иметь высокую прочность и низкий модуль упругости;

– для предотвращения развития трещин модуль упругости материала должен быть высоким, а прочность – низкой.

Но это только кажущиеся противоречия, так как в обоих случаях не в полной мере учитывается характер структуры материала, а именно наличие

пор и границ раздела фаз. В первом случае пористость косвенно учитывается при теплообменных процессах, во втором – не учитывается вовсе.

При более глубоком изучении проблемы выясняется, что в гетерогенных материалах трещины зарождаются в твердых фазах, и, чтобы они не зарождались, эти фазы должны иметь высокую прочность. Распространение же трещин происходит во всем объеме многофазовой структуры материала как по твердым фазам, где напряжение стремительно растет, так и по порам, в которых напряжения гасятся. Из этого следует, что термостойкость пористых материалов должна быть выше, хотя их прочность ниже [33, 185]. В гомогенных, плотных материалах, таких как стекло, зародившаяся трещина растет катастрофически, что приводит к мгновенному разрушению материала. Поэтому для плотных материалов главными критериями термостойкости являются критерии стадии зарождения трещин, т.е. R_T, R_T^I, R_T^{II} и ΔT (по Кингери), а для пористых материалов – критерии развития трещин, т.е. R_T^{III} и R_T^{IV} (по Хассельману) [185].

Однако следует заметить, что связь термостойкости с фазовым составом материала является более сложной, чем представлено выше, так как практически критерий R_T^{IV} не всегда удовлетворительно описывает некоторые виды структур. Например, огнеупоры одной и той же плотности и состава с микротрещиноватой и зернистой структурой имеют различные значения термостойкости [94, 96, 129].

Термостойкость огнеупорных материалов часто оценивают по мере их хрупкости, используя при этом эмпирическую формулу Гогоци [185]:

$$R_T^{xp} = \frac{R_T \cdot (3 + \chi)}{4 \cdot \chi}, \qquad (6.44)$$

где χ – мера хрупкости, ед.

Следует заметить, что при χ = 1 материал хрупкий, а $R_T^{xp} = R_T$ превращается в критерий термостойкости зарождения трещин.

Для оценки термостойкости материалов в строительном материаловедении часто используют так называемый коэффициент термостойкости, который в какой-то мере обобщает вышеприведенные критерии [71]:

$$K_T = \left(\frac{\lambda}{c \cdot \rho}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{изг}}{E \cdot \alpha}\right), \qquad (6.45)$$

где c – удельная теплоёмкость материала; ρ – плотность материала.

В выражении (5.35) первый множитель показывает интенсивность нагрева материала, а второй – соотношение меры хрупкости материала и термической деформации. Учитывая выше сказанное, для оценки термостойкости абразивного инструмента на керамической связке предлагается использовать обобщающий критерий в следующем виде:

$$K_T = \frac{\sigma_{изг} \cdot (1-\mu) \cdot \lambda}{E \cdot \alpha \cdot c \cdot \rho}, \qquad (6.46)$$

В предлагаемом выражении (6.46) косвенно учтены основные особенности строения черепка инструмента такие как пористость, зернистость, твердость (прочность) и структура. Например, теплопроводность λ с увеличением пористости керамического черепка уменьшается за счет сокращения объема более теплопроводной твердой фазы. Теплопроводность воздуха примерно в 20 раз меньше теплопроводности керамического черепка. Для учета влияния пористости на теплопроводность черепка инструмента можно воспользоваться уравнением Максвелла – Эйкена в следующем виде:

$$\lambda = \lambda_{тф} \cdot (1 - П) \cdot (1 + 0{,}5П), \qquad (6.47)$$

где $\lambda_{тф}$ – теплопроводность твердой фазы в абсолютном плотном состоянии; $П$ – пористость инструмента.

В свою очередь измеряемые на опыте значения модуля упругости также показывают зависимость от типа структуры, пористости и распределения пор по размерам. Рядом исследователей [6, 33, 97, 115] предложены эмпирические и аналитические закономерности изменения модуля упругости в зависимости от пористости, например, в работе [33] модуль упругости E в зависимости от пористости $П$ определяется выражением:

$$E = E_0 \cdot (1 - П) \cdot (1 - 0{,}9П), \qquad (6.48)$$

где E_0 – модуль упругости беспористого материала.

Подставляя выражения (6.47) в уравнение (6.46), учитывая зависимость плотности материала и механической прочности от пористости, можно получить неоднозначные выводы об изменении термостойкости инструмента в зависимости от его пористости. Если отношение $\lambda/E\rho$ будет уменьшаться в меньшей степени, чем падать прочность $\sigma_{изг}$ при повышении пористости, то это приведет к снижению термостойкости черепка инструмента. При обратном случае, когда прочность будет понижаться в меньшей мере, чем увеличиваться отношение $\lambda/E\rho$, то термостойкость инструмента будет повышаться.

Расчетные и экспериментальные данные по определению предлагаемого критерия термостойкости по выражению (6.46) показывает, что, например, с увеличением номера структуры инструмента значение критерия повышается, т.е. повышается и термостойкость инструмента. В то же время, если сравнивать термостойкость обычного стандартного инструмента с высокопористым той же пористости, то из данных рис. 6.8 видно, что высокопористый инструмент обладает пониженной термостойкостью по сравнению с обычным инструментом той же характеристики.

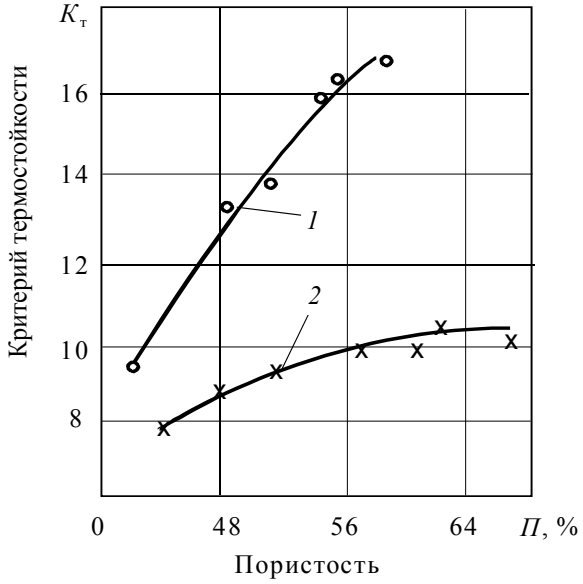


Рис. 6.8. Зависимость термостойкости инструмента от структуры и пористости:
1 – стандартный инструмент; *2* – высокопорнстый инструмент

Повышенная термостойкость обычного инструмента объясняется более высокой его механической прочностью. Вероятно, что суммарное действие пористости на термостойкость зависит от той доли, которую имеют процессы зарождения и распространения трещин в термостойкости изделий. Влияние пор на термостойкость определяется двойной ролью их в трансформации напряжений. С одной стороны поры ослабляют сечение изделия и являются концентратами напряжений, способствуя зарождению трещин, а с другой стороны поры препятствуют, распространению трещин являясь их блокаторами или глушителями.

Для определения величины термических напряжений вблизи поры, возникающих за счет нарушения порами равномерности температурного поля, можно воспользоваться выражением [324]:

$$\sigma_t = K \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot d_n, \qquad (6.49)$$

где K – константа, зависящая от формы поры и коэффициента Пуассона; для цилиндрических пор $K = 1$; ΔT – температурный градиент, град/см; d_n – размер поры, см.

Величина напряжений, например, при температурном градиенте ΔT = 175 град/см, в абразивном инструменте на керамической связке для пор d_n = 0,3 мм, $\alpha = 6 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$, $E = 4{,}5 \cdot 10^4$ МПа оказывается равной 1,42 МПа.

По данным [123] величина термонапряжений в различных точках черепка инструмента может колебаться в пределах от 0,35 до 1,32 МПа. Средняя максимальная величина напряжений от термообработки составляет 1,16 МПа. Как видно из представленных выше данных, при помощи формулы (6.51) можно достаточно точно определять возникающие внутренние напряжения при термозакалке инструмента и тем самым назначать оптимальные параметры процесса термообработки при закалке абразивных инструментов.

Важнейшими характеристиками термической обработки абразивного инструмента являются: конечная температура нагрева при закалке инструмента, скорость и продолжительность процесса термообработки, допустимые перепады температур при нагреве инструмента без его разрушения.

Режим термообработки будет определяться структурой инструмента, зернистостью, формой и размерами инструмента, их расположением в нагревательном устройстве, а также конструкцией и назначением печи. Нагрев инструмента сопровождается увеличением его объема. Наружные слои, имеющие температуру большую, чем средние, стремятся расшириться, но за счет воздействия на них внутренних слоев находятся в сжатом состоянии. Внутренние слои имеют температуру ниже средней, поэтому будут растягиваться. Следовательно, причиной возникновения температурных напряжений является температурный градиент по сечению инструмента. Величина этих напряжений зависит также от структурно-механических свойств инструмента. Максимальное термическое напряжение на поверхности абразивного инструмента, возникающее при его нагреве можно представить в виде:

$$\sigma_{t\,\max} = \frac{\left(\overline{\sigma}_t \cdot E \cdot \alpha \cdot T_p\right)}{\left(1-\mu\right)}, \tag{6.50}$$

где $\overline{\sigma}_t$ – относительное напряжение, зависящее от критерия Био (B_i); T_p = $= T_{\text{ср}} - T_{\text{об}}$ – разность температур между средой и инструментом.

Зависимость $\overline{\sigma}_t = f(B_i)$ можно представить в виде [293]:

$$\overline{\sigma}_t = \frac{1}{\left(\dfrac{a + b \cdot \lambda_T}{h_T \cdot H}\right)}, \tag{6.51}$$

где a и b – коэффициенты, для нагреваемой пластины с двух сторон a = 1,5, b = 3,25; для цилиндра a = 2, b = 4,3; h_T – коэффициент теплоотдачи; H – высота или толщина инструмента.

Если приравнять величину $\sigma_{\max}$ при термическом разрушении пределу прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$, можно определить разрушающий перепад температур T_p:

$$T_p = \frac{\sigma_{\text{изг}} \cdot \left(1-\mu\right)}{E \cdot \alpha \cdot \overline{\sigma}_t}. \tag{6.52}$$

Как видно из представленных выше зависимостей трудности исследования и определения параметров технологии термозакалки абразивного ин-

струмента заключается в том, что возникающие термонапряжения являются не только свойством материала инструмента, а существенно зависят также от температурного поля, формы и размеров инструмента, его пористости и т.п.

В связи с этим при решении и анализе уравнений теплопроводности необходимо по возможности полнее учитывать выше перечисленные свойства и параметры, как инструмента, так и нагревательного устройства.

Для камерных нагревательных устройств суммарный коэффициент теплоотдачи $h_{T\sum}$ определяется по следующей формуле [86]:

$$h_{T\sum} = 0{,}092 \cdot \left(\frac{T_{\text{нагр}}}{100} \right)^3, \qquad (6.53)$$

где $T_{\text{нагр}}$ – конечная температура нагрева изделия, $T_{\text{печ}}$ = 500 °С.

В зависимости от числа Био, изменяющегося от 0 до ∞, в теории теплопроводности все тела подразделяют на термически тонкие и массивные. К термически тонким относят тела, имеющие малые значения числа $B_i \le 0{,}25$, что определяет и малый перепад температур по их сечению. Термически массивные тела, наоборот, характеризуются большой разностью температур по сечению тела. Массивность тела определяется не только толщиной изделия и его теплопроводностью, но и коэффициентом теплоотдачи или условиями теплообмена изделия со средой.

Числом Био (B_i) характеризуют отношение теплового сопротивления изделия к тепловому сопротивлению теплоотдачи, и эта зависимость для инструмента определяется следующим образом:

$$B_i = \frac{0{,}5 \cdot h_{T\sum} \cdot H}{\lambda_T}. \qquad (6.54)$$

Высота H шлифовальных кругов на керамической связке изменяется от 8 до 100 мм, теплопроводность λ = 2,2 ÷ 2,4 Вт/(м·°С) [3].

Наиболее используемые шлифовальные круги имеют высоту 20 – 40 мм, тогда число Био:

$$B_i = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}092 \cdot (500/100)^3 \cdot 0{,}04}{2{,}2} = 0{,}105.$$

Таким образом, исследуемые абразивные инструменты по числу Био можно отнести к термическим тонким изделиям и для определения продолжительности их нагрева можно использовать следующую формулу из теории теплопроводности [194]:

$$\tau = \left(\frac{s \cdot c \cdot \rho}{h_{T\sum} \cdot K_1} \right) \ln \frac{\left(T_{\text{печ}} - T_{\text{нач}}\right)}{\left(T_{\text{печ}} - T_{\text{нагр}}\right)}, \qquad (6.55)$$

где $s = 0{,}5H$ – линейный размер изделия; H = 2,0 – 4,0 см; K_1 – коэффициент формы, для пластины $K_1 = 1$, для цилиндра $K_1 = 2$; $T_{\text{нач}}$ – начальная температура инструмента, $T_{\text{нач}} = 20\ ^{\circ}\text{C}$;

$T_{\text{печ}} = T_{\text{нагр}} + (50 \div 70\ ^{\circ}\text{C})$ – температура внутри нагревательного устройства.

Из этого уравнения видно, что время нагрева или охлаждения инструмента при закалке пропорционально его высоте или толщине H и плотности изделия ρ, которая, в свою очередь, определяется структурой, твердостью и зернистостью инструмента.

Зависимость (6.55) может быть использована для случая нагрева или охлаждения единичного изделия в виде шлифовального круга с условием его вертикального расположения в нагревательном устройстве. Если же шлифовальные круги высотой H размещаются на расстоянии b друг от друга, то продолжительность нагрева τ следует умножить на опытный поправочный коэффициент K_τ, учитывающий действительное расположение инструмента в нагревательном устройстве. Зависимость этого коэффициента от ln(b/0,1H) представлена на рис. 6.9.

Зависимости K_τ от ln(b/0,1H), представленные на рис. 6.9 хорошо аппроксимируются следующими уравнениями:

– для круглых изделий

$$K_\tau = 1{,}75 - 0{,}24 \cdot \ln\left(\frac{b}{0{,}1H} \right); \qquad (6.56)$$

– для призматических изделий

$$K_\tau = 0{,}79 - 0{,}12 \cdot \ln\left(\frac{b}{0{,}1H}\right). \qquad (6.57)$$

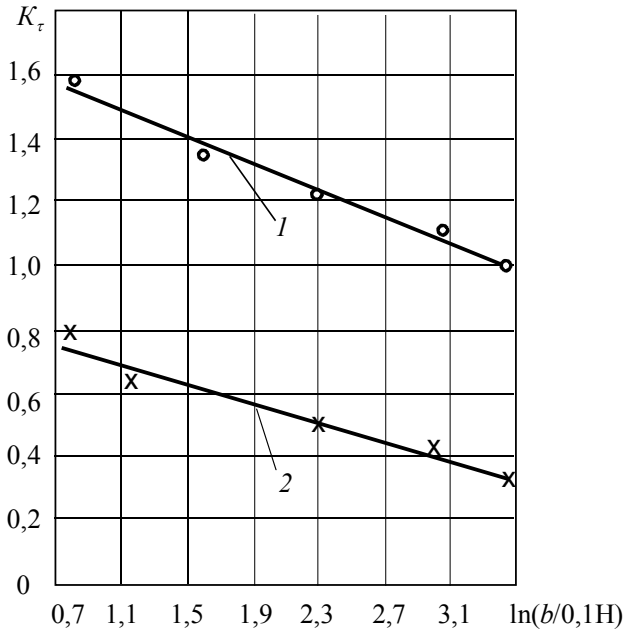


Рис. 6.9. Зависимость коэффициента K_τ от отношения ln(b/0,1H)*:*
1 – круглые изделия; *2* – призматические изделия

Рассредоточение изделий в нагревательном устройстве увеличивает их тепловоспринимаюшую поверхность, что позволяет сокращать продолжительность нагрева. Однако, исходя из повышения производительности нагревательного устройства (печи), при массовом производстве инструмента рациональным является расположение изделий на расстоянии друг от друга до половины их высоты или толщины.

Не менее важным вопросом является определение времени выдержки в нагревательном устройстве инструмента при его закалке. Это связано с тем, что при термообработке инструмента решается и другая задача – удаление из порового пространства адсорбционной влаги. Как показали экспериментальные данные, на процесс удаления адсорбционной влаги из пор инструмента влияют объемно-размерные характеристики его порового пространства и режимы термообработки.

Для исследования были выбраны четыре вида шлифовальных кругов следующих характеристик: 24AF46J8V, 24AF60H6V, 24AF80K6V и 24F180M5V. Величина общей пористости этих кругов составляла 50,2 – 50,7%, а средний размер пор соответственно – 0.61, 0.36, 0.23, 0.09 мм. Была установлена возможность удаления всей влаги из пор кругов при температуре 450 – 500 °С в течение 15 ÷ 28 мин в зависимости от объемно-размерной характеристики инструмента, в частности, от размера пор.

На рис. 6.10 представлена эта зависимость, которая описывается следующим уравнением:

$$t_{\text{в}} = 13{,}1 d_n^{-0{,}32}, \text{ мин.} \qquad (6.58)$$

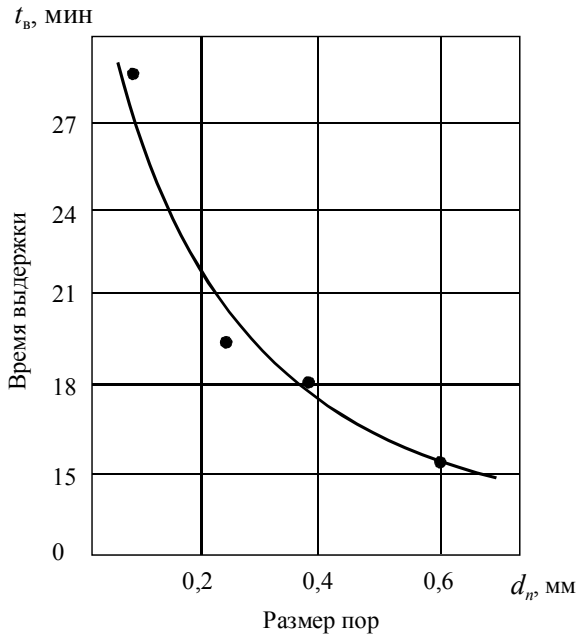


Рис. 6.10. Изменение времени выдержки от размера пор инструмента

Полученная зависимость времени выдержки инструмента в нагревательном устройстве при $T_{\text{н}}$ = 450 – 500 °С от размера пор объясняется тем, что с уменьшением размера пор при постоянной пористости растет удельная поверхность порового пространства инструмента, требующая большего времени прокаливания для удаления связанной влаги и загрязнений из пор инструмента.

Как было показано выше, выбор температуры и режимов термообработки является важным условием создания рациональной технологии модифицирования существующих АИ. Однако специальных рекомендаций относительно создания оптимальных условий термозакалки инструментов до сих пор нет, как нет разработанных моделей и методик расчета температурно-временных режимов закалки.

6.5. Моделирование режимов термообработки инструментов на керамической связке

В данной работе разработана модель прогнозирования изменения температуры АИ во время его термообработки. Сущность этой модели состоит в следующем. Для определения температурно-временных режимов термообработки инструмента используется уравнение теплопереноса, связывающее изменение температуры тела ∂T во времени ∂t с изменением температуры по расстоянию ∂x в направлении градиента через коэффициент температуропроводности a [194]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \qquad (6.59)$$

Выражение (6.59) является дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье для одномерного температурного поля. Если рассмотреть тепловые потоки в трех направлениях x, y и z, то формула (6.59) примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \qquad (6.60)$$

или

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T, \qquad (6.61)$$

где $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

В связи с тем, что уравнение (6.61) имеет бесконечное множество решений, конкретные условия термообработки тел при расчетах теплопередачи уточняются уравнениями начальных и граничных условий теплопередачи.

Начальные условия должны соответствовать значению температурного поля тела в начальный момент нагрева или охлаждения. Для рассматриваемого случая, когда в начальный момент закалки инструмента его температура постоянна и распределена равномерно, то начальное условие можно записать в виде:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = \text{const}. \tag{6.62}$$

Для выбора граничных условий, определяющих характер теплового взаимодействия между нагреваемым черепком инструмента и окружающей его газовой средой, необходимо задаться закономерностью изменения плотности теплового потока на поверхности инструмента во времени. При нагреве и охлаждении в среде с постоянной температурой при равномерном температурном поле в начальный момент при $T_c > T_0$ (нагрев) и $T_c < T_0$ (охлаждение) можно воспользоваться граничным условием третьего рода [284]:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\text{сум}} (T_c - T), \tag{6.63}$$

где q – удельный тепловой поток; $\alpha_{\text{сум}}$ – суммарный коэффициент теплопередачи изменением и конвекцией.

Далее составляется система уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T, \\ &q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\text{сум}} (T_c - T), \\ &\frac{T}{T_{t=0}} = T_0 = \text{const}. \end{aligned}\right\} \tag{6.64}$$

Решая систему уравнений (6.64) для одномерного температурного поля неограниченной пластины, когда $\nabla^2 = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, получим следующее выражение

для определения в общем виде относительной температуры пластины (бруска):

$$\theta = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos\mu_n \cdot \frac{x}{L} \cdot \exp\left(-\mu^2 F_0\right), \tag{6.65}$$

где F_0 – критерий Фурье.

Тогда относительная температура поверхности пластины (бруска)

$$\theta_n = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos\mu_n \cdot \exp\left(-\mu_n^2 F_0\right), \tag{6.66}$$

а температура в центре пластины (бруска)

$$\theta_{\text{ц}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \exp\left(-\mu^2 F_0\right), \tag{6.67}$$

где θ – безразмерная относительная температура, при расчетах нагрева $\theta = \dfrac{T - T_0}{T_{\text{с}} - T_0}$, при расчетах охлаждения $\theta = \dfrac{T_0 - T}{T_0 - T_{\text{с}}}$; T_0 – начальная температура тела; $T_{\text{с}}$ – температура среды; A_n – переменный коэффициент, зависящий от интенсивности теплопередачи, который определяется по следующей формуле:

$$A_n = \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n + \cos\mu_n}. \tag{6.68}$$

Значение μ_n определяется из характеристического уравнения [281]:

$$\operatorname{ctg}\mu = \frac{1}{B_i} \cdot \mu. \tag{6.69}$$

В случае абразивного инструмента в виде круга режим нагрева и охлаждения характеризуется следующими уравнениями:

– теплопроводности в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} + \frac{\partial T}{\partial r} \right); \tag{6.70}$$

– граничного условия

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{\text{сум}} (T_c - T); \tag{6.71}$$

– начального условия

$$T_{\tau=0} = T_0 = \text{const.} \tag{6.72}$$

Для неограниченного цилиндра (круга) относительная температура

$$\theta = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot J_0 \cdot \left(\mu_n \cdot \frac{r}{R} \right) \cdot \exp\left(-\mu^2 F_0 \right). \tag{6.73}$$

Относительная температура поверхности цилиндра

$$\theta_{\text{п}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot J_0 \cdot (\mu_n) \cdot \exp\left(-\mu^2 F_0 \right), \tag{6.74}$$

– а температура центра цилиндра

$$\theta_{\text{ц}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \exp\left(-\mu^2 F_0 \right). \tag{6.75}$$

В уравнениях (5.61), (5.62) и (5.63)

$$A_n = \frac{2 \cdot B_i}{J_0 \cdot (\mu_n) \cdot \left(\mu_n^2 + B_i^2 \right)}; \tag{6.76}$$

$$B_i = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R,$$

где R – радиус цилиндра (круга); $J_0(\mu_n)$ – функция Бесселя первого рода, нулевого порядка от аргумента μ_n, который определяется из характеристического уравнения:

$$\frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{B_i}, \tag{6.77}$$

где $J_1(\mu_n)$ – функция Бесселя первого рода, первого порядка от аргумента μ_n.

Для использования указанных решений в практических расчетах термообработки АИ необходимо в первую очередь определить численные значения параметров входящих в эти решения. Затем, применяя систему Mathcad 2001 i Professional, процесс обработки данных можно свести к простому вводу эмпирических значений параметров в программу ПЭВМ.

Кроме того, для графической интерпретации аналитических решений уравнения теплопроводности необходимо установить наименьшее число кри-

териев и симплексов, определяющих процесс теплопередачи в принятых краевых условиях. Для этих целей применяя теорию подобия [269], в частности, π-теорему, получаем в окончательном виде следующее уравнение:

$$\theta = F_x\left(x, \frac{1}{B_i}, F_{0x}\right) \cdot F_y\left(y, \frac{1}{B_i}, F_{0y}\right) \cdot F_z\left(z, \frac{1}{B_i}, F_{0z}\right) \cdot \qquad (6.78)$$

Выражение (6.78) есть решение задачи по определению наименьшего числа критериев и симплексов.

Используя графики численных расчетов решений уравнения теплопроводности, которые представлены в работе [86], производился расчет температурно-временных режимов закалки абразивного инструмента. Результаты расчетов представлены на рис. 6.11. Анализ полученного температурно-временного графика показывает, что отношение времени нагрева, выдержки и охлаждения к общему периоду термообработки находятся соответственно в следующем соотношении: 0.36, 0.18, 0.46, что совпадает с расчетами параметров термообработки, приведенными в Приложении П2. Это свидетельствует о правильности выбора модели расчета температурно-временных режимов закалки АИ на керамической связке.

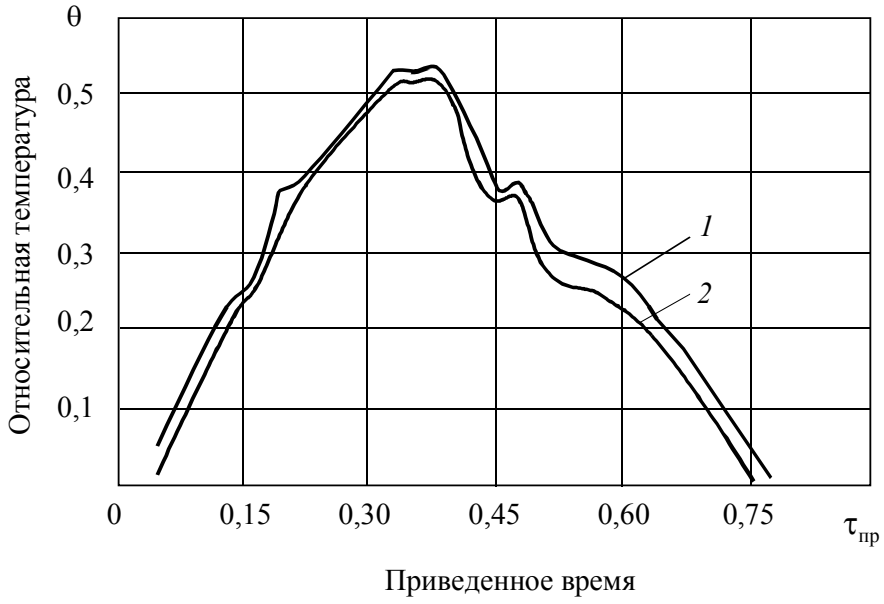


Рис. 6.11. Зависимость относительной температуры образца инструмента на керамической связке от приведенного времени термообработки:
1 – температура поверхности образца; *2* – температура в центре образца

Таким образом, разработанная модель и методика расчета температурно-временных режимов термообработки АИ позволяет создавать оптимальные условия их термообработки с обеспечением заданных прочностных характеристик.

6.6. Выводы

1. Разработана структурная схема влияния внешних факторов на процессы смачивания и пропитывания АИ, которая показывает, что на кинетику и качество пропитывания существенное влияния оказывает свойства их межфазного состояния и внешние физико-химические воздействия, такие как адсорбционное загрязнение поверхности порового пространства и термообработка инструмента. Определены параметры кинетики пропитки инструмента от его формы, вида внешнего давления и разносторонней пропитки. Установлены расчетные зависимости по кинетике пропитки.

2. Проведены экспериментальные исследования влияния режимов термообработки и сроков хранения инструмента на кинетику процесса его пропитывания расплавом серы. Установлены рациональные режимы термообработки инструмента, при которых наблюдается максимальная скорость пропитывания его расплавом серы. Показано, что интенсивное снижение скорости пропитывания наблюдается в первые дни хранения (до 10 суток) серийного инструмента. Разработана методика исследования качественных показателей импрегнирования шлифовальных кругов.

3. Предложена новая технология импрегнирования серой инструмента, включающая термообработку шлифовальных кругов перед их пропитыванием при 450 … 500 ^{o}C с выдержкой 20 … 30 мин и последующим охлаждением их на воздухе до температуры расплава серы. Установлено, что предлагаемая технология позволяет увеличить адгезию серы к поверхности инструмента в 2,5 раза, степень и коэффициент пропитывания в 1,36 раза и умень-

шить дисбаланс кругов примерно в 2 раза по сравнению с заводской технологией.

4. Результатами сравнительных испытаний доказано, что импрегнирование серой шлифовальных кругов по новой технологии, включающей предварительную термообработку кругов при 450 … 500 ^{o}C с последующей закалкой их на воздухе, обеспечивает повышение эффективности процесса шлифования: режущая способность увеличивается в 1,3 раза, коэффициент шлифования – в 1,5 раза, скорость изнашивания кругов снижается в 1,2 раза, шероховатость (R_a) обработанной поверхности уменьшается в 1,27 раза по сравнению с кругами, импрегнированными по заводской технологии.

5. Для оценки термостойкости абразивного инструмента на керамической связке предложено использовать обобщающий критерий, учитывающий интенсивность нагрева черепка инструмента и соотношение меры его хрупкости и термической деформации. Установлены зависимости термостойкости инструментов от их пористости и структуры, определены температурно-временные режимы термообработку абразивного инструмента и разработана имитационная модель и методика расчета, позволяющие определять оптимальные условия термообработку обеспечением заданных прочностных свойств инструмента.

7. МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

7.1. Определение оптимальной последовательности в выборе характеристик инструментов для их совершенствования

Опыт эксплуатации АИ показывает, что для повышения качества и эффективности процесса шлифования требуется часто проводить их совершенствование путем направленной модернизации или модификации. Приступая к этому, необходимо, в первую очередь, решить вопрос, какие характеристики инструмента нуждаются в улучшении и какие эксплуатационные показатели должны быть повышены и как эти изменения в целом повлияют на качество и производительность шлифования.

Выбор и оптимизацию структурно-технологических путей регуляции характеристик инструмента можно выполнить на основе метода получения обобщенной оценки показателей технического уровня модернизируемого изделия путем соединения единичных показателей в обобщенные с помощью коэффициентов весомости [76]. Для этих целей необходимо исследовать функцию многих переменных, чтобы определить такую характеристику, показатель которой при изменении его на ΔP дает наибольший прирост функции ∂P. Эта задача относится к классу задач оптимизации проектных решений методом градиентного подъема [46]. При этом используется следующая формула:

$$grad(P_0) = \left(\frac{\partial P_0}{\partial x_1}, \frac{\partial P_0}{\partial x_2}, \ldots, \frac{\partial P_0}{\partial x_n} \right), \tag{7.1}$$

где P_0 – обобщенный показатель;

$x_1, x_2, \ldots, x_n$ – комплексные характеристики объекта.

Затем для определения величины изменения ΔP составляется матрица (7.2):

$$\begin{vmatrix} \dfrac{\partial^2 P_0}{\partial x_1^2}, \ldots, \dfrac{\partial^2 P_0}{\partial x_1 \cdot \partial x_n} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dfrac{\partial^2 P_0}{\partial x_n}, \ldots, \dfrac{\partial^2 P_0}{\partial x_n^2} \end{vmatrix}, \tag{7.2}$$

норма которой выражается следующим равенством:

$$N = \sqrt{\sum_{i,j} \left(\frac{\partial^2 P_0}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2}. \tag{7.3}$$

При этом величина ΔP, обеспечивающая отыскание максимума P_0, выбирается исходя из обеспечения условия:

$$\Delta P \le \frac{1}{N}. \tag{7.4}$$

В данном случае необходимо изучить динамику изменения обобщенного показателя и последовательность единичных свойств (характеристик), оказывающих наибольшее влияние на изменение P_0 при отыскании градиента в каждой точке функции $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Исследуя градиент функции обобщенного показателя, можно смоделировать оптимальный путь совершенствования инструмента и последовательность структурно-технологической регуляции и стабилизации его характеристик.

Оптимизация путей структурно-технологической регуляции характеристик абразивного инструмента предложенным методом ведется следующим образом. Первоначально устанавливаются значимость и первоочередность характеристик инструмента, их интервал и предел изменений, а также вид функции $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ при $x_{0j} \le x_j \le x_{j\,\max}$. Затем выбирается обобщенный показатель P_0 и задается его требуемое значение P_0^{TP}. Далее вычисляются значения функции в точках с координатами $P_0(x_{0,\,1}, \ldots, x_{0,n})$ и определяются новые его значения при условии, что каждому из аргументов дается приращение ΔP. В результате этого находится приращение функции $\Delta P_{0,\,i}$ при изменении каждого показателя на величину ΔP по следующему выражению:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{0,1} &= P_{0,1} - P_0 \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\Delta P_{1,N} &= P_{0,N} - P_0.
\end{aligned} \tag{7.5}$$

После этого полученные функции ранжируются в соответствии с приращением $\Delta P_{0,j}$. Для всех $j = 1, \ldots, N$ вычисления повторяются до тех пор, пока

$$P_{0j} \geq P_0^{TP}. \tag{7.6}$$

По окончании вычислений строится график выбора оптимизируемых характеристик инструмента, при этом по оси ординат откладываются значения P_0, а по оси абсцисс – значения характеристик инструмента.

Для решения поставленной задачи в качестве объектов исследования брались электрокорундовые АИ на керамической связке. В табл. 7.1 представлены характеристики инструментов и пределы их изменения по экспертным оценкам. За обобщенный показатель бралась производительность шлифования $Q_м$. Режимы обработки: скорость круга $V_{кр}$ = 35 м/с, продольная подача S = 20 м/мин, поперечная подача $S_п$ = 1,5 мм/ход, глубина шлифования t = 0,01 мм.

Т а б л и ц а 7.1

Характеристики абразивных инструментов и обобщенный показатель

Характеристики и их пределы изменений	1	2	3	4
	Зерновой состав абразива у инструментов с $Z = 16 \div 40$	Структура C = 4, …, 9	Твердость T = М2, …, СМ2	Пористость П = 30, …, 60 %
Обобщенный показатель (съем металла, $см^3$/мин)	0,03 – 0,08	0,07 – 0,10	0,06 – 0,09	0,04 – 0,08

С учетом данных, представленных в табл. 7.1, были проведены все необходимые расчеты по выбору оптимизируемых характеристик инструмента.

Результаты этого расчета сведены в табл. 7.2, по которым построен график, представленный на рис. 7.1.

Таблица 7.2

Расчетные данные для выбора оптимизируемых характеристик инструмента

Номер измененного аргумента U	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Обобщенный показатель P_0	0,079	0,081	0,105	0,110	0,116	0,124	0,127	0,139	0,142	0,147
Ранг приращений функции j	I	I	I	III	III	III	IV	II	II	II

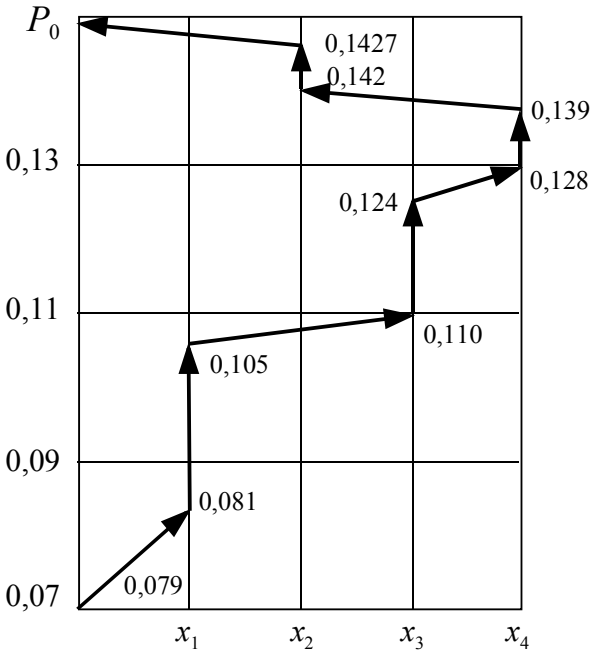


Рис. 7.1. График выбора последовательности совершенствования характеристик инструмента

На графике каждый вертикальный участок кривой показывает повышение производительности шлифования за счет изменения соответствующей характеристики инструмента, а стрелки показывают переход одной оптимизируемой характеристики к другой. Как видно из графика, в наибольшей степени на съем металла влияет зерновой состав абразивного материала x_1. Вто-

рой по значимости характеристикой является твердость инструмента x_3, третьей – пористость x_4, четвертой – структура x_2. В такой последовательности необходимо совершенствовать абразивный инструмент путем направленного регулирования их структурно-механических характеристик.

7.2. Основные положения методики системно-комплексного подхода к созданию эффективных инструментов

В техническом и технологическом смысле качество и эффективность АИ определяется комплексом свойств: структурными, физико-механическими, функциональными и эксплуатационными. Этот комплекс включает десятки показателей, определяемых количественно или качественно. Технические показатели отражают объективно существующие свойства инструмента, образуют о нем достаточно целостное представление и позволяют определить границы использования данного инструмента в том или ином процессе шлифования. Они могут быть объединены в несколько групп:

1) показатели структурных особенностей инструмента (зернистость, пористость, вид зерна, тип связки, объемное содержание зерна, связки, наполнителей и др.);

2) физико-механические показатели при действии различных нагрузок (предел прочности, модуль упругости, твердость, ударная вязкость, термостойкость, износостойкость и др.);

3) функционально-эксплуатационные показатели (режущая способность, износостойкость, производительность, стойкость, качество шлифованной поверхности детали и т.д.).

Для выявления технических и технологических решений, позволяющих обеспечивать высокоэффективные функциональные свойства и эксплуатационные показатели АИ, необходимо исследование структурно-объемных и прочностных характеристик инструмента, установление степени влияния на них внешней среды, физико-химических и других воздействий, а также изу-

чение функциональных связей между взаимодействиями и показателями инструмента.

В связи с этим рассмотрим АИ в виде подсистемы общей системы «инструмент – среда – деталь». В этой подсистеме «входами» являются управляемые воздействия с целью регуляции и стабилизации свойств и показателей инструмента и неуправляемые фактора, например, воздействия окружающей среды. «Выходы» характеризуют получаемые свойства и показатели инструмента в процессе его изготовления или совершенствования (рис. 7.2).

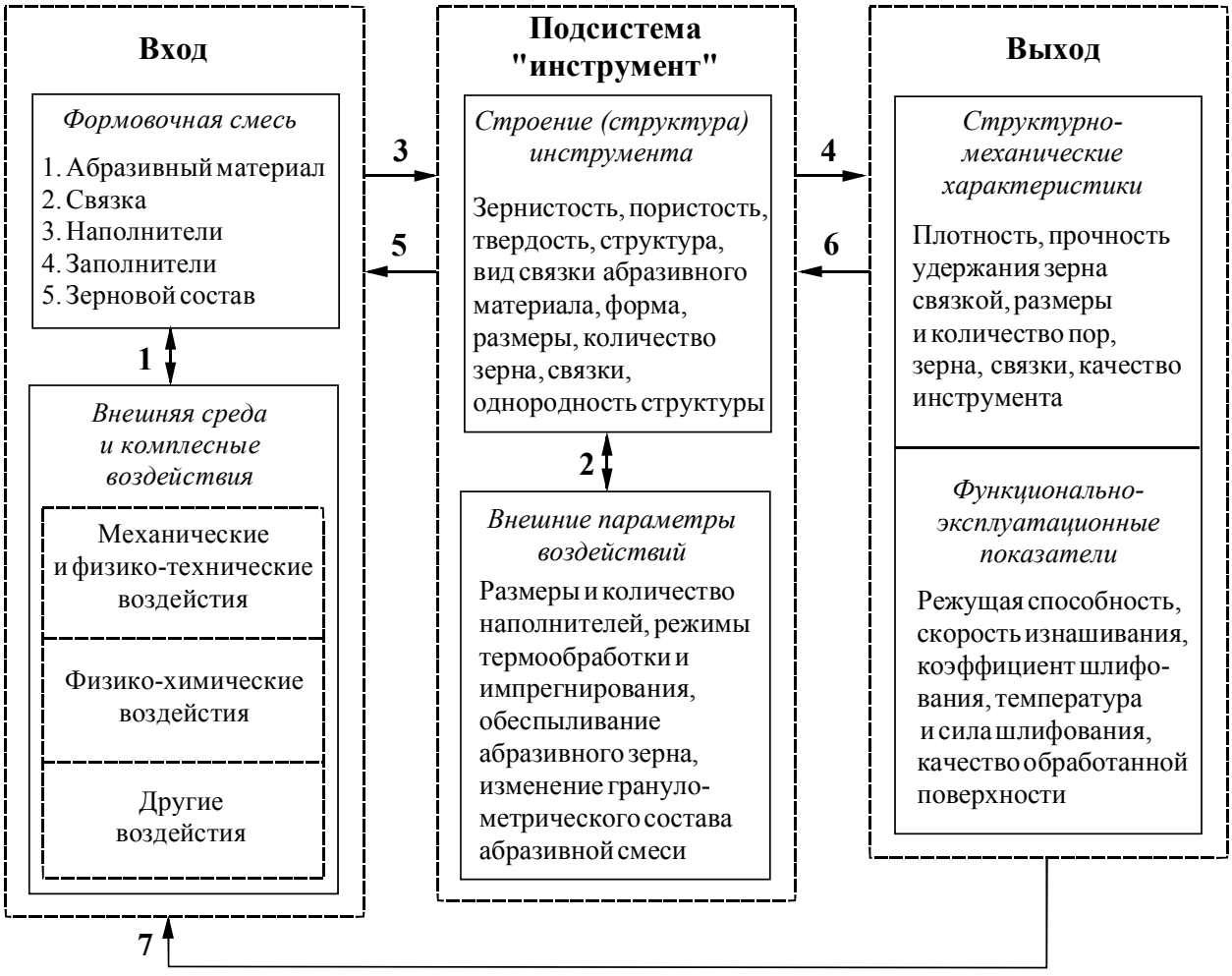


Рис. 7.2. Блок-схема процессов в подсистеме «инструмент»

Блок-схема подсистемы позволяет выделить в общем спектре входные воздействия на структурно-механические характеристики и эксплуатационные показатели инструмента, систему комплексных воздействий, формируемые как система технологических методов регуляции и стабилизации харак-

теристик и показателей инструмента. В ней показаны основные типы связей, существующих в рассматриваемой подсистеме.

Связи 1 обусловлены взаимосвязью вариантов и параметров воздействий на подсистему «инструмент», а также взаимным влиянием технологических решений и внешней среды.

Связи 2 обусловлены взаимосвязью параметров, определяющих состояние подсистемы «инструмент» (структурно-объемные, физико-механические параметры, состояние рабочей поверхности инструмента, внешние механические и физико-химические параметры процесса шлифования).

Так, изменение зернистости инструмента влечет за собой изменение фракционного и объемного соотношения состава наполнителей и в целом формовочной смеси, а также режимов термообработки, импрегнирования и т.п.

Внешние параметры технологических воздействий и параметры структуры инструмента взаимосвязаны между собой, что, в конечном итоге, определяет эффективность свойств инструмента в процессе шлифования.

Прямые связи 3, 4 предполагают изменения свойств и параметров подсистемы «инструмент» при комплексном механическом, физико-технологическом и физико-химическом воздействии на нее, а также при воздействии внешней среды. Закономерности изменения структурно-механических характеристик и эксплуатационных показателей инструмента при реализации различных технологических воздействий исследованы и представлены выше.

Обратные связи 5 и 6 предполагают изменение вида или параметров технологических воздействий при изменении параметров подсистемы. Так, при изготовлении высокопористого инструмента из-за неоднородности структуры снижается механическая прочность, что требует дополнительного воздействия, например, введения мелкодисперсного наполнителя в формо-

вочную массу или импрегнирование такого инструмента веществом, создающим упрочняющий каркас в черепке инструмента.

Обратные связи 7 – связи между входными и выходными параметрами, т.е. функциональными свойствами и эксплуатационными показателями инструмента, а также вариантами и параметрами технологических воздействий и внешней средой. Например, при улучшении структурно-механических свойств инструмента за счет подбора оптимального зернового состава абразивной смеси отпадает необходимость в других вариантах технологических решений для повышения механической прочности инструмента. Таким образом, рассмотрение АИ как подсистемы позволяет выявить не только основные свойства и показатели инструмента, но и технологические способы и методы, применение которых позволит решить проблему эффективного совершенствования АИ.

В качестве примера ниже производится определение зернового состава формовочной смеси с мелкодисперсным наполнителем. Расчет и проектирование зернового состава рекомендуется выполнять по схеме, приведенной на рис. 7.3.

На первом этапе оценивается зерновой состав по гранулометрическому индексу условия и режимы шлифования, а также определяются структурно-механические характеристики инструментов. Результатом оценки должен стать выбор рационального зернового состава с наполнителем. На втором этапе производится выбор и обоснование структурно-технологического способа регулирования свойств и показателей инструмента в зависимости от конкретных производственных задач, и выполняются на основе анализа характера зависимости этих параметров от количества наполнителя. Определяется ориентировочный зерновой состав, содержание отдельных фракций, формы зерен и частиц наполнителя, вид абразивного наполнителя (электрокорунд, карбид кремния или другие виды абразивов) и т.п. При этом используется связка, как в аналогичных инструментах, без наполнителей.



7.3. Схема этапов определения зернового состава формовочной смеси с наполнителем

На третьем этапе определяется размер частиц и дозировка наполнителя, влияющая на эксплуатационные показатели и механическую прочность черепка инструмента путем экспресс испытаний инструментов. Критическим значением содержания наполнителя принимается то количество наполнителя, превышение которого приводит к снижению показателей шлифования.

На четвертом этапе при расчете и назначении зернового состава шлифматериалов с наполнителем следует исходить из содержания компонентов серийного абразивного инструмента без наполнителя. При этом, ориентировочное содержание абразивного зерна и связки в зависимости от твердости и структуры инструмента определяются по формулам (4.7) и (4.8). Размер частиц и содержания наполнителя в формовочной смеси для изготовления инструмента рассчитываются по формулам (4.11) и (4.12).

После расчета содержания всех компонентов инструмента изготавливаются опытные образцы для оценки их характеристик и показателей.

На пятом этапе путем соответствующего корректирования содержания отдельных компонентов инструмента исходя из производственных условий абразивных заводов и наличия того или иного компонента или их замены назначается окончательный производственный зерновой состав формовочной смеси.

На рис. 7.4 представлена структурная и функциональная схема системы «инструмент – среда». В центре этой схемы показаны структурные элементы рассматриваемой системы. Входом данной системы в качестве примера представлены регулирующие и стабилизирующие воздействия: термическая обработка, пропитывание и импрегнирование инструмента; последовательность и режимы этих воздействий. Выходом системы являются улучшенные структурно-механические и эксплуатационные характеристики инструмента.

Таким образом, системный подход к изучаемой проблеме, позволяющий осуществить ее комплексное решение, предполагает следующее. АИ рассматривается как подсистема, изменяющая свое состояние в процессе эксплуатационного цикла, текущее состояние которой определяется в процессе шлифования. Технико-технологическое решение по изготовлению или

совершенствованию инструмента формируется как система методов и способов, реализующих комплексные механические, физико-химические воздействия и технологические режимы.

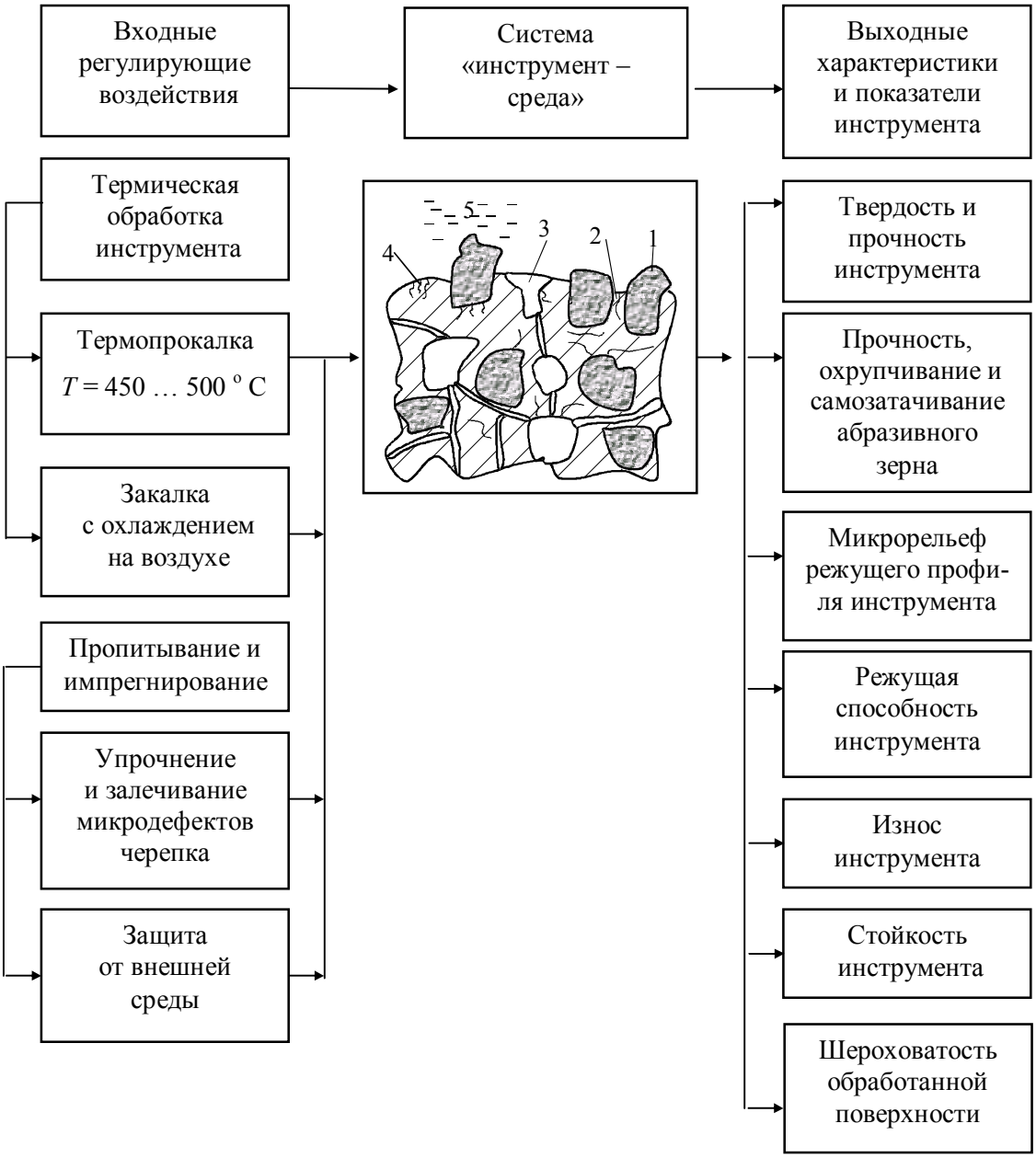


Рис. 7.4. Структурная и функциональная схема системы «инструмент – среда»:
1 – абразивное зерно; *2* – мостик связки; *3* – поры; *4* – микродефекты;
5 – внешняя среда

Такой системный и комплексный подход к анализу проблемы обеспечения высокоэффективных функционально-эксплуатационных свойств инструмента позволяет разработать основные этапы решения поставленных задач.

Первоначальным этапом решения является изучение и выявление основных физико-механических и технологических свойств, а также рационального зернового состава абразивной смеси, определяющих качественные показатели инструмента после его изготовления. Затем рассматриваются основные технологические факторы и внешние воздействия разного характера, влияющие на структурно-механические характеристики, качество и функционально-эксплуатационные показатели инструмента. При этом анализируется возможность применения различных воздействий: механических, физико-технических, химических и комбинированных или совмещенных. После этого производится выбор вариантов и параметров регулирующих воздействий с целью выявления высокоэффективных свойств инструмента и показателей процесса шлифования.

Одновременно с этим должны устанавливаться зависимости и корреляционные взаимосвязи рассматриваемых свойств инструмента от параметров и режимов комплексных внешних воздействий и процесса шлифования. С этой целью производится построение математических моделей и проводятся соответствующие теоретические и экспериментальные исследования.

Заключительным этапом является разработка комплексного технико-технологического обеспечения при создании и совершенствовании абразивного инструмента с регламентированными свойствами для повышения эффективности процесса шлифования.

Выше приведенная методология легла в основу разработки технико-технологических принципов совершенствования структурно-механических характеристик и показателей АИ.

7.3. Технико-технологические принципы совершенствования характеристик и показателей инструментов

Неотъемлемой частью технологического обеспечения высокоэффективных свойств и показателей АИ является проведение соответствующих

мероприятий. Эти мероприятия включают формирование методологии и разработку моделей изучаемых процессов. Теоретические наработки и практика совершенствования инструмента позволяют разработать соответствующие принципы, в основу которых входят методы последовательных приближений и компромиссной логики, систематизация и классификация всех нововведений в области производства инструмента и его эксплуатации, информатизация о совокупности возможных нововведений и степени их готовности к использованию, обоснованный и критический анализ результатов нововведений и планирование теоретических и экспериментальных исследований.

В основу модели процесса совершенствования инструмента входят изучение адаптивных свойств инструмента при воздействии внешней среды, а также эффективности нововведений и их влияния на структурно-механические характеристики, функциональные, эксплуатационные свойства инструмента в целом.

Проведенные исследования позволили определить различные аспекты влияния внешних воздействий и среды на структурно-механические свойства и эксплуатационные показатели инструмента. Реализованный в работе комплексный метод исследования и системный подход к анализу процессов и явлений позволил получить новые теоретические и практические результаты в решении проблемы повышения качества инструмента и эффективности процесса шлифования.

В методическую основу научных исследований были положены теоретические положения работ по шлифованию и диспергированию материалов, физико-химической механике, молекулярной физике поверхностных сил и взаимодействий, физико-химическим основам смачивания, пропитывания и импрегнирования. Это позволило однозначно выявить причины изменчивости свойств и показателей инструмента и установить основные факторы, влияющие на эти изменения. Полученные результаты исследований явились основой для разработки технико-технологических принципов совершенство-

вания свойств серийного инструмента при подготовке его непосредственно к работе или в период его изготовления на абразивных заводах.

Для решения поставленной задачи, в первую очередь, необходимо рассмотреть известные способы воздействий для управления свойствами инструмента или процессом шлифования, которые в той или иной мере повышают производительность и качество обработанной поверхности изделия. При этом сущность любого способа будем характеризовать законами и закономерностями тех процессов и явлений, которые используются в качестве средств воздействия на инструмент и на обрабатываемый материал.

Известно, что серийный АИ зачастую не полностью удовлетворяет требованиям производства по точности его изготовления и неуравновешенности масс. В связи с этим наиболее распространенным регулирующим способом является механический способ, включающий в себя технологическую подготовку инструмента в виде обтачивания, нарезания с целью формирования заданной поверхности инструмента, балансировки и правки инструмента, так и его работу на оптимальных режимах шлифования в каждом конкретном случае.

Необходимость шлифования труднообрабатываемых и высокотвердых материалов привела к разработке новых способов, основанных на физических и химических управляющих воздействиях – использовании ультразвука, термообработки, рациональных смазочно-охлаждающих жидкостей и других технологических воздействий.

В тех случаях, когда при шлифовании нельзя применять СОЖ, серийный инструмент при работе всухую не обеспечивал требуемого качества и производительности, стали использовать пропитанный (импрегнированный) СОТС инструмент. Попытка уменьшить брак по прижогам при шлифовании без охлаждения путем применения более мягких не импрегнированных шлифовальных кругов приводила к повышенному износу инструмента и снижению производительности. Такой путь повышения качества обрабатываемой

поверхности нельзя считать эффективным, а выбор регламентирующего воздействия является ошибочным.

Анализ и систематизация внешних воздействий, их комбинаций и сочетаний позволили разработать укрупненную классификацию способов воздействий для изменения свойств инструмента, которая представлена на рис. 7.5.

Основными блоками этой классификации являются механические, физические, химические и комбинированные способы воздействия. Однако наибольший интерес представляет блок комбинированных способов и их сочетаний. Это объясняется тем, что при сочетании двух или трех физических, механических или химических воздействий можно получить инновационно-технологические эффекты, обеспечивающие как создание новых качеств серийного АИ, так и значительное повышение производительности и качества шлифованных изделий. Например, сочетание технологической подготовки инструмента к работе и применение СОЖ привело к интенсификации процесса шлифования, увеличению стойкости инструмента, устранению брака обработанных поверхностей в виде прижогов и других дефектов. В этом направлении сделаны лишь первые шаги и заложены большие возможности для создания новых, более эффективных способов регулирующих воздействий.

При поиске и выборе рациональных сочетаний способов, представленных на рис. 7.5 необходимо, в первую очередь, учитывать физико-химические и структурно-механические свойства АИ и обрабатываемой поверхности изделия. Перечень совмещаемых воздействий, их режимы, последовательность действия следует подбирать таким образом, чтобы они взаимно активизировали друг друга. Число сочетаемых способов воздействий в каждом конкретном случае следует соотносить с техническими возможностями производства, экономической целесообразностью и экологической безопасностью.

Критериями правильности выбранного сочетания способов воздействий на АИ должны служить достигаемые показатели качества и производительности процесса шлифования.



Рис. 7.5. Укрупненная классификация способов воздействий

Рассмотрим решение задачи выбора рациональных сочетаний и последовательности действий технологических воздействий на примере совершенствования серийного АИ на керамическом связующем с целью повышения его эксплуатационных свойств за счет термообработки и импрегнирования, т.е. совмещения физического и химического способов воздействия.

Следует отметить, что эти способы воздействия давно и широко известны [91, 117], но их применение для повышения эксплуатационных свойств АИ в каждом случае осуществлялось раздельно. Так, применение только импрегнирования инструмента технологическими средами (серой, смолой – шеллаком и др.) не позволяло получить качественную пропитку инструмента, особенно мелкозернистого, на что указывают сами авторы этого способа [23], рекомендуя процесс пропитки одного и того же инструмента повторять несколько раз. Неудовлетворительное качество и неравномерность пропитки инструмента объясняются тем, что АИ время его хранения подвержен адсорбции влаги и различным загрязнениям органического и неорганического происхождения. Все это приводит к уменьшению капиллярного всасывания поровым пространством инструмента и неудовлетворительному качеству его импрегнирования, что подтверждено исследованиями [157].

Известны также способы повышения эксплуатационных свойств АИ на керамическом связующем за счет термообработки и закалки в холодной среде (жидком азоте, воде и др.) [117, 118]. Недостатком этого способа является невозможность полной и равномерной закалки инструмента, особенно шлифовальных кругов с большой высотой, так как охлаждающая жидкость, соприкасаясь с нагретыми поверхностями инструмента, имеющими температуру выше температуры кипения, мгновенно превращается в пар и образует паровые подушки в порах инструмента. Из-за этого жидкость не полностью пропитывает инструмент и происходит неравномерная закалка по высоте. Кроме того, паровые подушки из-за газообразных продуктов кипения препятствуют созданию внутри инструмента градиента температуры для закалки. Вероятно, поэтому авторы способа рекомендуют такую закалку произво-

дить многократно. Другим существенным недостатком этого процесса является непродолжительный период сохранения повышенной стойкости и режущей способности инструмента, приобретенных при закалке, из-за отсутствия защиты от воздействия окружающей среды на инструмент. За короткое время происходит адсорбционное понижение прочности абразивных зерен и связки инструмента согласно эффекту Ребиндера, а если использовать такой инструмент с водными СОЖ, то свойства, приобретенные за счет закалки инструмента, теряются практически мгновенно, что также подтверждено исследованиями [157].

Таким образом, приведенные выше примеры показывают, что заложенные потенциальные возможности технологических воздействий (физических и химических способов) не полностью используются, если эти воздействия применяются раздельно, а не в комбинации и сочетаниях.

В связи с этим была поставлена задача подобрать последовательность действия совмещенных физико-химических воздействий и их режимы с учетом того, чтобы эти воздействия (термообработка и импрегнирование) дополняли и взаимно активизировали друг друга.

Последовательность действия совмещенных воздействий заключается в следующем. Первоначально термообработку инструмента проводят при температуре 450 – 500 °С с выдержкой 20...30 мин в нагревательном устройстве, потом производят его закалку охлаждением на воздухе, а затем подвергают пропитыванию гидрофобным импрегнатором (расплавом серы) при равной температуре инструмента и импрегнатора [221].

Рассмотрим ниже, как выбранные технологические воздействия дополняют и взаимно активизируют друг друга. Как показали исследования, термическая обработка положительно влияет на механические свойства абразивного зерна и мостиков связки, но зона их контакта при этом может получить ослабление из-за термических напряжений. В то же время импрегнирование инструмента расплавом серы устраняет нежелательное действие термообработки, залечивая (цементируя) дефекты зоны контакта. В данном

случае проявляется дополняющий друг друга эффект совмещения термообработки и импрегнирования.

При термообработка инструмента под воздействием повышенных температур происходит десорбция влаги и выгорание загрязняющих поверхность веществ, что активизирует процесс пропитывания инструмента импрегнатором за счет улучшения смачиваемости, повышения адгезии расплава серы и капиллярности черепка инструмента. Все это приводит к увеличению полноты и равномерности пропитывания инструмента импрегнатором (улучшаются его качественные показатели), а за счет активизации процесса пропитывания повышается производительность этого процесса.

Следует также отметить, что предлагаемая последовательность действия воздействий и их режимов приводит и к другим положительным эффектам. Так, закалка инструмента на воздухе, повышая прочность и самозатачиваемость абразивных зерен, не требует введения дополнительной операции по сушке инструмента, как это было бы при закалке в воде или другой охлаждающей жидкости. Кроме того, охлаждающая среда – воздух свободно проникает в перовое пространство инструмента. Это приводит к полной и равномерной закалке инструмента по всему его объему независимо от его высоты.

Охлаждение инструмента перед пропиткой до температуры технологической среды – импрегнатора устраняет нежелательные факторы, препятствующие свободному проникновению его в поры инструмента, которые могут возникнуть, если инструмент будет иметь температуру выше или ниже, чем раствор или расплав импрегнатора. Например, расплав серы имеет наименьшую вязкость при температуре в пределах 145 – 150 °С. С повышением или понижением температуры от этого предела вязкость серы быстро повышается, что скажется на качестве пропитывания инструмента.

Использование импрегнатора, обладающего гидрофобными свойствами, при пропитывании закаленного АИ позволяет защитить поверхности зерна и порового пространства от воздействия окружающей среды, особенно от влаги, и сохранить на длительное время приобретенные инструментом новые

качества. Одновременно с этим полно и равномерно закаленный и пропитанный инструмент будет иметь постоянные показатели процесса шлифования, что скажется и на улучшении качества поверхности шлифованного изделия. Кроме того, такой инструмент, пропитанный гидрофобным импрегнатором, можно применять с водными СОЖ вместо керосиново-масляных, что значительно уменьшит стоимость и повысит экологичность шлифования.

Как видим, разработанная классификация способов воздействий на АИ, методология комбинирования и совмещения этих способов между собой, установление критерия правильности выбранного их сочетания позволяют создавать новые эффективные способы повышения эксплуатационных свойств серийного АИ.

Кроме того, разработанные технико-технологические принципы совершенствования АИ позволяют выбирать наиболее рациональные способы и технологии регуляции и стабилизации свойств и показателей инструментов. Ниже приведены практические примеры такого выбора.

Известно, что применение высокопористых инструментов позволяет во многих случаях значительно повысить эффективность технологического процесса шлифования. Однако такие инструменты обладают существенным недостатком – низкой прочностью черепка. Для устранения этого недостатка можно использовать следующие способы и технологии модифицирования инструментов. Нововведение заключается в том, что изготовленный высокопористый инструмент подвергается импрегнированию такими растворами или расплавами, которые при взаимодействии с черепком инструмента образуют дополнительный упрочняющий каркас. В качестве импрегнаторов можно использовать жидкое стекло, серу и др.

Однако при пропитке крупновысокопористых инструментов импрегнаторами, например типа жидкого стекла или расплава серы происходит вытекание импрегнатора из пор инструмента во время его выемки из камеры и в начальный момент охлаждения. Для устранения этого недостатка разработаны и запатентованы два способа пропитки инструментов [224, 226]. При ис-

пользовании импрегнатора в виде жидкого стекла в него вводят ферромагнитные частицы размером 5 – 20 мкм в количестве 15 – 30 % от объема импрегнатора и в момент извлечения инструмента из пропиточной камеры и во время сушки или охлаждения подвергают его воздействию внешним магнитным полем до отверждения импрегнатора. Введение в раствор ферромагнитных частиц и воздействие магнитного поля резко повышает вязкость импрегнатора, находящегося в порах инструмента, что предотвращает его вытекание [226].

Другой способ пропитки [224] предназначен для импрегнирования серой высокопористых инструментов. Сущность этого способа заключается в том, что инструмент, подогретый до температуры расплава серы 145 – 150 ^{o}C, помещают в пропиточную камеру для импрегнирования, а после пропитки поднимают температуру расплава серы в камере до 180 – 190 ^{o}C с выдержкой 20 – 30 мин. В этот момент резко повышается вязкость расплава серы, что препятствует вытеканию импергнатора из пор инструмента во время его выемки и в начальный момент охлаждения. После выемки инструмента из камеры производят охлаждение, например проточной водой, со скоростью 30 – 40 ^{o} С/мин до образования полимерной серы в порах инструмента. Следует отметить, что полимерная сера имеет ряд существенных преимуществ перед применяемыми в настоящее время на производствах аллотропами серы (ромбической или моноклинной). Полимерная сера имеет лучшую адгезию к связке и абразивным зернам, в процессе ее твердения в поровом пространстве инструмента практически не возникает внутренних напряжений из-за малой усадки. Обычно применяемая сера при переходе из расплава в твердое состояние сопровождается заметным уменьшением своего объема примерно на 14 %, в то время как полимерная сера при отверждении уменьшает свой объем в пределах 0,5 – 1,8 %.

Разработан новый способ [222], предусматривающий при изготовлении высокопористого инструмента вместо выгорающих наполнителей использовать наполнители, выполненные из абразивного огнеупорного материала, ко-

торый, в свою очередь, адгезионно-инертен к керамической связке. Например, при изготовлении электрокорундового инструмента в качестве материала частиц наполнителя могут использоваться: карбид бора, карбид кремния и др. При этом частицы наполнителя должны иметь равный размер и одинаковую форму с абразивными зернами. Это позволяет получать равномерное перемешивание абразивной массы при изготовлении инструмента, обеспечивая однородность его структуры и качество, а во время обжига инструмента отсутствует процесс образования дополнительных пор в теле его черепка, как в случаях, когда вводятся выгорающие наполнители. За счет этого повышается прочность черепка инструмента. Выполнение частиц наполнителя из адгезионно-инертного материала к керамической связке позволяет увеличивать поровое пространство между абразивными зернами на рабочей поверхности инструмента во время шлифования за счет вырывания слабо закрепленных частиц наполнителя при незначительных нагрузках. Кроме того, абразивные частицы наполнителя при выравнивании производят дополнительное резание поверхности детали, а после их удаления с поверхности инструмента, образовавшиеся за счет этого поры между абразивными зернами, способствуют лучшему расположению стружки, снижению засаливания и увеличению стойкости и производительности инструмента. Предлагаемый инструмент позволяет создавать в процессе шлифования рабочую поверхность, подобную рабочей поверхности высокопористого инструмента при сохранении прочности черепка исходного инструмента заданной структуры.

Для производства обдирочного АИ из карбида кремния разработаны для технических решений на уровне изобретений [223, 223]. Технико-технологические принципы регуляции и стабилизации характеристик и показателей предлагаемых инструментов заключались в следующем. Известно, что общим недостатком всех инструментов из карбида кремния на керамической связке является их низкая механическая прочность. Это объясняется тем, что керамическая связка не реакционноспособна к карбидкремниевым зернам, которые к тому же имеют гладкую поверхность и более широкие уг-

лы режущих граней, что отрицательно сказывается на характере удержания зерна в черепке инструмента. Зерна карбида кремния удерживаются лишь за счет механического заклинивания в связке.

При устранении вышеуказанных недостатков использовался технологический принцип совмещения и комбинирования, заключающийся в том, что в массу для изготовления инструмента из карбида кремния вводятся дополнительно адгезионно-активные к связке абразивные частицы, например зерна электрокорунда. При этом частицы наполнителя имеют размер 0,16 – 0,25 размера зерен карбида кремния, а объем частиц наполнителя составляет 8 – 10 % от общего объема массы. Кроме того, рекомендуется использовать частицы наполнителя пластинчатой и игольчатой формы. Выбор частиц наполнителя адгезионно-активных к связке, а также пластинчатой и игольчатой формы позволяет усилить степень армирования мостиков связки между абразивными зернами и повысить в целом прочность инструмента и, как следствие, увеличить стойкость и производительность инструмента. Таким образом, совмещение двух типов абразивных зерен (карбида кремния и электрокорунда), комбинирование их по объему и форме зерен позволяет создавать АИ с повышенным качеством по прочности и более высокой производительностью. Анализ результатов предварительных испытаний показывает, что АИ, изготовленные из предлагаемых масс, имеют прочность на разрыв в 1,13 – 1,19 раз, коэффициент шлифования в 1,30 – 1,35 раза и стойкость в 1,20 – 1,26 раза выше соответствующих показателей у инструментов прототипов.

При производстве АИ на органических связках наблюдается ряд технологических недостатков: из-за неполного обеспыливания поверхностей абразивных зерен значительно снижается адгезия связки к зернам; присутствие на поверхности зерна пыли и других загрязнений способствует также комкуемости абразивно-бакелитовой смеси, что требует введения большого количества увлажнения, который резко снижает прочность закрепления зерна в связке. Режимы термообработки такого инструмента не способствуют полному удалению адсорбционной влаги и не приводят к повышению прочности

и самозатачиваемости абразивных зерен, т.е. не повышается их режущая способность.

Для устранения указанных недостатков разработан способ изготовления АИ [227], в основу которого положен принцип рациональных сочетаний и последовательности регулирующих воздействий – химического и физического. Способ изготовления инструмента осуществляется следующим образом. Предварительно зерна подвергают обеспыливанию в растворе щелочи NaOH. Затем зерна промываются проточной водой. Удаление пыли с поверхности зерен способствует улучшению смачиваемости зерен жидким бакелитом, увеличению адгезии и уменьшению комкуемости формовочной смеси.

Далее абразивные зерна подвергаются термообработке при температуре 450 – 500 ^{o}C. При этом происходит сушка, десорбция влаги и выгорание загрязняющих поверхность зерен веществ, что также значительно повышает их смачиваемость и адгезию к ним связки, устраняет комкуемость меси, улучшает равномерность и однородность смешивания.

Охлаждение абразивных зерен на воздухе до температуры технологического процесса смешивания (до 60 – 100 ^{o}C) позволяет повысить прочность и самозатачиваемость зерен за счет значительного перепада (градиента) температур.

В результате испытаний установлено, что режущая способность и стойкость инструмента, изготовленного по предлагаемому способу, возросли по сравнению с прототипом соответственно в 1,6 и в 2,1 раза. Это свидетельствует о целесообразности практического использования разработанного способа изготовления АИ [227].

Таким образом, приведенные выше примеры свидетельствуют о больших потенциальных возможностях применения технико-технологических принципов совершенствования характеристик и показателей инструментов с целью повышения их эффективности, надежности и качества. Полученные результаты служат основанием для рекомендации разработанной методоло-

гии изыскания и оценки способов и вариантов совершенствования абразивных инструментов для практического применения.

7.4. Выводы

1. Определена оптимальная последовательность совершенствования основных характеристик АИ. Установлено, что в наибольшей степени на производительность по съему металла влияет зерновой состав абразивного материала, второй по значимости характеристикой является твердость, третьей – пористость и четвертой – структура инструмента.

2. Рассмотрены основные положения методики системно-комплексного подхода к созданию высокоэффективных АИ путем их совершенствования. Разработана подсистема «инструмент» общей системы «инструмент – среда – деталь», дан анализ основных связей и процессов в данной подсистеме, которые позволяют выявить не только свойства и показатели инструмента, но и наметить пути и технологические способы эффективного совершенствования.

3. Разработана структурно-функциональная схема системы «инструмент – среда», позволяющая проектировать технико-технологическое обеспечение при создании высокоэффективных АИ.

4. Разработаны научно обоснованные, базирующиеся на системном анализе, технико-технологические принципы регулирования и стабилизации структурно-механических характеристик и функциональных показателей инструментов.

5. Представлена классификация способов воздействий и регулирования, их комбинация и сочетаний. Разработана методика комбинирования и совмещения технико-технологических воздействий между собой. Даны примеры разработки эффективных способов, абразивных инструментов и составов формовочных масс на уровне изобретений и патентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведения системных и комплексных исследований решена крупная научная проблема разработки научно обоснованных технологических принципов проектирования и изготовления шлифовальных кругов для высокоэффективной и качественной обработки деталей машин, имеющая важное производственное и экономическое значение.

2. На основе результатов теоретических исследований установлены новые закономерности формирования и структурообразования черепка инструментов. С помощью разработанных нами основ контактно-капиллярной связности абразивных зерен с расплавленной связкой и модели напряженного состояния неоднородной матрицы вскрыты причины и механизмы разупрочнения черепка инструмента во время его обжига и охлаждения. Получены зависимости плотности упаковок и распределения абразивных зерен и частиц наполнителей в формовках от их объемного содержания и основных структурных характеристик АИ.

3. Разработаны научные основы создания высокоэффективных шлифовальных кругов с использованием наполнителей и смесей абразивов разных зернистостей. Впервые получены аналитические зависимости для определения рациональных размеров частиц наполнителей и оптимального их содержания в формовочных смесях, а для смесей, состоящих из абразивных материалов разной зернистости, выведены расчетные уравнения определения их процентного содержания от соотношения соответствующих номеров зернистостей. Экспериментальная проверка показала, что опытные шлифовальные круги обладают более высокой эффективностью, стабильностью и качеством шлифования по сравнению с существующими АИ.

4. Установлены общие закономерности влияния внешней среды, термообработки и импрегнирования на прочностные свойства электрокорундового зерна, механическую прочность, твердость, инструмента, кинетику и качество пропитывания расплавом серы. Аналитическим путем определены

основные параметры кинетики пропитки инструмента от его формы, вида внешнего давления и других условий пропитки. Разработана новая технология импрегнирования серой инструментов, включающая их термообработку перед пропитыванием при 450 ÷ 500 оС с последующим охлаждением до температуры расплава серы. Доказано, что шлифовальные круги, импрегнированные по новой технологии, обеспечивают значительное повышение эффективности процесса шлифования.

5. На основе анализа критериев термостойкости предложено использовать обобщающий критерий, учитывающий интенсивность нагрева черепка инструмента и соотношение меры его хрупкости и термической деформации, что позволило установить зависимости термостойкости инструментов от их пористости и структуры. Получены расчетные зависимости для определения разрушающего перепада температур и продолжительности нагрева черепка АИ. На этой основе определены оптимальные режимы термообработки шлифовальных кругов, позволяющие обеспечивать заданные нормы их прочностных свойств. Предложена модель и методика расчета температурно-временных режимов термообработки инструментов с разными характеристиками.

6. Представлена методология разработки технико-технологических решений при создании высокоэффективных АИ. Разработаны структурно-функциональные схемы подсистем «инструмент» и «инструмент – среда», классификация внешних воздействий, их комбинаций и способов регулирования характеристик инструментов. Разработанные научно обоснованные технологии и процессы совершенствования АИ позволили спроектировать и создать новые шлифовальные круги и составы формовочных масс, а также эффективные способы повышения эксплуатационных свойств и их пропитки расплавом серы, на которые получены свидетельства на изобретения и патенты. Приведены сведения о практическом использовании и внедрении научных результатов и разработок на производстве, которые имеют важное хо-

зяйственное значение для развития нашей страны в части импортозамещения абразивной продукции.

7. На основе результатов теоретико-экспериментальных исследований в работе разработан технологический регламент проектирования и изготовления шлифовальных кругов с использованием мелкодисперсных и порообразующих абразивных наполнителей, смесей абразивов разной зернистости, а также термообработки и импрегнирования готовых инструментов расплавом серы. Опытные и производственные испытания таких шлифовальных кругов показали, что их режущая способность повысилась на 20-40 %, коэффициент шлифования на 25-50 %, стойкость на 30-80 %. Одновременно с этим параметр шероховатости R_a уменьшился на 18-34 % и резко сократился брак деталей по прижогам.

8. Основные научные положения и экспериментальные результаты работы апробированы и подтверждены актами производственных испытаний и внедрения на предприятиях: ООО «ВолгаТАЙР»; ООО НПКО «Маштехсервис»; ОАО «Волжский подшипниковый завод» Европейской подшипниковой компании; ОАО «УК ЕПК», ООО «ИНФ-АБРАЗИВ».

Принятые в работе обозначения

$A_ф$ – функция поверхностной энергии, вязкости, диффузии;

a_T – коэффициент температуропроводности;

B – смачивание;

B_i – критерий БиО;

C – структура инструмента;

$d_з$, $d_п$, $d_с$ – размеры зерна, поры и частиц связки соответственно;

$d_{нп}$ – размер частицы порообразующего наполнителя;

$d_{ср}$ – средний размер зёрен;

E_i – энергия связи и взаимодействий;

F_a – сила адгезии;

F_c – сила сцепления между зернами;

$H_И$ – износостойкость инструмента;

$H_{P\max}$, $H_{гр}$ – максимальная и граничная высота профиля;

H_v – микротвердость;

$h_н$ – глубина наклепа;

h_p – разновысотность зерен на поверхности инструмента;

$K_{св}$, $K_з$, $K_{нз}$ – коэффициенты, учитывающие тип связки, объемную долю зерна и номер зернистости;

$K_{вз}$, $K_о$, $K_ф$ – коэффициенты, характеризующие вид, качество, форму зерна соответственно;

K_Z, K_V, K_d – соотношения между зернистостями, объемным содержанием абразивов, размерами зерна и частицами наполнителя;

$l_{пр}$ – средневероятный размер поверхностной поры;

$l_{ср\,p}$ – среднее расстояние между зернами на уровне p;

N – номер шифра твердости инструмента;

$N_к$ – координационное число;

$n_р$ – статическое количество зерен на рабочей поверхности инструмента;

P, $P_с$, P_k – разрушающая нагрузка, сила сцепления и когезионная прочность;

$P_{пр}$ – удельное давление прессования;

$П_{ст}$, $П_{вп}$ – пористость стандартного и высокопористого инструментов соответственно;

R_{KT} – критерий термопрочности материала;

R_i – радиус сфер (частиц);

T – температура;

$T_и$ – твердость инструмента;

t_p – относительная длина профиля поверхности инструмента;

$V_з$,$V_{св}$, $V_н$, $V_п$ – объемное содержание зерна, связки, пор и наполнителя соответственно;

$V_{р\cdot св}$ – объемное содержание расплава связки;

$V_{ос}$ – относительное содержание связки;

$V_к$, $V_с$, $V_м$ – объемное содержание зерен крупной, средней и мелкой зернистостей;

W, W_0 – влажность и оптимальная влажность;

Z – зернистость инструмента;

γ_1, γ_2 – удельные веса зерна и частиц наполнителя;

$\gamma_{св}$, $\gamma_з$ – плотность связки и зерна;

η – вязкость жидкости;

$\lambda_Т$ – теплопроводность;

θ – краевой угол смачивания;

$\sigma_{из}$,$\sigma_р$, $\sigma_{сж}$ – пределы прочности на изгиб, растяжение и сжатие;

$\sigma_с$ – прочность структуры смеси;

σ_t – предел прочности при тепловом нагружении;

σ_τ , σ_θ, σ_r – тангенциальные и радиальные напряжения;

$\rho_у$ – плотность упаковки зерен.

$\rho_н$ – насыпная плотность зерна;

$\tau_р$ - период времени;

$\varphi_з$, $\varphi_{с.кр}$ - объемная концентрация зерна и связки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абезгауз Г.Г., Тронь А. П., Копенкин Ю.П. и др. Справочник по вероятностным расчетам. – М., 1970. – 563 с.

2. Абовский Н.П., Андреев И.П., Деруга А.П., Савченков В.И. Численные методы в теории упругости и теории оболочек. – Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1986. – 384 с.

3. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

4. Абрамсон А.А. Поверхностно-активные вещества. – Л.: Химия, 1975. – 248 с.

5. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей / Пер. с англ. Д. М. Толстого. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1974. – 552 с.

6. Адушкин Л.Е., Бакунов В.С., Гузман И. Я., Полубояринов Д.Н. Строение керамики и его влияние на свойства // Неорганические материалы, – 1970. – Т. 6. – № 4. – С. 753 – 758.

7. Алейников С.М. Метод граничных элементов в контактных задачах для упругих пространственно неоднородных оснований. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 754 с.

8. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. – М.: Наука, 1973. – 576 с.

9. Александрович А.Н. Плоская неоднородная задача теории упругости // Вестник Моск. унт-та. – 1973. – № 1. Математика и механика. – С. 105 – 115.

10. Ананьян Р. В. Исследование эксплуатационных свойств шлифкругов из электрокорундовых материалов с заданной пористостью: дис. … канд. техн. наук. 05.03.01 / Ананьян Рафаэль Вазгенович. – М., 1978. – 196 с.

11. Андреев В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: монография. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 288 с.

12. Андреев В.И., Шищиц И.Ю. Исследование напряжений вокруг отверстий в пространстве с учетом сжимаемости материалов // Сб. тр. / Моск. инж.-строит. ин-т. – 1974. – № 118. – С. 59 – 62.

13. Андриевский Р.А. Пористые металлокерамические материалы. – М.: Металлургия. – М., 1964. – 187 с.

14. Анохин В.И., Крюков С.А. Совершенствование шлифовальных кругов для подшипниковой промышленности / Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. тр. – Волжский, 1998. – С. 3 – 5.

15. Ардашев Д. В. Оценка работоспособности шлифовального круга по комплексу эксплуатационных показателей: дис. … канд. техн. наук. – Челябинск, 2005. – 254 с.

16. Армагеро И. Дж., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

17. А.с. № 469582 (СССР), МКИ^3 В24013/34, 1975.

18. А.с. № 631322 (СССР), МКИ^3 В24013/34, 1978.

19. А.с. № 1068454 (СССР), МКИ^3 В24Д3/38, 1984.

20. А.с. № 831600 (СССР), МКИ^3 В24Д3/100, 1981.

21. А.с. № 1463459 (СССР) МКИ^3 В24 d3/14, 1989.

22. А.с. № 1526968 (СССР) МКИ^3 В24 Д3/14, 1989.

23. А.с. № 366963 (СССР). МКИ^3 В24 Д3/34, 1972.

24. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физмат, 1963. – 472 с.

25. Ахмеров М.А. Классифицированное зерно и его влияние на эксплуатационные показатели абразивного инструмента // Алмазная и абразивная обработка: сб. – М.: МДНТП. – 1967. – С. 26 – 29.

26. Багайсков Ю.С., Шумячер В.М. Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов: монография / ВолгГАСУ, ВИСТех. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2005. – 200 с.

27. Байдакова Н.В., Крюков С.А. Влияние зернистости и формы абразивного зерна на эффективность шлифования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2011: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. – С. 96 – 100.

28. Байдакова Н.В., Назаренко В.А., Крюков С.А. Повышение производительности и качества обрабатываемых деталей при использовании шлифовальных инструментов с зерном контролируемой формы // Станки и инструменты. – 2009. – № 2. – С. 15 – 19.

29. Байдакова Н.В., Бикпавленова Д.Р., Крюков С.А. Технологические основы и инновационные способы импрегнирования абразивного инструмента // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. № 3 (40). – Вып. 1, 2009. – 35 – 42.

30. Байдакова Н. В., Крюков С. А. О влиянии формы абразивного зерна на режущую способность инструмента на операциях обдирки // Новые материалы и технологии : сб. материалов Всероссийской молодежной научн. конф. – Саратов: СГТУ, Наука, 2014. – С. 475 – 478.

31. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.

32. Бакаев В.В. Повышение стабильности режущих свойств шлифовальных кругов // Станки и инструменты. – 1991. – № 5. – С. 23 – 27.

33. Бакунов В.С., Балкевич В.Л., Власов А.С. и др. Керамика из высокоогнеупорных окислов. – М.: Металлургия, 1997. – 304 с.

34. Бакуль В.Н. Основы проектирования и технологии изготовления абразивного и алмазного инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 303 с.

35. Баловнев В. И. Моделирование взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. – М.: Машиностроение, 1994. – 432 с.

36. Бальшин М.Ю. Порошковое металловедение. – М.: Металлургиздат, 1998. – 332 с.

37. Белошапка Н.И. Повышение эффективности процесса шлифования электрокорундовым инструментом: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Киев, 1983. – 16 с.

38. Бердиков В.Ф., Богомолов Н.И., Катрич М.Д., Бабанин А.В. Изучение физико-механических свойств абразивных материалов микроскопическими методами // Тр. ВНИИАШ. – М.: НИИМАШ. – 1974. – № 15. – С. 32 – 40.

39. Бердиков В.Ф., Крюков С.А., Славин А.В. Исследование упругих и упруго-пластичных деформаций при моделировании точности абразивной обработки методом микроиндентирования // Точность автоматизированных производств: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. ТАП-97. – Пенза, 1997. – С. 154 – 156.

40. Бердиков В.Ф., Славин А.В., Крюков С.А. Склерометрическое моделирование основной составляющей процесса абразивной обработки – микрорезание единичным абразивным зерном // Точность автоматизированных производств: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. ТАП-97. – Пенза, 1997. – С. 156 – 158.

41. Бердиков В.Ф., Крюков С.А., Славин А.В. Основные закономерности упругопластического деформирования при непрерывном вдавливании осесимметричного индентора в поверхность твердого тела // II Межвуз. научн.-практ. конф. студентов и молодых ученых г. Волжского: сб. ст. – Волжский, 1997. – С. 141 – 142.

42. Бердиков В.Ф., Славин А.В., Крюков С.А. Склерометрическое сопротивление материалов упругопластическому деформированию и разрушению поверхности слоев различных твердых тел // II Межвуз. научн.-практ. конф. студентов и молодых ученых г. Волжского: сб. ст. – Волжский, 1997. – С. 144 – 145.

43. Биргер И. А.., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов: учебное пособие. – М. : Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.

44. Бокучава Г.В. Шлифование металлов с подачей охлаждающей жидкости сквозь шлифовальный круг. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 108 с.

45. Болотин В.В. Объединенная модель разрушения композитных материалов при длительно действующих нагрузках // Механика композиционных материалов. 1981. № 3. – С. 405 – 420.

46. Бочков А.П., Гасюк Д.П., Филюстин А.Е. Модели и методы управления развитием технических систем. – СПБ: Изд-во «Союз», 2003. – 288 с.

47. Братчиков А.Я. Способы пропитки абразивных инструментов // Абразивы. – 1974. – № 1. – С. 5 – 8.

48. Брейтуэт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / под ред. д-ра техн. наук В.В. Синицына; пер. с англ. С.Д. Клюшева. – М.: Химия, 1967. – 320 с.

49. Бржозовский Б.М., Янкин И.Н., Мацнев В.Е. О необходимости исследования процесса правки шлифкругов по динамическому критерию // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-98: сб. ст. конф. / ВИСТех филиал ВолгГАСУ. – Волжский, 1998. – С. 112 – 114.

50. Будников П.П., Харитонов Ф.Я. Керамические материалы для агрессивных сред. – М.: Стройиздат, 1971. – 272 с.

51. Буки Ю.М., Филиппова З.К. Теоретические и технологические исследования в области огнеупоров // Тр. УНИИО. Вып. 8 (LV). – Харьков, 1965. – 186 с.

52. Ваксер Д.Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. – М. – Л.: Машиностроние, 1964. – 124 с.

53. Варчев В.М. Исследование влияния СОЖ на силы трения при шлифовании стали ШХ15: дис. … канд. техн. наук. – Саратов, 1971. – 163 с.

54. Васин В.М. Эффективность использования абразивных кругов, пропитанных серой // Абразивы. – 1977. – № 4. – С. 6 – 7.

55. Ватанабэ Т. Износ шлифовального круга / пер. с япон. ВИНИТИ, 1962. № 21694/1. – 7 с.

56. Вейс З.В. Анализ разрушения в условиях концентрации напряжений // Разрушение; пер. с англ. – Т. 3. – М.: Мир, 1976. – С. 263 – 302.

57. Власов В.И., Горшков Ю.Б. Прочность прокатанных электрокорундов при изгибе // Абразивы. – 1977. – Вып. 4. – М. – С. 9 – 11.

58. Волков М.П., Бандура Е.Г., Смирнов В.А. Влияние гранулометрического состава и формы зерен на процесс тонкого шлифования // Абразивы. – 1975. – № 8. – С. 14 – 17.

59. Волков М.П. Влияние гранулометрического состава абразива на рельеф поверхности шлифовального круга и эффективность процесса тонкого шлифования // Абразивы. – 1976. – № 4. – С. 4 – 7.

60. Волков С.Д. Статистическая теория прочности. – М.: Машгиз, 1960. – 176 с.

61. Волский Н.И. Обрабатываемость металлов шлифованием. – М.: Машгиз, 1950. – 113 с.

62. Вольцифер В.А., Погорелов А. Моделирование статистических упаковок сферических частиц // Инженерно-физический журнал. – 1992. – Т.6. – № 1. – С. 69 – 72.

63. Воробьев В.А. и др. Координация частиц в статистических гетерогенных средах // Известия вузов. Физика. – 1972. – № 3. – С. 315 – 318.

64. Воробьев Л.Н., Красиков Е.Д. Математическое моделирование точности обработки при плоском шлифовании // Абразивы. – 1976. – № 10. – С. 162 – 165.

65. Воронов С.Г. и др. О влиянии состава связки и некоторых характеристик шлифзерна монокорунда на физико-механические и эксплуатационные свойства шлифкругов // Абразивы и алмазы. – 1964. – № 2. – С. 14 – 19.

66. Воюцкий С.С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров. – Л.: Химия, 1969. – 336 с.

67. Вульф А.М., Мурдасов А.В. Влияние формы абразивных зерен на эксплуатационные свойства кругов при обдирочном шлифовании // Абразивы. – 1968. – № 6. – С. 19 – 22.

68. Гаршин А.П., Федотова С. М. Абразивные материалы и инструменты. Технология производства / Под общ. ред. проф. А. П. Гаршина. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 1010 с.

69. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1967. – 360 с.

70. Глейзер Л.А. О сущности процесса круглого шлифования // В кн.: Вопросы точности в технологии машиностроения. – М., 1959. – С. 5 – 24.

71. Горбунов Г. И. Основы строительного материаловедения: учебное издание. М.: Изд-во АСВ, 2002. – 168 с.

72. Голубцова Е.С., Каледин Б.А. Статистические методы исследования конструкционной керамики: монография. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 259 с.

73. Голованова М.Н., Равикович В.В. Некоторые причины колебания рабочих свойств микропорошков // Абразивы. – 1972. – № 4. – С. 57.

74. Гришин Я.В. Пропитка серой мелкозернистого абразивного инструмента центробежным способом // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. тр. – Волжский, 1997. – С. 49 – 51.

75. Грум-Гржимайло С.В. Классен-Неклюдова М.В. Итоги лабораторных исследований различных свойств кристаллов синтетического корунда // Физические свойства синтетического корунда: сб. Вып. IX. – М.: Изд-во АНУССР, 1953. – С. 211 – 218.

76. Дворянкин А.М., Половинкин А.И., Соболев А.Н. Методы синтеза технических решений. – М.: Наука, 1997. – 104 с.

77. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.

78. Дружина З.И. Импрегнированный абразивный инструмент на керамической связке для обработки деталей подшипников: дис. … канд. техн. наук. 05.17.11 / Дружина Зоя Ивановна – Волжский, 1985. – 210 с.

79. Дружина З.И., Крапивкина О.В. Защитная роль пропиточных составов при шлифовании с применением водных СОЖ // Э.И. Абразивы НИИМАШ. – 1981. – № 6. – С. 7 – 10.

80. Дьяченко П.Е. Исследование процесса шлифования. – М.: Машгиз, 1941. – 113 с.

81. Ефимов В.В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании. – Саратов: Изд-во СГУ, 1985. – 140 с.

82. Захаренко И.П., Ахундов Э.А. Об устойчивости зерен в связке шлифовального круга // Синтетические алмазы. – 1978. – № 6. – С. 24 – 28.

83. Зубарев Ю.М. Плоское шлифование. Оборудование, оснастка, технологии / Ю.М. Зубарев, В.Т. Юрьев, В.В. Звоновских // Справочник. Инженерный журнал. Приложение № 12, 2014 – 23 с.

84. Згонник Н.П. и др. Влияние термической обработки и специальных покрытий на механическую прочность абразивного зерна // Абразивы. – 1972. – № 10. – С. 8 – 9.

85. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия, 1974. – 416 с.

86. Золотухин Н. М. Нагрев и охлаждение металла. – М.: Машиностроение. – 1973. – 192 с.

87. Иванов Ю.М. и др. Установка для пропитки // Абразивы. – 1977. – № 2. – С. 7 – 10.

88. Ивашинников В.Т. Режущие свойства шлифовальных кругов с различным содержанием зерна при постоянной твердости // Абразивы. – 1967. – № 2. – С. 28 – 31.

89. Изготовление шлифовальных кругов повышенной твердости и прочности путем использования шлифовальных материалов различных зернистостей / Ю. Ф. Юликова [и др.] // Абразивы: Экспресс информация. – М., 1981. Вып. 1. – С. 6 – 12.

90. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: АНСССР, 1963. – 271 с.

91. Импрегнирование шлифовальных кругов // Реф. обзор Волжского ф-ла ВНИИАШ. – Волжский, 1982. – 45 с.

92. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. – М.: Машиностроение, 1969. – 336 с.

93. Ипполитов Г.М. Абразивные инструменты и их эксплуатация. – М.: Машгиз, 1959. – 255 с.

94. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. – М.: Машиностроение, 1966. – 275 с.

95. Кадушников Р.М., Скороход В.В., Лыкова О.Б. Компьютерное моделирование эволюции микроструктуры двухфазных полидисперсных материалов // Порошковая металлургия. – 1993. – № 4. – С. 13 – 20.

96. Кайнарский Н.С., Дегтярева Э.В., Орлов М.П. Корундовые огнеупоры и керамика. – М.: Металлургия, 1981. – 188 с.

97. Кайнарский Н.С. Процессы технологии огнеупоров. – М.: Металлургия, 1969. – 350 с.

98. Калинин Е.П. Научные основы интенсивного бесприжогового шлифования сталей и сплавов с учетом степени затупления инструмента: дис. … докт. техн. наук. 05.03.01 / Калинин Евгений Пинхусович. – СПб, 1995. – 190 с.

99. Караулов Е.В. Замена дефицитного шлифзерна для изготовления кругов зерном ограниченного спроса // Абразивы. – 1977. – Вып. 1 (115). – С. 1 – 2.

100. Караулов Е.В. Исследование обрабатываемости шлифованием новых маломагнитных высокомарганцовистых сталей: дис. … канд. техн. наук. 05.03.01 / Караулов Евгений Владимирович.– Л., 1967. – 236 с.

101. Караулов Е.В., Крюков С.А. Влияние структуры абразивного инструмента на технологические показатели процесса шлифования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструмента и материалы. Шлифабразив-2004 : сб. ст. Междун. науч.-техн. конф. / ВолгГАСУ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. – Волгоград, 2004. – С. 73 – 74.

102. Караченцева Т.Г., Юликова Ю.Ф., Зайцев Г.П. Методика проектирования, изготовления и испытания высокопористого абразивного инструмента // Труды ВНИИАШ. – Вып. 6. – С. 7 – 21.

103. Карлин В.В. и др. Капиллярность электрокорундового зерна и свойства абразивного инструмента // Абразивы. –1970. – № 5. – С. 14 – 17.

104. Карпов А.Б. Исследование взаимодействия зерна и связки шлифовальных инструментов при динамических нагрузках: автофер. … канд. техн. наук – М., 1973. – 18 с.

105. Кащеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1970. – 248 с.

106. Каюпов Т.К. Осесимметричные задачи расчета неоднородных цилиндров с учетом физической нелинейности материала: дис. … канд. техн. наук. 05.23.17 / Каюпов Табылды Каисагалиевич. – М., 1994. – 123 с.

107. Келли А. Высокопрочные материалы / пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 275 с.

108. Керимов К.А. Плоская задача теории упругости неоднородных тел для двухслойной кольцевой области: дис. … канд. техн. наук. 05.23.17 / Керимов Кемал Ачильевич. – М., 1990. – 147 с.

109. Киселев Е.С., Баранов Д.В. Шероховатость поверхностей деталей, шлифованных с непрерывной правкой круга // Шлифабразив-99: сб. тр. конф. – Волжский, 1999. – С. 20 – 22.

110. Классен-Неклюдова М.В., Томиловский Г.Е. Зависимость прочности кристаллов корунда от кристаллографического направления при испытании их на сжатие и изгиб // Физические свойства синтетического корунда: тр. ИКАН СССР. – Вып. 8. – М.: Изд-во АНСССР, 1953. – С. 25 – 30.

111. Клименко В.А. Особенности импрегнирования крупногабаритных шлифовальных кругов // Подшипниковая промышленность. – 1983. – Вып. 8. – С. – 9 – 14.

112. Клименко В.А., Степанов В.Н. Повышение эксплуатационных свойств абразивного инструмента импрегнированием // Обзор НИИАвтопром. – М., 1979. – 58 с.

113. Кобл Р.Л., Парих Н.М. Разрушение поликристаллической керамики / Разрушение: сб. – Т. 7. – Ч. 1. – М.: Мир, 1976. – С. 221 – 299.

114. Коган Б.М. Концентрация напряжений около круглого отверстия в неоднородных телах: дис. … канд. техн. наук. 01.02.03 / Коган Борис Михайлович. – М., 1981. – 211 с.

115. Ковальченко М.С. Механические свойства изотропных пористых материалов // Порошковая металлургия. – 1993. – № 3. – С. 89 – 96.

116. Колесников П.М. Энергоперенос в неоднородных средах. – Минск: Наука и техника, 1974. – 304 с.

117. Коломазин В.М. Выбор охлаждающей среды и температуры закалки для специальной термической обработки абразивного инструмента на керамической связке // Абразивы.– 1975. – № 5. – С. 28 – 31.

118. Коломазин В.М., Шпотаковский Д.Ф. Исследование процесса шлифования труднообрабатываемых материалов абразивным инструментом, обработанным глубоким холодом // Тр. ВНИИАШ. – 1973. – № 14. – С. 3 – 7.

119. Копатилов В.И. Шихта для получения абразивных изделий высокой плотности // Абразивы. – 1973. – № 5. – С. 10 – 11.

120. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и деталей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. – 147 с.

121. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. – Ч. I. Состояние рабочей поверхности инструмента. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 160 с.

122. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы создания прогрессивных процессов абразивной обработки путем управления состоянием инструмента и его механическим взаимодействием с деталью: Автореф. дис. …

докт. техн. наук. 05.03.01 / Королев Альберт Викторович. – Саратов, 1977. – 24 с.

123. Коротков А.Н. Повышение работоспособности шлифовальных инструментов на основе эффективного использования свойств зерен: дис. … докт. техн. наук. 05.03.01 / Коротков Александр Николаевич. – М., 1993. – 365 с.

124. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

125. Костенко Н.А. Шлифование жаропрочных сплавов специальными двухабразивными кругами // ПНТПО № 6-66-1055/314. – М.: ГОСНИТИ, 1966. – С. 32 – 34.

126. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимичекие процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 170 с.

127. Койфман М.И. Скоростной комплексный метод определения механических свойств горных пород // Механические свойства горных пород. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 146 с.

128. Кравченко Б.А., Носов Н.В. Новая технология упрочнения абразивных инструментов // Тез. докл. Междунар. конф. «Интертех-96». – Харьков, 1996. – С. 21 – 23.

129. Красулин Ю.Л. и др. Пористая конструкционная керамика. – М.: Металлургия, 1980. – 100 с.

130. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под общ. ред. З.И. Кремня. – СПб: Политехника, 2007. – 424 с.

131. Крюков С.А. Аналитическое определение сил резания при шлифовании // Тез. докл. II межвуз. научн.–техн. конф. студентов и молодых ученых г. Волжского. – Волжский, 1997. – С. 126 – 127.

132. Крюков С.А. Анализ и разработка способов управления эксплуатационными свойствами абразивного инструмента // V Межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Ч. 3. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2000.

– С. 104 – 105.

133. Крюков С.А., Анохин В.И., Фоменко Н.А. Выбор рациональных составов импрегнаторов // Прогрессивные технологии в машиностроении: Межвуз. сб. науч. тр. ; ВолгГТУ. – Вып. 4. – Волгоград, 2001. – С. 50 – 52.

134. Крюков С.А., Анохин В.И., Шевчук В.П. Совершенствование абразивного инструмента при производстве подшипников // Прогрессивные технологии в машиностроении: Межвуз. сб. науч. тр. ; ВолгГТУ. – Вып. 1. – Волгоград, 1998. – С. 23 – 25.

135. Крюков С.А., Бикпавленова Д.Р. Влияние внешней среды на изменение твердости абразивного инструмента // Современные материалы и технологии – 2002: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2002. – С. 100 – 101.

136. Крюков С.А., Гусельников Д.А. Моделирование и экспериментальное исследование координации зерен в абразивных инструментах различных структур // Современные тенденции развития транспортного машиностроения и материалов: сб. ст. IX Межунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2004. – С. 113 – 116.

137. Крюков С.А., Гусельников Д.А. Управление структурно-механическими свойствами абразивных инструментов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты, материалы: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. – Волжский, 2004. – С. 71 – 73.

138. Крюков С.А. Зависимость прочности абразивных инструментов от их структурных характеристик // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2005: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. Волжский. – Волгоград, 2005. – С. 216.

139. Крюков С.А. Исследование влияния внешней среды на изменения поверхностной твердости электрокорундового шлифовального круга // V Межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Ч. 3. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2000. – С. 102 – 103.

140. Крюков С.А. К вопросу повышения эффективности технологического процесса шлифования // Процессы абразивной обработки, абразивные

инструменты и материалы. Шлифабразив-2005: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. Волжский. – Волгоград, 2005. – С. 214 – 215.

141. Крюков С.А. Маятниковый диспергометр для исследоания поверхности абразивного инструмента // V Межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Ч. 3. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2000. – С. 106 – 107.

142. Крюков С.А., Мироседи А.И. Исследование влияния внешней среды на твердость и эксплуатационные показатели абразивного инструмента Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2000: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. Волжский. – Волгоград, 2000. – С. 197 – 198.

143. Крюков С.А. Моделирование структуры абразивного инструмента // Системные проблемы качества, математического моделирования информационных технологий: Матер. Междун. конф. и Российск. науч. шк. – Ч. 5. – М.: НИИ Автоэлектроника, 1999. – С. 138 – 139.

144. Крюков С.А. Определение числа режущих зерен в контактной зоне шлифования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2000: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. – Волгоград, Волжский, 2006. – С. 82 – 84.

145. Крюков С.А. Повышение эффективности абразивного инструмента на керамической связке для ВПЗ-15 // Научные, технические, экономические и экологические проблемы г. Волжского: сб. докл. конф. по регион. науч.–техн. прогр. – Волжский, 1998. – С. 17 – 19.

146. Крюков С.А., Славин А.В., Кинетика пропитывания расплавом абразивного инструмента на керамической связке // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2000: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. – Волгоград, Волжский, 2001. – С. 94 – 95.

147. Крюков С.А., Славин А.В., Байдакова Н.В. Прогнозирование и определение механической прочности абразивных композиционных материалов // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. – 2010. – № 46. – С. 43 – 54.

148. Экспертная оценка параметров ударного процесса по величине остаточной деформации // Межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов г. Волжского. – Волжский, 1995. – С. 115 – 116.

149. Крюков С.А. Совершенствование процесса шлифования путем стабилизации структурно-механических свойств абразивного инструмента: дис. … канд. техн. наук. 05.03.01, 05.02.08 / Крюков Сергей Анатольевич – Волжский: ВИСИ, 2000. – 149 с.

150. Крюков С.А. Теоретическое определение радиальной силы резания абразивным зерном // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-97: сб. тр. конф. – Волжский, 1997. – С. 139 – 140.

151. Крюков С.А. Структурное модифицирование абразивных инструментов мелкодисперсным наполнителем // СТИН. – 2014. – № . – С. – .

152. Крюков С.А., Шумячер В.М. Феноменологическая модель прочности рабочей поверхности абразивного инструмента на керамическом связующем / Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив – 99 : сб. тр. Междунар. научн. – техн. конф. – Волжский, 1999. – С. 51 – 53.

153. Крюков С.А. К вопросу моделирования технологического процесса пропитки абразивного инструмента // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2011: сб. ст. Междунар. научн.-техн. конф. – Волгоград, Волжский, 2012. – С. 89 – 91.

154. Крюков С.А. Расчетное определение структуры и твердости абразивного инструмента с оптимальной плотностью заполнения зерном черепка // Справочник. Инженерный журнал. – № 9 (186), 2012. – С. 29 – 32.

155. Крюков С.А., Славин А.В., Байдакова Н.В. Прогнозирование механической прочности абразивных композиционных материалов // Технология машиностроения. – 2013. – № 10. – С. 31 – 32.

156. Kryukov S.A., Baidakova N.V., Nazarenko V.A., Baidakova T.A., Jmproved productivity and product quality when using controlled – grain grinding

tools / Russian Engineering Research. – Vol. 5. – № 5. – 2009. – P. 509 – 511.

157. Крюков С.А., Шумячер В.М. Стабилизация и регуляция структурно-механических характеристик абразивных инструментов : монография / Волгогр. гос. арх.-строит. ун-т; Волжский ин-т строит. и технол. (филиал) ВолгГАСУ. – Волгоград, 2013. – 178 с.

158. Крюков С.А., Шумячер В.М. Повышение стабильности и эффективности абразивных инструментов: монография // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2013. – 180 с.

159. Крюков С.А. Влияние зернового состава абразивных материалов на показатели процесса шлифования // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – № 8 (197). – С. 27 – 31.

160. Крюков С.А. Выбор зернового состава абразивных инструментов по гранулометрическому индексу // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – № 3. – С. 31 – 34.

161. Крюков С.А. Определение оптимальной последовательности регуляций характеристик абразивных инструментов при их совершенствовании // Справочник. Инженерный журнал. –2013. – № 7 (196). – С. 25 – 27.

162. Крюков С.А. Феноменологическая модель прессования заготовок абразивных инструментов // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 5. – С. 26 – 28.

163. Крюков С.А. Модифицирование высокопористых шлифовальных инструментов адгезионно-инертным к связке абразивным наполнителем // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – 12. – С. 35 – 38.

164. Крюков С.А. Шлифовальный инструмент из абразивного материала на основе составляющих разной зернистости // Вестник машиностроения. – 2014. – № 10. – С. 49 – 51.

165. Krukov S.A. Grinding Tools Based on Multicomponent Abrasive // Russian Engineering Research. Vol. 35. – № 1. – 2015. – P. 19 – 21.

166. Крюков С.А., Байдакова Н.В. Системно-комплексный подход к модифицированию абразивных инструментов при их совершенствовании // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – С. 133 – 126.

167. Крючков Ю.Н. Метод расчета структурных параметров уплотненных керамических материалов // Стекло и керамика. – 1997. – № 10. – С. 21 – 23.

168. Кудасов Г.Ф. Абразивные материалы и инструменты. – Л.: Машиностроение, 1967. – 158 с.

169. Кудряшов Б.П. Разработка абразивных кругов со специальной структурой для шлифования быстрорежущих сталей: дисс. …канд. техн. наук. – 1983. – 181 с.

170. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А., Дунин-Барковский И.В. Предотвращение дефектов при шлифовании. – М.: Машиностроение, 1975. – 144 с.

171. Курдюков В.И., Методика расчета структурных характеристик шлифовального круга с бифракционным составом шлифматериала / В.И. Курдюков, А.Б. Переладов, И.В. Кожевников // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив – 2011: сб. ст. Междунар. научн.-техн.конф. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2011. – С. 65 – 67.

172. Курдюков В.И. Научные основы проектирования, изготовления и эксплуатации абразивного инструмента: дисс. … докт. техн. наук. 05.03.01 / Курдюков Владимир Ильич – Курган, 2000. – 496 с.

173. Курносов А.Д., Пасечник В.К. Влияние пропитки кругов на процесс шлифования // Машиностроитель. – 1970. – № 1. – С. 20 – 21.

174. Лабес В.И. Исследование структуры белого электрокорунда //Абразивы. – 1972. – № 10. – С. 20 – 21.

175. Лабес В.И., Лавров И.В., Футергендлер С.Н. Исследование процесса разрушения зерна электрокорунда белого под воздействием термического удара // Основные закономерности процессов производства абразивных материалов и инструмента : тр. ВНИИАШ. – Л., 1975. – С. 37 – 44.

176. Лавров И.В., Ермакова Т.Б. Объемные измерения под микроскопом // Абразивы и алмазы. – 1965. – Вып. 1 (45). – С. 10 – 13.

177. Лавров И.В., Леонтьев Ю.Н. Некоторые результаты электронно-микроскопического исследования поверхности излома основных абразивных материалов // Абразивы.– Вып. 8. – М., 1971. – С. 7 – 10.

178. Лавров И.В., Лобода Т.Б. Закономерность распределения зерен в шлифзерене, шлиф- и микропорошках по крупности // Абразивы.– 1973. – Вып. 12. – С. 8 – 15.

179. Лавров И.В. Ривлин И.Я., Никитина Т.П. Физико-химические исследования абразивных материалов и инструмента // Сб. тр. ВНИИАШ. – Л., 1981. – С. 69 – 75.

180. Лавров И.В. Спайность корунда и карбида кремния // Тр. ВНИИАШ. – М.: НИИМАШ, 1974. – № 15. – С. 23 – 28.

181. Лавров И.В., Стрельникова Л.А. Пористость зерна корундовых абразивных материалов // Тр. ВНИИАШ. – 1971. – № 13. – С. 18 – 22.

182. Лавров И.В., Мгеладзе В.Ф. Строение и прочность зерен корунда в монокорунде // Абразивы. – 1969. – № 3. – С. 2 – 4.

183. Лавров И.В., Цветкова Л.Д. Строение зерна нормального электрокорунда, получаемого непрерывной плавкой // Абразивы. – 1972. – № 4. – С. 1 – 5.

184. Лавров И.В. О фотограммах как средстве изучения формы шлифовальных зерен // Абразивы и алмазы. – 1967. – Вып. 5 (60). – С. 14 – 15.

185. Ланин А.Г., Федик И.И. Термопрочность материалов. – Подольск: НИИ НПО «Луч», 2005. – 312 с.

186. Лебедева С.И. Определение микротвердости минералов. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 254 с.

187. Левин В.И. Краткий справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1968. – 136 с.

188. Лесной Б.В. Исследование и разработка быстроходных динамических систем для совмещенного контроля статической неуравновешенности и

прочности шлифовальных кругов: дис. … канд. техн. наук. 05.02.08 / Лесной Борис Васильевич. – Волжский, 1981. – 158 с.

189. Локшин В.С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путем использования зерен с контролируемой формой и ориентацией: автореф. дис. … канд. техн. наук. 05.03.01 / Лошкин Владимир Сергеевич – Томск, 2007. – 20 с.

190. Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1976. – 111 с.

191. Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 368 с.

192. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.

193. Любомудров В.Н., Васильев Н.Н., Фальковский Б.И. Абразивные инструменты и их изготовление. – М. – Л.: ГНТИМСЛ, 1953. – 376 с.

194. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

195. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.

196. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. – Саратов, Изд-во Саратов. ун-та, 1981. – 212 с.

197. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

198. Мацуи. Механизм резания абразивными зернами / пер с яп. // Какаймокмкю. – 1971. – 23. – № 12. – С. 1611 – 1616.

199. Милов В.А. Устройство для контроля прочности. – М.: Машиностроение, 1976. – 126 с.

200. Мироседи А.И. Повышение эффективности шлифования путем совершенствования структуры инструмента с учетом результатов стохасти-

ческого моделирования : дис. … канд. техн. наук. 05.03.01 / Мироседи Александр Ильич.– Волжский, 2007. – 158 с.

201. Могиленский В. И., Щелачева Е. Г., Эфрос М. Г. и др. Методика составления рецептов абразивного инструмента на керамической связке / НИИАШ // Абразивы, 1980. – Вып. 12. – С. 3 – 5.

202. Москвина Л.Г. Стеклокерамические связующие для абразивного инструмента // Абразивы. – М., 1977. – 7. – С. 14 – 15.

203. Мурдасов В.А., Григорьев Ю,П., Котельников А.И. Некоторые особенности изготовления крупнозернистых шлифкругов для зачистки металла // Абразивы: науч.-техн. реф. сб. – Вып. 6. – М.: НИИМАШ, 1963. – С. 5 – 8.

204. Мурдасов А.В., Ивашинников В.Т., Пицына Л.Г. Оценка прочности керамической связки // Абразивы.– 1976. – № 4. – С. 8 – 10.

205. Мурдасов А.В. Разрушение абразивных зерен круга при черновом и силовом шлифовании в зависимости от угла заострения // Абразивы. – 1975. – № 9. – С. 14 – 18.

206. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.

207. Нерубай М.С. и др. Совершенствование процессов абразивной обработки деталей подшипников качения // Абразивы. – 1979. – № 7. – С. 1 –2.

208. Новое в области испытаний на микротвердость // Тр. совещания по микротвердости. – М.: Наука, 1974. – 271 с.

209. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. – 220 с.

210. Носов Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей дис. … д-ра техн. наук. 05.02.08; 05.03.01 / Носов Николай Васильевич – Самара, 1997. – 452 с.

211. Овчинский А.С., Гусев Ю.С. Моделирование на ЭВМ процессов образования, роста и слияния микродефектов в структурно-неоднородных

материалах // Механика композитных материалов. – 1982. – № 4. – С. 585 – 592.

212. Осипов А.П. Оптимизация процесса шлифования на основе целенаправленного формирования рабочей поверхности абразивного инструмента: автореф. дис. … канд. техн. наук. 05.02.08; 05.03.01. / Осипов Александр Петрович – Самара, 1999. – 28 с.

213. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / под ред. Ю.М. Ковальчука. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.

214. Оробинский В.М., Воронцова А.Н., Воронцов В.В. Исследование стабильности процесса скоростного шлифования // Прогрессивные технологии в машиностроении : межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: РПК «Политехника». – С. 61 – 66.

215. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 144 с.

216. Островский В.И. Улучшение эксплуатационных свойств шлифовальных кругов путем пропитки // Экономичность и точность абразивно-алмазной обработки. – Л., 1971. – № 1. – С. 20 – 28.

217. Островский В.И. Шлифование труднообрабатываемых материалов импрегнированным абразивным инструментом / Прогрессивные технологические процессы абразивной обработки и абразивный инструмент. – Л., 1971. – С. 31 – 37.

218. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 2000. – 494 с.

219. Падуков В.А., Антоненко В.А., Подозерский Д.С. Разрушение горных пород при ударе и взрыве. – Л.: Наука, 1971. – 160 с.

220. Паншев Д.Д. и др. Повышение качества и производительности шлифования деталей подшипников абразивными кругами, обработанными в растворе йодистого калия // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмент. – Пенза, 1981. – С. 14 – 15.

221. Пат. 2164857 РФ. Способ повышения эксплуатационных свойств абразивного инструмента / В.М. Шумячер, В.И. Анохин, С.А. Крюков // Бюл. № 10. – 2001. – 3 с.

222. Пат. 2215643 РФ. Абразивный инструмент / В.М. Шумячер, В.А. Назаренко, С.А. Крюков, И.В. Дуличенко // Бюл. № 31. – 2003. – 2 с.

223. Пат. 2262434 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.М. Шумячер, А.В. Славин, И.В. Дуличенко, С.А. Крюков // Бюл. № 29. – 2005. – 3 с.

224. Пат. 2252451 РФ. Способ пропитки абразивного инструмента / В.М. Шумячер, С.А. Крюков, А.В. Славин // Бюл. № 11. – 2009. – 3 с.

225. Пат. 2354534 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.М. Шумячер, А.В. Славин, С.А. Крюков // Бюл. № 13. – 2009. – 3 с.

226. Пат. 2354535 РФ. Способ пропитки абразивного инструмента / В.М. Шумячер, А.В. Славин, И.В. Дуличенко, С.А. Крюков // Бюл. № 13. – 2009. – 3 с.

227. Пат. 2301737 РФ. Способ изготовления абразивного инструмента / В.М. Шумячер, А.В. Славин, И.В. Дуличенко, И.В. Дуличенко, С.А. Крюков // Бюл. № 18. – 2007. – 3 с.

228. Пат. Япон. № 50-6397, 13.03.75. РЖ. Техн. маш., 1976, 2Б387П. Способ изготовления абразивных инструментов. Иноуэ Киеси.

229. Пат. Япон. № 52-47198, 01.11.77. РЖ. Техн. маш., 1978, 9А763П. Шлифовальный круг. Массуда Цунэо.

230. Перцов Н.В., Щукин Е.Д. Физическая и химическая обработка материалов. – 1970. № 2. – С. 60 – 82.

231. Пивинский Ю.Е., Ромашин А.Г. Кварцевая керамика. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.

232. Пицына Л.Г., Мурдасов А.В., Ивашинников В.Т. Изучение поверхности разрыва абразивного черепка на керамической связке // Абразивы. – 1973. – № 8. – С. 15 – 17.

233. Положенцева Л.И. Метод контроля пористости зерна электрокорунда путем микроскопического анализа полировальных шлифов // Абразивы и алмазы. – 1965. – № 3. – С. 12 – 14.

234. Полубелова А.С., Крылов В.Н. и др. Производство абразивных материалов. – М. – Л.: Машиностроение, 1968. – 124 с.

235. Полянчиков Ю.Н., Полянчикова М.Ю., Емельяненко А.А. и др. Математическая модель производительности при хонинговании однокомпонентным абразивным инструментом // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив – 2005 : сб. ст. Междун. науч.-техн. конф. – Волгоград, Волжский, 2005. – С. 129 – 131.

236. Попильский Р.Я., Пивинский Ю.Е. Прессование порошковых керамических масс. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.

237. Попов С.А., Ананьев Р.В. Эксплуатационные свойства высокопористых абразивных кругов // Станки и инструмент. – 1977. – № 3. – С. 22 – 23.

238. Попов С.А., Ананьев Р.В. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 1980. – 80 с.

239. Попов С.А., Малевский Н.П. Новый метод оценки режущих свойств абразивных инструментов. – М.: ВИНИТИ, 1959. – 157 с.

240. Попов С.А., Соколова Л.С. Влияние однородности зернового состава абразива и формы зерен на рельеф режущей поверхности шлифовальных кругов // Абразивы. – 1972. – № 12. – С. 2 – 6.

241. Шутов А. И., Попов П. В., Бубеев А. Б. Прогнозирование характера разрушения закаленного стекла // Стекло и керамика. – 1998. – № 1. – С. 8 – 10.

242. Прогрессивные методы шлифования: Аналитич. обзор ВНИИТЭИМР. – М., 1988. – 35 с.

243. Прогрессивные методы шлифования пропитанным абразивным инструментом: Технологич. инструкция НИИМАШ. – М., 1978. – 28 с.

244. Прочность шлифовальных кругов / Окада С.; ВЦП.– № Ц-58020; пер. с англ. // Сэрамиккусу. – 1973. – Т. 8. – № 10. – С. 824 – 832.

245. Прочность шлифовальных кругов / Сотоо М.; ВЦП.– № Ц-11807; пер. с англ. // Кикай то Когу. – 1972. – Т. 16. – № 2. – С. 1 – 18.

246. Пушкарев О.И., Шумячер В.М. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов : монография / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2004. – 144 с.

247. Пузанов В.В. О взаимосвязях параметров круглого врезного шлифования и основных характеристик шлифовального круга // Совершенствование процессов резания. – Ижевск, 1969. – С. 132 – 142.

248. Равикович В.В., Пискарева Н.Н., Мельникова Г.П. Повышение капиллярности абразивных материалов термической обработкой // Абразивы. – 1977. – № 12. – С. 10 – 12.

249. Разработка и внедрение новых полимерных композиций для пропитки абразивных кругов и новых смазочно-охлаждающих жидкостей для шлифовальной обработки: отчет Томского политехн. ин-та / Руков. В.П. Лопатинский. – Томск, 1978. – № Б691384. – 81 с.

250. Разработка технологии высокопористых абразивных инструментов с применением органических добавок: отчет о НИР / ВНИИАШ; рук. темы Горфункель Г.Л., Зецеров А.Я., шифр темы 25-63. – Л., 1964. – 83 с.

251. Разрушение шлифовальных кругов при износе / Грэхем В.; ВЦП. – № Б – 7953. Пер. с англ. // Междунар. жур. по машиностроению. – 1978. – Т. 18. – 2. – С. 95 – 103.

252. Распределение напряжений в шлифовальных кругах и их прочность / Ота Д.; ВЦП. – № Ц-17057.; пер. с яп. // Кикай но кэнкю. – 1972. – Т. 24. – № 12. – С. 1573 – 1577.

253. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / В.И. Мяченков, В. П. Мальцев, В.П. Майборода и др; под общ. ред. В.М. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.

254. Ребиндер П.А. Поверхностно-активные вещества. – М.: Знание, 1961. – 46 с.

255. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах // Физико-химическая механика: избр. тр. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

256. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. – Саратов: Изд-во СГУ, 1967. – 215 с.

257. Редько С.Г., Королев А.В. Расположение абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга // Станки и инструмент. – 1970. – № 5. – С. 40 – 41.

258. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машмностроние, 1969. – 288 с.

259. Резников А.Н. и др. Определение количества режущих зерен. – М.: Машиностроение, 1978. – Вып. II. – С. 127 – 130.

260. Рудницкая Е.С. Основные сведения о кристаллографии и структуре кристаллов корунда // Тр. ин-та кристаллографии АНСССР / Физические свойства синтетического корнуда. – Вып. 8. – М.: АНСССР, 1963. – С. 163 – 170.

261. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

262. Рыбаков В.А., Воронов С.Г., Козинцева Р.Г. Влияние формы абразивных зерен на технологические факторы при прессовании изделий и физико-механические свойства абразивно-керамических черепков // Абразивы. – 1966. – № 4. – С. 20 – 24.

263. Садыхов К.И. и др. Разработка состава для пропитки абразивного инструмента // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : сб. тр. – Волжский, 1999. – С. 205 – 206.

264. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.

265. Самсонов А.Н. Исследование влияния условий взаимодействия СОЖ с шлифовальным кругом на эффективность шлифования: дис. … канд. техн. наук. – Ульяновск, 1971. – 162 с.

266. Сахаров Г.Н. Вопросы теории обкаточных инструментов: дис. … д-ра. техн. наук. – М., 1974. – 375 с.

267. Саутвилл К.Б. Высокопористые шлифовальные круги // Режущие инструменты. Эксперсс-инф. – 1975. – № 36. – С. 17 – 24.

268. Саютин Г.И. Выбор шлифовальных кругов. М.: Машиностроение, 1976. – 64 с.

269. Седов Л.И. Методы теории подобия и размерностей в механизме. – М.: Наука, 1965. – 388 с.

270. Сиротин В.П. Исследование влияния строения и конструкции шлифовальных кругов на их режущую способность и качество поверхностного слоя шлифуемых деталей: дис. … канд. техн. наук. 05.03.01 / Сиротин Владимир Петрович – Одесса, 1980. – 270 с.

271. Славин А.В., Крюков С.А., Байдакова Н.В. Модель оптимизации вариантов инновационно-технологических решений по выбору абразивного инструмента // Технология машиностроения. – 2009. – № 10. – С. 43 – 45.

272. Славин А.В., Крюков С.А. Комплексная оценка режущей способности абразивных материалов // I Межвуз. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых г. Волжского. – Волжский, 1995. – С. 135.

273. Славин А.В., Крюков С.А., Кузнецова Е.Д. Контроль качества по механическим свойствам абразивных материалов для прогнозирования их работоспособности в процессе абразивной обработки // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-97 : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Волжский, 1997. – С. 139 – 141.

274. Славин А.В., Крюков С.А., Кузнецова Е.Д. Лабораторный комплекс для исследования и контроля механических свойств абразивных зерен (как конструкции) и материала зерен (как вещества) // Процессы абразивной

обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-97 : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Волжский, 1997. – С. 172 – 175.

275. Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел / под ред. В.Н. Еременко, Ю.В. Найдича. – Киев: Наукова думка, 1972. – 348 с.

276. Смирнова М.П., Карпова Е.И. Пропитка абразивных керамических инструментов парафином, серой и коллоидным графитом // Абразивы, 1969. № 2. – С. 19 – 25.

277. Старков В.К., Големи С. Элементная модель строения абразивного инструмента // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2005: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Волжский, 2005. – С. 7 – 9.

278. Старков В.К., Рябцев С.А., Сорокина Е.В. Технологические свойства высокопористых шлифовальных кругов из карбида кремния // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2005: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, Волжский, 2001. – С. 21 – 23.

279. Стокс Р.Дж. Микроскопические аспекты разрушения керамики // Разрушение: сб. – Т. 7. Ч. I. – М.: Мир, 1976. – С. 129 – 220.

280. Стрелов К.К., Кащеев И.Д., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. – М.: Металлургия, 1988. – 258 с.

281. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

282. Суров С.П. Расчет рецептур абразивного инструмента на пульвербакелитовой связке / НИИАШ // Абразивы. – М., 1979. – Вып. 4. – С. 4 – 5.

283. Тамуж В.П. Объемное разрушение однонаправленных композитов // Механика композитных материалов. – 1979. – № 2. – С. 260 – 267.

284. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.

285. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. – М. : Химия, 1988. – 255 с.

286. Федорова Е.Д. О некоторых способах повышения прочности зерна нормального электрокорунда для силового шлифования // Абразивы. – М., 1972. – № 10. – С. 20.

287. Федотова С.М., Казанская В.В., Гуричева С.Г. Высокопористый абразивный инструмент на керамической связке с применением различных порообразующих наполнителей // Абразивы: науч.-техн. реф. сб. – М.: НИИМАШ, 1980. – № 2. – С. 5 – 8.

288. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.

289. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 136 с.

290. Филимонов Л.Н. и др. Статистический анализ распределения режущих кромок на рабочей поверхности шлифовального круга // Абразивы. – 1976. – № 10. – С. 10 – 13.

291. Филлипс К. Дж. Разрушение стекла / Сб.: Разрушение. Т. 7. Ч. I. – М.: Мир, 1976. – С. 19 – 58.

292. Филоненко Н.Е., Лавров И.В. Петрография искусственных абразивов. – М. – Л.: Машгиз, 1958. – 237 с.

293. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. – Изд. 3-е; перераб. – Ч. II. – М.: Машиностроение, 1974. – 368 с.

294. Харченко И.В. Абразивные материалы, инструменты и их эксплуатация: учебное пособие / ВолгГАСУ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. – Волгоград, 2007. – 84 с.

295. Харченко И.В., Крюков С.А. О влиянии внешней среды на прочность абразивных зерен // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : сб. Межвуз. научн.-техн. конф. – Волжский: ВолжскИСИ ВолгГАСА, 1998. – С. 82 – 85.

296. Харченко И.В., Крюков С.А. Определение твердости абразивного инструмента методом диспергирования // Научно-технические и экологические проблемы г. Волжского : тез. докл. Межвуз. конф. по регион. Науч.-техн. программе. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 1999. – С. 26 – 27.

297. Харченко И.В. Прибор для определения прочности частиц сыпучих материалов // Механика сыпучих материалов: тез. докл. IV Всесоюзн. конф. – Одесса, 1980. – С. 54.

298. Хиллиг У.Б. Причины низкой прочности и предельная прочность аморфных хрупких тел // Прочность стекла: сб. – М.: Мир, 1969. – С. 68 – 123.

299. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.

300. Хостикоев М.З., Никитина Н.А. Резервы повышения эффективности шлифования // Технология, организация и экономика машиностроительного производства : реф. сб. – М., 1983. – № 6. – С. 3 – 4.

301. Хрульков В.А., Кулаков Ю.М. Изменение характеристики круга и процесса шлифования под воздействием смазочно-охлаждающих жидкостей // Разработка и применение смазочно-охлаждающих жидкостей при резании металлов. – М., 1966. – С. 58 – 71.

302. Хрущов М.М. О соотношении микротвердости и микрохрупкости // Методы испытаний на микротвердость : сб. ст. – М.: Наука, 1965. – С. 7 – 22.

303. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. – М.: Машиностроение, 1971. – 215 с.

304. Черепанов А.М., Тресвятский Т.С. Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. – М.: Металлургия, 1964. – 302 с.

305. Чизмаджев Ю.А. и др. Макрокинетика процессов в пористых средах. – М.: Наука, 1971. – 363 с.

306. Чувствительность механических свойств к действию среды / под ред. А. Вествуда и Н. Столова; пер. с англ. / под ред. Е.Д. Щукина. – М.: Мир,

1969. – 352 с.

307. Шатько Д.Б. Повышение эффективности использования лепестковых шлифовальных кругов за счет зерен с контролируемой формой : автореф. дис. … канд. техн. наук. 05.03.01 / Шатько Дмитрий Борисович. – Томск, 2005. – 20 с.

308. Щелачева Е.Г., Федотова С.М., Ройтштейн Г.Ш. Факторное планирование эксперимента при расчете рецептуры формовочных масс / НИИАШ // Абразивы. – М., 1975. – Вып. 1 (127). – С. 13 – 16.

309. Шмелев Л.А. Труды / ВНИИК. – М., 1934. – Вып. 45. – С. 69 – 97.

310. Шумячер В.М. Механо-химические процессы и эффективность смазочно-охлаждающих технологических сред при суперфинишировании, хонинговании и доводке: дис. … д-ра техн. наук. 05.03.01; 05.02.08 / Шумячер Вячеслав Михайлович – Волжский, 1997. – 211 с.

311. Шумячер В.М., Крюков С.А. Управление процессом шлифования за счет изменения структурно-механических характеристик инструмента // Шлифабразив- 98: сб. тр. – Волжский, 1998. – С. 184 – 185.

312. Шумячер В.М., Крюков С.А. Влияние внешних воздействий на качество пропитывания абразивного инструмента импрегнаторами // Материалы и технологии XXI века: сб. матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Ч.III. – Пенза, 2001. – 43 – 44.

313. Шумячер В.М., Крюков С.А., Славин А.В., Мироседи А.И. Инновационно-технологические принципы совершенствования абразивного инструмента // Вестник Сарат. гос. ун-та. – № 4 (49). – Вып. 1, 2010. – С. 70 – 77.

314. Шумячер В. М., Славин А. В., Крюков С. А. Основы создания высокоэффективных абразивных инструментов : монография В.М. Шумячер, А.В. Славин, С.А. Крюков / под общ. ред. В. М. Шумячера ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т , ВИСТех (филиал) Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Волгоград : ВолгГАСУ, 2015. – 135 с.

315. Эммануэль Н.М. Курс химической кинетики. – М.: Высшая школа, 1984. – 463 с.

316. Якимов А.В., Мубаракшин Р.М. Исследование режущей способности пропитанных шлифовальных кругов // Вестник машиностроения.– 1978. – № 6. – С. 31 – 33.

315. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.

316. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – Киев: Вища школа, 19865. – 175 с.

317. Якубовский Е.С., Эйдельштейн Ф.И., Ломова А.А. О методах обработки поверхности абразивных материалов и синтетических алмазов для улучшения их смачиваемости // Абразивы и алмазы. – 1966. – № 2 – С. 9 – 14.

318. Ящерицын П.И., Зайцев А.Г. Повышение качества шлифовальных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. – Минск: Наука и техника, 1972. – 480 с.

319. Ящерицын П.И., Караим И.П. Шлифование с подачей СОЖ через поры круга. – Минск: Наука и техника, 1974. – 256 с.

320. Bauman H.N. Petrology of Fused Alumina Abrasives / American Ceramic Society Bulletin, 1956. № 10. – V. 35.

321. Bird G.A. Molecular Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flow. – Oxford: Science Publications, 1994. – 350 p.

322. Brecker J. Evaluation of Unbounded Abrasive Grains. – Annals of the CIRP, 1973, Vol 22. № 5. – P.P. 219 – 225.

323. Gilman J.J., Physic and Chemistry of Ceramics, Gordon and Breach. – New York, 1963. – P. 240.

324. Haasis G. Whats new in diamond honing? – JDR. – 1970. – T. 30. 352. – 91 – 98.

325. Hasselman D.B., H.J. Amer. Ceram. Soc, 1969. – V. 52. – № 4. – P. 215.

326. Kezdi A. Handbuch der Bodenmechanik. VEB – Verlag. Berlin, 1969. 1969. S. 97 – 101.

327. Konig W., Bottler E. INFOS – Jnformationszentrum fur Schnitwerte, Schleifen. – Jndustrie Anzeiger, 1978. – V. 101. – № 91. – 45 p.

328. Konig W., Lorts W. Proherties of cutting edges related to chip formation in griding. CIRP, 1975, 24, № 24. – P. 231 – 235.

329. Krug H., Hoheia G. Упругие деформации шлифкругов // Э.И. Технология и оборудование механосборочного производства. – 1964. – № 22.

330. Krukov, S. A. The Influence of Ceramic Binder Grinding Wheel Structural and Mechanical Characteristics on its Durability / V. M. Shumyacher, A. V. Slavin, S. A. Kryukov // Procedia Engineering 150 (2016), ICEE, 2016. – H. 916 – 919.

331. Krukov, S. A. Phenomenological Model of the Mixing Process of Competents of a Moldable Mixture for Manufacturing of Abrasive Tools / A. V. Slavin, S. A. Kryukov // Procedia Engineering 150 (2016), ICEE, 2016. – H. 911 – 915.

332. Labe T.W. The Structure of Jnorganic Clay. Tpans. Am. Soc. Civil Eng., № 315. – P. 85 – 91.

333. Modern Aspects of the Vitreous State / Mackenzic J.D., ed., Butterworth, London and Washington, 1962. – P. 152.

334. Moser M., Peters J. Fundamentals is the Navel Quality Sistem of Grinting Mools. Annals of the CIRP, 1973. – Vol. 22. № 1. – P. 103 – 105.

335. Moser M. Untersuchung der Phasergrense Zwischen Elektrokorun Korpern und Keramischen Bindemitteln bei keramisch gebundenen Schleifwerhzeugen. – Bericht der KDR, 1972, Bd. 49. № 410. – S. 343 – 346.

336. Opitz H., Pehlenik J., Ernst W. Untersuchung der Harte von Schleifkorpern. – Koln und Opladen: Westdeutscher Verlag, 1964. – 57 s.

337. Suto T., Waida T. Behaviours of Active Grains in Grinding Process // Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory, 1973. № 8. P. 1 – 11.

338. Tobochnik J., Chapin P.M. Monte Carlo simulation of hard spheres near random closest packing using spherical boundary conditions // J. Chem. Phys. – 1988. – № 88. – P. 58 – 62.

339. Weibul W., Kg. Svenska Vetanskapsakad, Handl. 151 and 153, Stockholm, 1939. – P. 141 – 148.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ П.1

Таблица П.1

Экспериментальные и расчетные показатели рабочей поверхности шлифовальных кругов

Экспериментальные данные разных авторов						Расчетные значения			
Исследователи	Метод исследований	Абразивный инструмент	Глубина исследуемого рельефа H_p, мкм	Среднее расстояние между зернами $l_{ср}$, мм	Количество режущих кромок N, 1/мм или 1/мм^2	Приведенная высота профиля $H_p/H_{гр}$	Длина поверхност. поры l_n, мм	Размер пор по формуле (2.109) d_n, мм	Отношение $\frac{l_n}{d_n}$
Попов С. А. [237, 238]	Профилографирование поверхности абразивного инструмента	ЭБ40СМ1К6 (24А40СМ16К)	(0–50) 10 мкм 50 мкм	1,30 0,85	– –	0,061 0,306	1,26 0,683	0,275 0,275	4,56 3,06
Ананьев Р. В. [10]		24А25СМ16К 24А16СМ110К (ВП) 24А25СМ18К 24А25СМ110К (ВП) 24А25СМ115К (ВП)	(0 – 50) 40 50 40 40	0,62 0,866 0,69 0,87 1,97	– – – – –	0,490 0,612 0,490 0,392 0,392	0,392 0,663 0,490 0,392 0,392	0,220 0,408 0,280 0,395 0,834	1,78 1,62 1,71 1,67 2,13
Филимонов Л. Н. [288]		24А40С17К 24А25СТ17К 24А16С17К	40 40 40	– – –	1,3 3,9 2,9	0,245 0,392 0,612	0,793 0,40 0,326	0,321 0,190 0,200	2,47 2,27 1,63
Островский В. И. [215]		24А25С17К	10	0,81	–	0,098	0,714	0,198	3,61
Konig W.< Lortz W. [330]		АА46М6V (24А40С16К)	5	–	0,92	0,030	1,075	0,155	6,94
Караулов Е. В. [100]	Стереофотограметрия поверхности инструмента	24А25СМ16К	0 – 5	–	0,6	0,025	1,603	0,220	7,28
Кудряшов Б. П. [169]	Фиксация следов резания на поверхности металлической ленты	14А40СМ26К 14А25СМ16К 14А16СМ16К	9,3 8,0 6,7	1,436 1,080 0,800	– – –	0,057 0,078 0,102	1,383 1,005 0,796	0,238 0,221 0,179	5,81 4,54 4,44

ПРИЛОЖЕНИЕ П. 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ВПИ (филиал) ВолгГТУ

_____ А. В. Фетисов

«15» мая 2017 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Разработчики:

д.т.н., проф. Шумячер В.М.

к.т.н., доцент Крюков С. А.

к.т.н., доцент Байдакова Н.В.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая инструкция применяется при проектировании и производстве шлифовальных кругов для высокоэффективной обработки металлов, сплавов и других материалов с использованием наполнителей и смесей абразивов разных зернистостей. Выбор и проектирование рациональных составов рецептур формовочных смесей изготовления шлифовальных кругов реализуется на основе разработанных расчетных моделей и технологических регламентов, обеспечивающих достижение заданных структурно-механических характеристик и эксплуатационных показателей: режущей способности и стойкости шлифовального круга, шероховатости обработанной поверхности детали.

В данной инструкции также представлена разработанная новая технология импрегнирования расплавом серы шлифовальных кругов на керамическом связующем, включающая термозакалку инструмента с последующей пропиткой импрегнатором. За счет этого повышается качество и полнота пропитки, уменьшается дисбаланс кругов, повышается и сохраняется на длительный срок прочность, микрохрупкость и самозатачиваемость абразивных зерен, что обеспечивает высокую работоспособность и стабильность свойств инструментов при работе с водными СОЖ и длительном хранении.

Разработанный технологический регламент проектирования и изготовления высокоэффективных шлифовальных кругов, учитывающий специфические особенности структурообразования и формирования внутреннего строения инструментов при использовании различного рода наполнителей и смесей абразивов разной зернистости, дает возможность обеспечивать заданные структурно-механические характеристики, повысить эффективность шлифовальных кругов и расширить области их применения.

I. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ РЕЦЕПТУР ДЛЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

1.1. Задание: спроектировать упрочненные шлифкруги высокой структуры и мягкой твердости с использованием мелкодисперсного наполнителя.

1.2. Исходные данные: вид, форма, индекс качества и зернистость абразивного зерна и частиц абразивного мелкодисперсного наполнителя, структура и твердость шлифкруга и его геометрические размеры.

1.3. Справочные источники информации: ГОСТ Р 52381 – 2005, ГОСТ Р 52587 – 2006, ГОСТ Р 52588 – 2006, ГОСТ 3647 – 80, ГОСТ 21323; зерновой состав шлифзерна (табл. 1.7 – 1.8), индекс качества шлифовального материала (табл. 1.9); практические рекомендации: по выбору зернистости (табл. 1.10), твердости (табл. 1.11), структуры (табл. 1.12), связки (табл. 1.13) шлифовальных кругов в зависимости от вида обработки (табл. 1.14) и шероховатости обработанной поверхности деталей и др.

1.4. Расчетные формулы для определения размера частиц мелкодисперсного абразивного материала $d_{\text{н}}$ и рационального содержания частиц наполнителя $V_{\text{н}}$ в формовочной смеси:

$$d_{\text{н}_\text{м}} \le 0{,}523 \cdot d_{\text{з}} \sqrt[3]{0{,}015\left(\frac{\pi}{2}+\frac{1}{\rho_y^2}\right)\cdot K_{\text{ф}}}, \qquad (1.1)$$

где $d_{\text{з}}$ – размер абразивного зерна;

$\rho_{\text{у}}$ – плотность заполнения зерном черепка шлифкруга;

$K_{\text{ф}}$ – коэффициент формы зерна (изометрическая $K_{\text{ф}} = 1{,}0 \div 1{,}4$, промежуточные $K_{\text{ф}} = 1{,}4 \div 1{,}8$, пластинчатые, осколочные и игольчатые $K_{\text{ф}} = 1{,}8 \div 3{,}0$.

$$V_{\text{нм}} = \frac{\pi}{3}\left(0{,}476 - \frac{1}{1{,}1+\sqrt[3]{K_d}}\right) Z^{-\alpha} \cdot K_{\text{ф}}^{\beta} \cdot O_{\phi}^{\gamma} \cdot N^{\varphi}(C+1)^{\psi} \cdot K_{\text{вз}}, \qquad (1.2)$$

где K_d – соотношение между размерами зерен $d_{\text{з}}$ и частицами наполнителя $d_{\text{н}}$,

$\left(K_d = \frac{d_з}{d_н}\right)$; α= 0,08; β = 0,11; γ = 0,50; φ = 0,19 + 0,02 N; ψ = 1,21; $K_{вз}$ = 1,0 (24АК, 25А); $K_{вз}$ = 0,96 (14А, 15А); $K_{вз}$ = 1,22 (63С, 64С); $K_{вз}$ = 1,26 (53С, 54С);

Z – зернистость шлифзерна (по ГОСТ 3647 – 80);

$O_ф$ – содержание основной фракции;

N – шифр номера твердости шлифкруга (при твердости F (ВМ1) присваивается номер 1, G (ВМ 2) – номер 2 и т.д.);

С – номер структуры шлифкруга;

$K_{вз}$ – коэффициент вида абразивного зерна (24А, 25А – $K_{вз}$ = 1,0; 63С, 64С – $K_{вз}$ = 1,6 ÷ 1,7).

Плотность заполнения зерном черепка шлифкруга ρ_y определяется по формуле:

$$\rho_y = \frac{62 - 2C}{49 + 1{,}5N}. \qquad (1.3)$$

1.5. Определение необходимого количества связки $V_с$ в весовых частях на 100 вес. ч. электрокорундового зерна по формуле:

$$V_с = 0{,}151 Z^{\alpha_э} \cdot N^{\beta_э} \cdot (C+1)^{\gamma_э} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \lambda^{-1}, \qquad (1.4)$$

где $\alpha_э$ = 0,33 – 0,0015 Z; $\beta_э$ = 1 + 0,05 N; $\gamma_э$ = 0,51 + 0,02 C; K_1, K_2, K_3 – коэффициенты, учитывающие тип связки, марку зерна и индекс качества зерна соответственно, при этом: K_1 = 1,0 (К5); K_1 = 1,15 (К8); K_1 = 0,12 (N1); K_2 = 1,0 (24А); K_2 = 1,08 (25А); K_2 = 0,92 (14А); K_3 = 1,05 (П); K_3 = 1,0 (Н); K_3 = 0,95 (D); λ – коэффициент, учитывающий относительное изменение содержания зерна от объемного содержания наполнителя (при использовании мелкодисперсного абразивного наполнителя $\lambda_м$ = 1 + 0,005 $V_{нп}^{1,1}$ порообразующего наполнителя $\lambda_п$= 1 + 0,01$V_{нп}$).

В табл. 1.1 представлены данные по содержанию связки в весовых частях на 100 весовых частей зерна, рассчитанные по формуле (1.4) без учета коэффициента λ.

Т а б л и ц а 1.1

Результаты расчета количества связки К5 для инструментов из электрокорунда белого 25А [50 – 6] Н

Струк-тура	Количество связки, необходимой для получения инструмента различных твердостей, вес. ч. на 100 веч. ч. зерна							
	М3	СМ1	СМ2	С1	С2	СТ1	СТ2	СТ3
Зернистость № 50								
7	8,1/8,7							
6		8,7/8,7	10,6/11,0	12,5/12,5	14,6/14,2			
5						13,6/14,5	15,4/16,1	17,2/17,6
Зернистость № 40								
7	7,7/7,5							
6		8,5/8,5	9,9/10,0	11,8/11,5	13,7/13,2			
5						12,8/13,0	14,5/14,8	16,2/16,5
Зернистость № 25								
8	7,8/8,0							
7		8,5/8,7	0,4/10,5	12,3/12,4	14,3/14,5			
6						13,7/14,5	15,6/16,2	17,4/18,0
Зернистость № 16								
8	8,9/8,5							
7		9,7/9,2	11,8/11,4	13,9/13,8	16,3/15,6			
6						15,6/16,5	17,7/18,5	19,8/20,5
Зернистость № 10 – 12								
8	9,6/9,5							
7		10,4/11,0	12,7/12,8	15,0/14,7	17,3/16,8			
6						16,0/16,5	19,0/19,0	21,2/21,5
Зернистость № 6 – 8								
8	10,3/11,2	13,0/14,0	15,8/16,5					
7				16,2/16,7	18,7/18,0			
6						18,0/17,5	20,4/19,5	22,8/22,3

Примечание: В числителе расчетные, в знаменателе заводские рецептурные данные по содержанию связки в формовочной массе

Т а б л и ц а 1.2

Результаты расчета количества связки К10 для инструментов из карбида кремния 63С различной твердости и структуры

Струк-тура	Количество связки, необходимой для получения инструмента различных твердостей, вес. ч. на 100 веч. ч. зерна							
	М3	СМ1	СМ2	С1	С2	СТ1	СТ2	СТ3
Зернистость № 50								
7	22,5/22,5	25,4/25,0	29,2/28,5	32,4/31,5	35,4/35,0	38,8/38,5	41,1/42,0	43,8/44,5
6	20,0/21,0	22,0/23,0	26,0/24,0	28,7/27,0	31,4/30,0	34,0/33,0	36,8/36,0	38,8/39,0
5	17,4/17,5	20,0/20,5	23,1/22,5	24,8/25,0	27,1/27,5	31,0/29,0	31,8/33,0	–
Зернистость № 40								
7	18,9/21,0	22,8/24,5	27,4/27,0	29,2/28,0	32,9/30,5	35,6/34,0	37,8/36,0	39,4/38,0
6	18,6/18,0	21,4/20,0	22,0/22,5	25,6/24,0	29,2/27,0	31,6/30,0	33,3/32,5	36,0/35,5
5	16,3/15,0	18,6/18,0	20,8/20,0	23,1/22,0	25,2/24,0	27,3/25,0	29,1/27,0	31,2/30,0
Зернистость № 25								
7	18,5/20,0	21,2/22,0	24,0/24,0	26,4/26,0	29,4/28,0	31,4/30,0	33,6/32,0	35,8/34,0
6	16,4/16,0	18,6/19,0	22,1/21,0	23,4/22,0	25,6/24,0	27,8/27,0	29,8/29,0	31,5/32,0
Зернистость № 16								
7	16,9/18,5	19,2/21,0	21,8/23,0	24,2/25,0	26,5/27,0	28,7/29,0	30,8/32,0	33,8/35,0
8	18,7/20,0	21,5/23,0	24,2/25,0	26,8/27,0	29,7/29,0	31,2/32,0	34,1/35,0	35,6/37,0
Зернистость № 12								
7	16,1/17,0	18,5/19,0	20,8/21,5	23,0/23,5	24,8/25,5	27,3/28,0	29,3/30,0	31,2/32,0
8	17,9/18,5	20,0/20,5	23,1/23,0	25,6/25,0	28,0/27,0	30,4/29,5	32,5/31,5	34,6/33,5
Зернистость № 6 – 8								
8	16,7/17,5	19,2/19,0	21,6/21,0	23,9/22,5	26,2/24,5	28,4/27,0	30,4/29,0	–
Примечание: В числителе расчетные, в знаменателе заводские рецептурные данные по содержанию связки в формовочной массе								

Для сравнения приведены данные по количеству связки, применяющиеся в системе рецептов, разработанных экспериментально для Волжского абразивного завода. Проведенный статистический анализ показал, что расчетные показатели при доверительной вероятности 95 % колеблются в пределах 0 ÷ 8 % от заводских рецептурных значений.

1.6. Расчет зернового состава формовочной смеси с мелкодисперсным наполнителем для рецептуры по изготовлению высокоструктурных шлифовальных кругов производится по формулам (1.1) и (1.2).

В табл. 1.3 представлена рецептура Волжского абразивного завода и разработанная автором и рекомендуемая рецептура для высокопористых кругов. Разработанная рецептура отличается от заводской значениями массовых частей зерна, наполнителя и связки.

Таблица 1.3

Рецептуры для высокопористых кругов из электрокорундовых материалов зернистости № 50, F36

Наименование компонентов	Заводская (ВАЗ)				Рекомендуемая (ВИСТех)			
	G(ВМ2)	*K*(СМ1)	*L*(СМ2)	*O*(СТ1)	*G*(ВМ2)	*K*(СМ1)	*L*(СМ2)	*O*(СТ1)
Зерно:	Массовые части				Массовые части			
25А50, F36	80	80	80	80	85	80	77	65
Наполнители:								
25А8, F150	20	20	20	20	15	20	23	35
Порообразователь	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Связка К5, К5С	10,0	14,0	16,5	17,0	5,6	11,0	13,0	14,5
Структура	10	10	10	10	10	10	10	10

Так, по стандартной рецептуре независимо от твердости инструментов содержание наполнителя в формовочной смеси составляет 20 массовых частей, а по рекомендуемой рецептуре содержание наполнителя изменяется от 15 (ВМ2) до 35(СТ1) массовых частей и для рассматриваемых твердостей инструмента является оптимальным. Все это будет способствовать, наряду с увеличением прочности высокопористых инструментов за счет армирования связки, повышению их эксплуатационных показателей.

2.1. Задание: спроектировать высокопористый шлифкруг повышенной прочности с использованием прочного и огнеупорного порообразующего наполнителя.

2.2. Исходные данные (см. 1.1): в качестве наполнителя берется карбид кремния 54С32 (КК32).

2.3. Справочные источники информации (см. 1.3).

2.4. Расчетные формулы для определения размера частиц поробразующего напонителя $d_{\text{н.п.}}$ и его объемного содержания $V'_{\text{н.п.}}$ в %:

$$d_{\text{нп}} = d_{\text{з}} \sqrt[3]{\left(\frac{1}{V'_{\text{з}}} - \frac{1}{\rho_y}\right) \cdot K_{\text{пз}}}, \qquad (1.5)$$

где $V'_{\text{з}}$ – объемное содержание зерна в долях единицы ($V'_{\text{з}} = 0{,}01\ V_{\text{з}}$);

$K_{\text{пз}}$ – коэффициент, характеризующий соотношение количества зерен и количества пор ($K_{\text{пз}} = 1 \div 4$ [26]).

При этом содержание зерна $V_{\text{з}}$ определяется по табл. 1.3, а плотность заполнения ρ_y – по выражению (1.3). Как показывают расчеты по формуле (1.5), для высокопористых инструментов низкой твердости (ВМ – М) размер наполнителя $d_{\text{нп}} = (1{,}2 \div 1{,}7) d_{\text{з}}$.

$$V'_{\text{нп}} = \frac{1}{3\pi}\left[\frac{\left(1-\rho_y\right)\rho_y}{V'_{\text{з}}} + \left(1 - \sum V_{\text{пв}}\right)\right] \cdot Z^{-0{,}12} \cdot K_{\text{вз}}^{-1} \cdot 100\%, \qquad (1.6)$$

где $\sum V_{\text{пв}}$ – суммарный объем пор в проектируемом высокопористом инструменте в долях единицы $\left(\sum V_{\text{пв}} = 0{,}5 \div 0{,}7\right)$; $K_{\text{вз}}$ – коэффициент, характеризующий вид абразивного материала (электрокорунд – $K_{\text{вз}}$ = 1,0; карбид кремния $K_{\text{вз}} = 2 \div 3$).

При разработке рецептуры формовочных смесей необходимо рассчитывать массовое (весовое) содержание частиц наполнителя на 100 вес. ч. абразивного зерна. Для этих целей производится перевод объемных процентов наполнителя и основного зерна в массовые по следующей формуле:

$$V_{\text{нп}} = \frac{V'_{\text{нп}} \cdot \gamma_2 \cdot 100}{\left(V_{\text{з}} - V'_{\text{нп}}\right)\gamma_1},\ \text{вес. ч.}, \qquad (1.7)$$

где γ_1 и γ_2 – удельные веса абразивного зерна и частиц наполнителя соответственно.

2.5. Определение необходимого количества связки V_c – см. 1.5.

2.6. Расчет зернового состава формовочной смеси с порообразующим наполнителем КК32 для рецептуры по изготовлению высокопористых шлифкругов производится по формулам (1.5) и (1.6).

В табл. 1.4 приведены рецептуры высокопористых электрокорундовых кругов с огнеупорным прочным наполнителем КК32.

Таблица 1.4

Рецептуры для высокопористых кругов с огнеупорным прочным наполнителем КК32

Наименование компонентов	Рецептуры						
	ВМ2	СМ1	СМ2	С1	С2	СТ1	СТ2
Зерно: 25А25, F	100	100	100	100	100	100	100
Наполнители: КК32	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Декстрин сухой	2,0	2,0	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4
Жидкий силикат	4,5	5,3	5,7	5,9	6,1	6,3	6,3
Связка К5, К5С	10,0	14,0	16,5	17,0	5,6	11,0	21,5
Структура	10	10	10	10	10	10	10
Мас. концентрация	2,9	2,17	2,20	2,22	2,23	2,27	2,30

3.1. Задание: спроектировать шлифкруги с использованием смесей абразивов разных зернистостей.

3.2. Исходные данные: абразивные зерна смежных зернистостей, например 100/63/40; 50/32/20; 25/16/10 и т.д. (зернистость берется по ГОСТ 3647–80).

3.3. Справочные источники информации: см. 1.3.

3.4. Расчетные формулы для определения объемного содержания зерен меньшей зернистости $V_м$, средней – $V_с$ и крупной $V_к$:

$$V_к = \frac{100}{1 + K_{V_1} + K_{V_1} \cdot K_{V_2}}; \qquad (1.8)$$

$$V_{\text{с}} = \frac{100 \cdot K_{V_1}}{1 + K_{V_1} + K_{V_1} \cdot K_{V_2}}; \tag{1.9}$$

$$V_{\text{м}} = \frac{100 \cdot K_{V_1} \cdot K_{V_2}}{1 + K_{V_1} + K_{V_1} \cdot K_{V_2}}, \tag{1.10}$$

где $K_{V_1} = \frac{V_{\text{с}}}{V_{\text{к}}}$; $K_{V_2} = \frac{V_{\text{м}}}{V_{\text{с}}}$.

При рациональном соотношении между объемами абразивов $K_{V_{1\text{опт}}}$ и $K_{V_{2\text{опт}}}$ при различных заданных соотношениях между их зернистостями объемное содержание $V_{\text{к}}$, $V_{\text{с}}$ и $V_{\text{м}}$ определяется по формулам:

$$V_{\text{к}} = 100 K_{Z_1}^{-0,65}; \tag{1.11}$$

$$V_{\text{с}} = (100 - V_{\text{к}})\left(1 + \sqrt{K_{Z_1}}\right)^{-0,5}; \tag{1.12}$$

$$V_{\text{м}} = 100 - (V_{\text{к}} + V_{\text{с}}). \tag{1.13}$$

Во всех случаях соотношения K_Z между крупной зернистостью $Z_{\text{к}}$ и средней $Z_{\text{с}}$ $\left(K_{Z_1} = \frac{Z_{\text{к}}}{Z_{\text{с}}}\right)$ и средней зернистостью $Z_{\text{с}}$ и мелкой $Z_{\text{м}}$ $\left(K_{Z_2} = \frac{Z_{\text{с}}}{Z_{\text{м}}}\right)$ необходимо брать равными 1,6, а между крупной зернистостью и мелкой $K_Z = \frac{Z_{\text{к}}}{Z_{\text{м}}} = 2,5$. Для определения $K_{V_{1\text{опт}}}$ и $K_{V_{2\text{опт}}}$ используется формула:

$$K_{V_{1\,\text{опт}}} = \frac{\sqrt{K_{Z_1}} - 1}{0,85\sqrt{K_{Z_1}}}; \quad K_{V_{2\,\text{опт}}} = \frac{\sqrt{K_{Z_1} \cdot K_{Z_2}} - 1}{1,5\sqrt{K_{Z_2}}}. \tag{1.14}$$

3.5. Определение необходимого количества связки – см. 1.5.

3.6. Расчет зернового состава формовочной смеси из абразивов разных зернистостей для рецептуры по изготовлению шлифовальных кругов производится по выше приведенным формулам (см. 3.4).

В табл. 1.5. приведены варианты абразивных смесей.

Таблица 1.5

Варианты абразивных смесей из зерен трех номеров зернистостей и разных по виду и форме

Вид, зернистость и форма зерна	Варианты смесей			
	I	II	III	IV
54С100, F20	60 %	56,0 %	56,0 %	56,0 %
54С63, F30	25 %	27,3 %	26,4 %	26,4 %
54С25, F60	15 %	16,7 %	–	–
25А20, F70 (стандартное)	–	–	17,6 %	–
25А20, F70 (игольчатое и пластинчатое)	–	–	–	17,6 %
Прочность, МПа	5,4	5,8	6,9	7,8

Первый вариант абразивной смеси соответствует заводской рецептуре по изготовлению обдирочных инструментов 54С100/63/25 ВТ5К3 для обработки шлифовальных кругов. Состав второго варианта смеси рассчитывался по формулам (1.10), (1.11) и (1.12), исходя из соотношения номеров зернистостей по заводской рецептуре. Запатентованные и рекомендуемые в данной работе оптимальные абразивные массы (смеси) представлены третьим и четвертым вариантами (пат. 2262434 РФ, пат. 2354534 РФ).

Отличительной особенностью предлагаемых смесей III и IV вариантов является то, что вместо зерен карбида кремния зернистостью № 25 используются зерна электрокорунда белого зернистостью № 20. Введение в смесь адгезионно-активных к керамической связке электрокорундовых зерен малой зернистости позволяет получить более прочные контакты между зернами карбида кремния, что в целом повышает прочность черепка инструмента. Использование вместо стандартного зерна 25А20 игольчатого и пластинчатого дополнительно повышает прочность мостиков связки за счет их лучшего «армирования».

II. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ И ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

1. На первом этапе подготовительных работ оцениваются исходные данные, зерновые составы абразивных материалов, условий и режимов шлифования, а также прогнозируются структурно-механические и эксплуатационные характеристики проектируемых шлифкругов. Результатом оценки и прогнозирования должен стать выбор рационального зернового состава абразивного материала с наполнителями.

2. На втором этапе производится выбор и обоснование способа регуляции и стабилизации свойств и показателей шлифкругов в зависимости от конкретных производственных задач. На основе этого ориентировано определяется зерновой состав формовочной смеси с учетом вида и формы частиц наполнителей. Производится предварительная оценка эффективности структурно-технологических способов введения наполнителей.

3. На третьем этапе определяется размер частиц наполнителей и их дозировка, составляется порция формовочной смеси для изготовления опытных образцов шлифкругов и производится их экспресс испытания с целью получения результатов по механической прочности и эксплуатационных показателей изготовленных шлифкругов с наполнителями. Критическим значением содержания наполнителя принимается то количество наполнителя, превышение которого приводит к снижению показателей шлифования.

4. На четвертом этапе путем соответствующего корректирования содержания отдельных компонентов формовочной смеси, исходя из производственных условий предприятий и наличия того или иного компонента или их замены, назначается окончательная рецептура для изготовления шлифкругов.

5. После исполнения подготовительных работ технологический процесс основного производства шлифовальных кругов с использованием наоплнителей регламентирует:

– требования к исходным материалам и их входной контроль;

– последовательность технологических операций и режимов при производстве;

– методы и средства исполнения технологических операций;

– методы и средства технического контроля при производстве, комплектовании, хранении, отгрузке и транспортировании готовой продукции;

– общие требования безопасности при изготовлении, транспортировании по соответствующим ГОСТам.

6. Технологические требования:

– основным документом для приготовления формовочной смеси является разработанная рецептура;

– формовочная смесь должна быть однородного состава и рассыпчатой;

– в отдельных случаях допускается корректировка формовочной смеси с учетом производственных условий.

7. Требования техники безопасности:

– при выполнении работ согласно технологическому процессу производства шлифкругов руководствоваться инструкциями по охране труда;

– работы производить при работающей вентиляционной системе и с применением индивидуальных средств защиты органов дыхания, спецодежды, рукавиц.

III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

1. Приготовление формовочных смесей из исходных материалов (абразивного зерна, связки, увлажнителя и наполнителей) состоит из их дозирования, смешивания и разрыхления. При этом необходимо достичь оптимальной однородности смеси и одновременно с этим невысокие допустимые отклонения по массе (не более ± 1 %) всех компонентов в составе формовочной смеси.

2. Подготовленная формовочная смесь дозируется при укладке ее в прессформу и затем производится прессование формовок кругов с удельными давлениями, при которых не происходит перепрессовки и разрушения зерен и в целом формовки.

$$P_{\text{пр}} = \psi \cdot \sigma_0 \frac{H}{D-d} \cdot \left(\frac{W}{W_0} - \ln \frac{W}{W_0} \right) \cdot Z^{-\alpha} \cdot (C+1)^{-\beta} \cdot N^{\gamma} \cdot K_{\text{в}}, \qquad (1.15)$$

где H, D и d – геометрические размеры инструмента;

ψ – коэффициент;

α, β и γ – показатели степеней;

W – влажность формовочной смеси;

W_0 – оптимальная влажность;

Z – зернистость;

C – структура;

N – шифр твердости;

$K_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий вид абразивного материала.

В табл. 1.6 представлены значения коэффициентов и показателей степеней.

Таблица 1.6

Значения коэффициентов и показателей степеней

Постоянный коэффициент ψ	Прочность смеси σ_0, МПа	Оптимальная влажность W_0, %	Показатели степеней			Коэффициент вида зерна $K_{\text{в}}$	
			α	β	γ	24А, 25А	63С, 64С
178,1	1,4 – 2,0	10 – 15	0,5	0,8	0,6	1,0	1,6 – 1,7

3. После прессования формовок производится их сушка с максимальной температурой, не превышающей 100 ^{o}C. Сушка заготовок производится для удаления влаги с 5 ÷ 8 % до 0,4 ÷ 0,6 % и придания им достаточной механической прочности для транспортировки на обжиг.

4. Обжиг заготовок производится по существующим режимам, включающим постепенный подъем температуры в течение 22 – 25 часов до максимальной температуры в пределах 1200 – 1250 ^{o}C с выдержкой от 2 до 8 часов и медленное остывание (охлаждение) вместе с печью в течение 40 – 45 часов. На все это уходит от 2 до 5 суток в зависимости от типа печи и объема загрузки ее заготовками.

5. Обожженные и охлажденные заготовки шлифовальных кругов подвергаются механической обработке с целью исправления последствий возможных деформаций и усадки черепка кругов, обеспечения заданной точности размеров и приданию кругу необходимой фасадной формы.

6. После механической обработки шлифовальные круги проходят испытания на твердость, уравновешенность и прочность на разрыв по методикам нормируемыми соответствующими ГОСТами.

IV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОПИТЫВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ РАСПЛАВОМ СЕРЫ ПО ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ

1. Назначение и область применения

1.1. Пропитывание расплавом серы по предлагаемой технологии предназначено для улучшения структурно-механических свойств и повышения эксплуатационных показателей электрокорундовых шлифовальных кругов на керамическом связующем. Данная технология увеличивает полноту пропитывания и адгезию серы к черепку инструмента, уменьшает время пропитывания и дисбаланс инструмента по сравнению с заводской технологией. Термообработка инструмента и закалка его во время охлаждения на воздухе повышает прочность и микрохрупкость абразивных зерен шлифовальных кругов, что способствует их самозатачиваемости.

1.2. Предлагаемая технология может быть использована во всех отраслях машиностроения и на абразивных заводах при импрегнировании серой шлифовальных инструментов зернистостью 40, 25, 16,12.

2. Описание технологического процесса

2.1.Технологический процесс состоит из следующих операций (рис. П. 1.1):

– термопрокалка шлифовального круга при 450 … 500^{o} С в течение 20 … 30 мин;

– закалка круга при охлаждении на воздухе до температуры расплава серы 145 … 150^{o} С;

– приготовление расплава серы;

– пропитывание круга в ванне с расплавом серы;

– охлаждение круга после пропитывания;

– контроль качества импрегнирования.

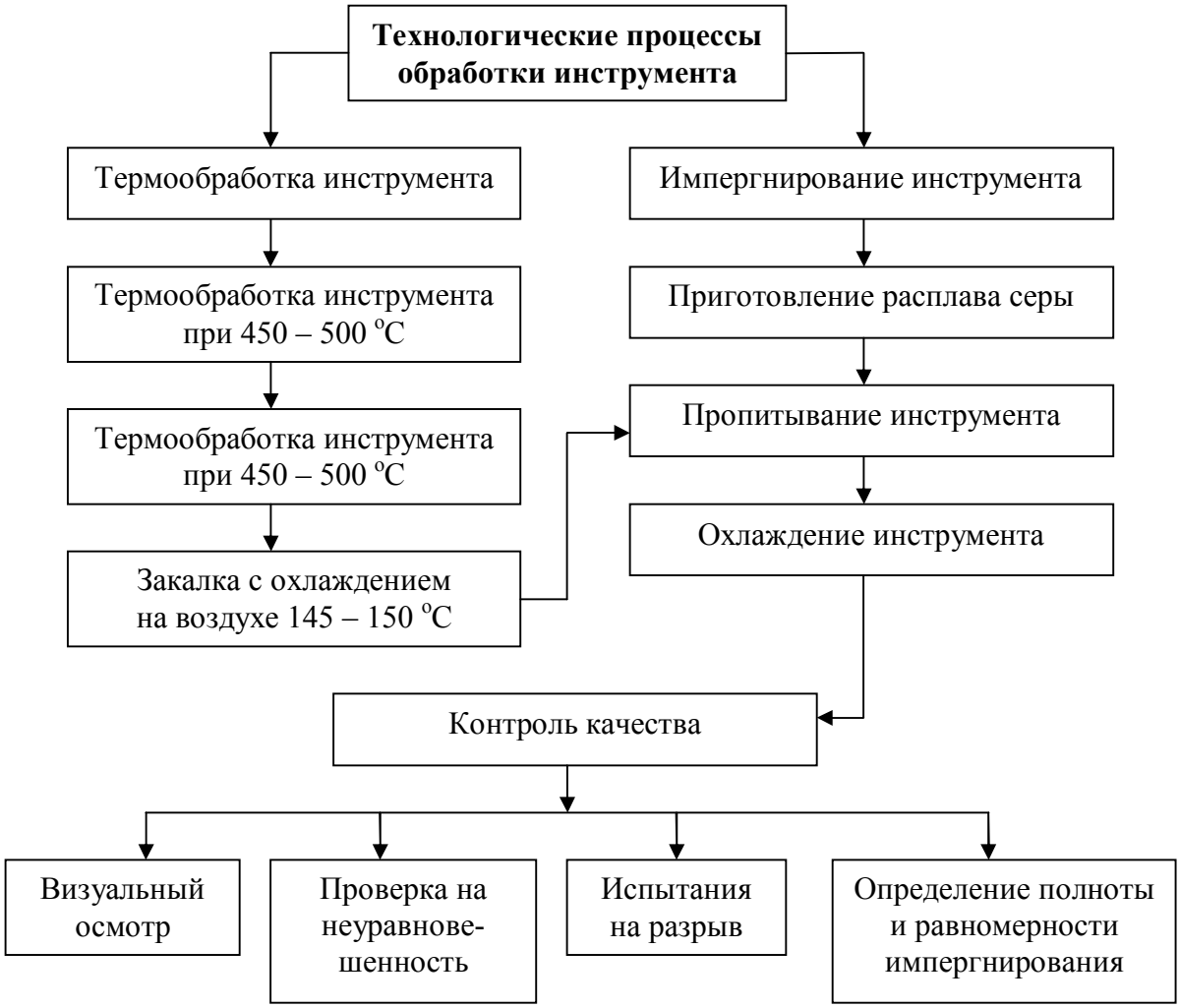


Рис. 1.1. Схема предлагаемой технологии импрегнирования расплавом серы инструмента на керамическом связующем

2.1.1. Термообработка круга

Поместить круг в нагревательное устройство (печь) и нагреть круг до температуры 450 … 500° С. Выдержать круг при такой температуре в нагревательном устройстве 20 … … 30 мин в зависимости от его зернистости: для круга из зерна № 40 – 20 мин, для круга из зерна № 12 – 30 мин.

После этого термообработать круг, охлаждая его на воздухе до температуры расплава серы 145 … 150° С.

2.1.2. Приготовление расплава серы

В ванне расплавить серу до температуры 145 … 150° С до завершения операций по термообработке инструмента.

2.1.3. Пропитка круга

Круг в горизонтальном положении опустить в расплав серы со скоростью 1 мм/с и выдержать в расплаве до прекращения выделения из круга пузырьков воздуха. После чего круг быстро извлечь из ванны и охладить на воздухе.

2.1.4. Охлаждение круга после пропитывания

При охлаждении необходимо 2 – 3 раза перевернуть круг для равномерного распределения импрегнатора.

2.1.5. Контроль качества

После охлаждения круга провести визуальный осмотр, измерить твердость круга, проверить прочность на разрыв вращением, затем круг замаркировать.

3. Техника безопасности

Приготовление расплава серы и пропитывания кругов производить только при наличии местной вытяжной вентиляции, в брезентовых рукавицах и защитных очках.

V. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОЗАКАЛКИ ИНСТРУМЕНТА НА ПРИМЕРЕ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА 1 125х25х32 24AF60K6V

В качестве нагревательного устройства выбирается камерная печь, отапливаемая природным газом. Начальная температура инструмента равна $T_н$ = 20 ^{o} С, а температура нагрева $T_{нагр}$ = 500 ^{o}С. Круги размещены вертикально с зазором b = 0,01 м. Примем, что температура печных газов превышает конечную температуру нагрева кругов на 50 ^{o}С, тогда $T_{печ}$ = 500 + 50 = 550 ^{o}С.

Для выбранного нагревательного устройства суммарный коэффициент теплоотдачи

$$h_{\sum} = 0{,}092\left(\frac{T_{печ}}{100}\right)^3 = 0{,}092 \cdot 166{,}4 = 15{,}3 \text{ Вт/(м}^2\cdot{}^o\text{С)}.$$

При определении числа Био (Bi) примем, что коэффициент теплопроводности λ шлифовальных кругов изменяется в пределах 2,2 – 2,4 Вт/(м^2·^{o}С) [1], а их плотность ρ – 1,8 – 2,2 г/см^3, тогда

$$Bi = \frac{h_{\sum} H}{2\lambda} = 15{,}3 \cdot 0{,}025 / 2 \cdot 2{,}2 = 0{,}087.$$

Для расчета продолжительности нагрева круга воспользуемся формулой для термически тонкого тела ($Bi \le 0{,}25$), принимая, что теплоемкость С = 800 Дж / (кг·^{o}С).

$$\tau_н = \left(\frac{0{,}5H \cdot c \cdot \rho}{k_1 \cdot h_{\sum}}\right) \ln\left[\frac{(T_{печ} - T_{нач})}{(T_{нач} - T_{нарг})}\right] =$$

$$= \frac{0{,}5 \cdot 0{,}025 \cdot 800 \cdot 2000}{2 \cdot 15{,}3} \ln\left[\frac{(550 - 20)}{(550 - 500)}\right] = 1543 \text{ с} = 25{,}7 \text{ мин}.$$

Учитывая, что шлифовальные круги размещены с зазором относительно друг друга, вычисленную продолжительность нагрева $\tau_н$ умножим на коэффициент k_τ, который для рассматриваемого случая:

$$k_\tau = 1{,}75 - 0{,}24 \ln\left[\frac{b}{(0{,}1H)}\right] = 1{,}75 - 0{,}24 \ln\left[\frac{0{,}01}{(0{,}1 \cdot 0{,}025)}\right] = 1{,}42,$$

тогда продолжительность нагрева или охлаждения

$$\tau_{\text{н.о.}} = 25{,}7 \cdot 1{,}42 = 36{,}5 \text{ мин.}$$

Время выдержки кругов в нагревательном устройстве для удаления адсорбционной влаги вычислим по формуле:

$$\tau_{\text{выд}} = 13{,}1 d_n^{-0{,}32} = 13{,}1 \cdot 0{,}22^{-0{,}32} = 21{,}1 \text{ мин.}$$

Размер пор d_n определялся по уравнению (2.92).

На рис. 1.2 показана диаграмма режима закалки инструмента.

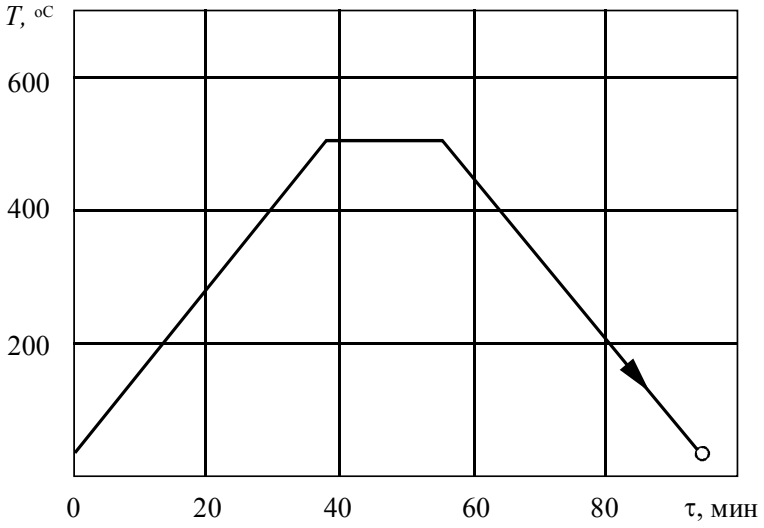


Рис. 1.2. График нагрева и охлаждения инструмента:

▲ – температура начала импрегнирования расплавом серы (T = 145 °С);

о – температура консервации инструмента (T = 40 – 50 °С)

Общая продолжительность термообработки при закалке заданного шлифовального круга составит

$$\tau = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_0 = 36{,}5 + 21{,}1 + 36{,}5 = 94{,}1 \text{ мин.}$$

Таблица 1.7

Обозначение зернистостей шлифовальных материалов

по ГОСТ 3647—80 и ИСО 8486—86

ГОСТ 3647–80		ИСО 8486–86	
Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм
–	–	8	2800...2360
200	2500...2000	10	2360...2000
160	2000...1600	12	2000... 1700
–	–	14	1700...1400
125	1600...1250	16	1400...1180
100	1250...1000	20	1180...1000
80	1000...800	24	850...710
63	800...630	30	710...600
50	630...500	35	600...500
40	500...400	46	425...355
32	400...320	54	355...300
25	320...250	60	300...250
20	250...200	70	250...212
16	200...160	80	212...180
–	–	90	180...150
12	160...125	100	150...125
10	125...100	120	125...106
8	100...80	150	106...65
6	80...63	180	90...63
5	63...50	220	75...53

Таблица 1.8

Зерновой состав шлифзерна

Зернистость	Размер стороны ячейки сита в свету, мкм			
	Крупная фракция, не более 20 (15)%	Основная фракция, не менее 45 (55) %	Комплексная фракция, не менее 90 (95) %	Мелкая фракция, не более 3 (2) %
200	2500	2000	2500; 2000; 1600	1250
160	2000	1600	2000; 1600; 1250	1000
125	1600	1250	1600; 1250; 1000	800
100	1250	1000	1250; 1000; 800	630
80	1000	800	1000;800; 630	500
63	800	630	800; 630; 500	400
50	630	500	630; 500; 400	315
40	500	400	500; 400; 315	250
32	400	315	400; 315; 250	200
25	315	250	31 5; 250; 200	160
20	250	200	250; 200; 160	125
16	200	160	200; 160; 125	100

Таблица 1.9

Индекс качества шлифовального материала

Индекс	Минимальное содержание основной фракции, %, для зернистостей				
	200...8	6…4	М63...М28	М20...М14	М10...М5
В (высшее)	–	–	60	60	55
П (повышенное)	55	55	50	50	45
Н (нормальное)	45	40	45	40	40
Д (допустимое)	41	–	43	39	39

Таблица 1.10

Выбор зернистости в зависимости от шероховатости обработанной поверхности и метода шлифования

R_a, мкм	Зернистость при шлифовании	
	с осевой подачей	методом врезания
4,0.. 1,25	80, 63, 50	40, 32, 25
1,25...0,63	40, 32, 25	25,20, 16
0,63...0,30	25,20,16	12,10,8
0,30...0,16	16, 12, 10	6...М28
0,16...0,10	10,8...М28	–
0,10...0,05	М28...М14	–

Таблица 1.11

Выбор твердости шлифовального круга

Вид обработки	Твердость
Правка абразивных инструментов	ВТ1-ЧТ2
Шлифование шариков шарикоподшипников и деталей часовых механизмов	
Обдирочные операции, ведущиеся вручную (обработка крупных отливок и поковок)	СТ2-Т2
Прорезка канавок, круглое наружное шлифование методом врезания при необходимости сохранить профиль круга (например, обработка шеек коленчатых валов), бесцентровое шлифование ведущими кругами, резьбошлифование с шагом 0,5...1,0 мм	
Резьбошлифование кругами на бакелитовой связке, профильное шлифование. обработка прерывистых поверхностей	С2-СТ2
Плоское шлифование сегментами и кольцевыми кругами на бакелитовой связке, внутреннее шлифование, резьбошлифование с шагом 1,0…1,5	С1-СТ1
Резьбошлифование деталей с крупным шагом	СМ1-С2
Заточка режущих инструментов вручную	С1-С2
Заточка режущих инструментов с механической или автоматической подачей	СМ1-СМ2
Заточка и доводка режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом, шлифование труднообрабатываемых специальных сплавов	М2-СМ1

Продолжение табл. 1.11

Вид обработки	Твердость
Круглое наружное – врезанием; – с продольной подачей	 СМ2-С2 СМ2-С1
Бесцентровое: – врезанием; – с продольной подачей	 С2-СТ1 С1-С2
Внутреннее	С1-С2
Плоское: – периферией круга; – торцом круга	 М3-СМ1 М2-СМ1

Таблица 1.12

Рекомендации по выбору структуры абразивного инструмента

Вид обработки	Номер структуры
Профильное шлифование, при необходимости сохранить профиль круга, шлифование при больших, а также переменных нагрузках, отрезка	3...4
Круглое наружное шлифование, бесцентровое шлифование, плоское шлифование периферией круга и заточка инструмента	5...6
Плоское шлифование торцом круга, внутреннее шлифование	7...9
Шлифование и заточка инструмента	8...10
Резьбошлифование мелкозернистыми кругами, глубинное шлифование	8...12

Таблица 1.13

Выбор связки

Вид обработки	Связка
Все виды шлифования, кроме обдирки, отрезки и прорезки узких пазов, плоского шлифования сегментными кругами и шлифования желобов колец шарикоподшипников	К
Обдирочное шлифование, отрезка и прорезка пазов, шлифование ручными машинками, обработка хрупких материалов, шлифование в целях снижения вероятности образования шлифовочных прижогов и трещин, заточка инструментов, отделочное шлифование цилиндров, кулачков и роликов мелкозернистыми инструментами	Б

Продолжение табл. 1.13

Вид обработки	Связка
Отрезка, прорезка и шлифование пазов, обработка сферических поверхностей, чистовые операции при других видах профильного шлифования, бесцентровое шлифование (ведущие круги), отделочное шлифование и полирование гибкими кругами	В
Полирование ($R_a < 0{,}1$ мкм), финишное шлифование магнитных сплавов	Г
Шлифование алюминиевых и медных сплавов, печатных плат, резины, полимеров	Э

Таблица 1.14

Рекомендации по применению абразивных материалов на операциях шлифования

Обрабатываемый материал	Электрокорунд		Карбид кремния	Эльбор	Алмаз
	нормальный	белый			
Сталь незакаленная низколегированная	+				
Стали закаленные углеродистые и легированные: – черновое шлифование; – чистовое шлифование	+	+ +		+ +	
Сталь коррозионностойкая: – незакаленная; – закаленная		+ +		+ +	
Стали закаленные: инструментальные, коррозионностойкие, азотированные, подшипниковые, жаропрочные		+		+	
Титановые сплавы			+	+	+
Цветные сплавы на основе меди и алюминия			+		
Твердые сплавы, чугуны, ферриты, магнитные сплавы, резина, полимеры, стекло, керамика			+		+

Разработчики:

_____ Шумячер В.М. __
(подпись) (инициалы, фамилия)

_____ Крюков С.А._____
(подпись) (инициалы, фамилия)

_____ Байдакова Н.В._____
(подпись) (инициалы, фамилия)

ПРИЛОЖЕНИЕ П.3

ТЕХНИЧЕСКИЕ АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ОТЗЫВЫ ПРЕДПРИЯТИЙ

Утверждаю
Руководитель предприятия
ООО «ИНФ-АБРАЗИВ»
_____М.А.Шарабаев

" 23 " мая 2015 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

" 23 " мая 2015 г.

Технологический регламент проектирования и изготовления шлифовальных кругов для высокоэффективной обработки, принят к внедрению в проектно-технологической службе ООО «ИНФ-АБРАЗИВ»

Директор
ООО «ИНФ-АБРАЗИВ»
_____Шарабаев М.А.
«23» мая 2015 г.

Разработчики:
д.т.н., проф. _____Шумячер В.М.
к.т.н., доцент _____Крюков С. А.
к.т.н., доцент _____Байдакова Н.В.
" 23 " мая 2015 г.

Утверждаю
Исполнительный директор
ОАО «УК ЕПК»
_____А.А.Копецкий
«23» мая 201 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

«23» мая 201 г.

Технологический регламент проектирования и изготовления шлифовальных кругов для высокоэффективной обработки, принят к внедрению в проектно-технологической службе ОАО «УК ЕПК»

Разработчики д.т.н., проф. _____ Шумячер В.М.
к.т.н., доцент _____ Крюков С. А.
к.т.н., доцент _____ Байдакова Н.В.

«23» мая 201 г.

epk ОАО «ЕПК Волжский»

ОАО «ЕПК Волжский»
404112, Россия, Волгоградская обл.,
г. Волжский, ул. Пушкина, 45

Тел./факс: (8443) 25 69 96
E-mail: vpz@vpz.ru
www.epkgroup.ru

«18» мая 2017 г. №01-192
На № _____ от «____»_____20___ г.

ОТЗЫВ

На работу: Разработка современных наукоемких технологий производства конкурентоспособного импортозамещающего отечественного абразивного инструмента для шлифования труднообрабатываемых сплавов и композитов

Заявленный проект является весьма актуальной работой сотрудников Волжского политехнического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета во главе с д.т.н., проф. Шумячером В.М., к.т.н, доц Крюковым и к.т.н., доц. Байдаковой Н.В.

С этим коллективом ученых наше предприятие имеет давние связи и большой опыт совместного сотрудничества в области обеспечения производства современными, отечественными технологиями в области абразивного инструмента и технологий обработки деталей.

Современные условия конкурентной, рыночной борьбы на рынке сбыта требуют от производителей продукции новых, нестандартных решений. Такую возможность представляет нам наука. Замена импортного абразивного инструмента отечественными, модернизированными аналогами, не уступающими по техническим характеристикам и значительно более дешевыми по цене, позволяют иметь нам выгодные преимущества по сравнению с конкурентами.

Однако зачастую производитель ограничен характеристиками ГОСТов. Уникальность разработок авторского коллектива ученых ВПИ заключается в изыскании внутренних резервов в известных отечественных инструментах и вывода их на принципиально новый уровень.

Авторы работы: д.т.н., проф. Шумячер В.М., к.т.н, доц Крюков и к.т.н., доц. Байдакова Н.В. достойны участия в конкурсе на соискание премий Волгоградской области в сфере науки и техники, по номинации 1 и присуждения им главной премии.

Исполнительный директор
ОАО «УК ЕПК» А.А. Копецкий

Р/с 40702810311160003637 в Волжском отделении
Волгоградского ОСБ № 8621 ОАО «Сбербанк России»
к/с 30101810100000000647 БИК 041806647
ИНН 3435052024 КПП 345250001 ОКПО 22445381
ОКТМО 18710000 ОГРН 1023402005582
Исполнительный директор ОАО «Управляющая компания ЕПК» -
Копецкий Андрей Александрович

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие ISO/TS 16949:2009 и ISO 9001:2008

ОТЗЫВ

На работу: «Разработка современных наукоемких технологий производства конкурентоспособного импортозамещающего отечественного абразивного инструмента для шлифования труднообрабатываемых сплавов и композитов».

Начиная с 80-х годов прошлого столетия, отечественная абразивная отрасль находится в тяжелом положении. Закрыта сеть всесоюзных научно-исследовательских институтов абразивов и шлифования, перестала существовать отдельно абразивная отрасль, как сфера народного хозяйства, происходит выдавливание отечественного инструмента, замена его импортным. В таких сложных условиях приходится существовать сегодня отечественным производителям абразивного инструмента.

Для нашего предприятия сотрудничество с коллективом ученых ВПИ (филиала) ВолгГТУ, первого опорного регионального университета Волгоградской области является жизненно необходимым. Производство современного импортозамещающего инструмента невозможно без сплава науки и производства. Разработки проф. Шумячера В.М., Крюкова С.А., Байдаковой Н.В., являются весьма актуальными. Реализуемый ими проект разработка современных наукоемких технологий производства конкурентоспособного импортозамещающего отечественного абразивного инструмента для шлифования труднообрабатываемых сплавов и композитов, дает возможность использую отечественные материалы, оборудование и государственную нормативную базу создавать инструмент для высокоэффективной обработки различных труднообрабатываемых деталей в авиационной, подшипниковой, машиностроительной и др. отраслях.

Опыт сотрудничества с вышеперечисленным коллективом ученых позволяет с уверенность говорить о достойности их участия в конкурсе на соискание премий Волгоградской области в сфере науки и техники, и присуждения им главной премии.

Директор
ООО "ИНФ-АБРАЗИВ" к.т.н., Шарабаев Максим Александрович

Общество с ограниченной ответственностью "ИНФ-АБРАЗИВ" Российская Федерация г. Волжский Волгоградской области

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер ОАО ВПЗ-15
_____ В.В.ЛЫТОВ
«17» января 2000 г.

ОАО ВПЗ-15

А К Т

производственных испытаний опытных шлифовальных кругов в ЦПК-I

Цель испытаний: определение эксплуатационных свойств шлифовальных кругов, импрегнированных серой по предлагаемой технологии.

Условия испытаний:

1. Операция: шлифование упорного борта внутреннего кольца подшипника 7909 КI;
2. Оборудование: бортикошлифовальный станок модели XIII – 285;
3. Режимы шлифования: по действующей технологии;
4. СОЖ: водный раствор кальцинированной соды (0,8 … 1,2 %) с нитритом натрия (0,2 … 0,3 %);
5. Правка кругов осуществлялась алмазом в оправе;
6. Шлифовальные круги ПП 350х8х127 25А116СМ2К6Б
   - пропитанные серой по заводской технологии;
   - пропитанные серой по предлагаемой технологии.

Контролируемые параметры:

1. Наличие ожогов;
2. Шероховатость поверхности;
3. Стойкость кругов до полного износа по количеству колец.

Результаты испытаний

Было испытано 20 шт. опытных кругов, пропитанных серой по предлагаемой технологии.

Получены следующие данные:

1. По наличию ожогов:

а) круги, пропитанные серой по заводской технологии, дают 32 % колец без ожогов и 68 % колец имеют штриховые ожоги;

б) круги, пропитанные серой по предлагаемой технологии – 80 % - без ожогов и 20% - штриховые ожоги.

2.Шероховатость поверхности борта уменьшается в 1,27 раза по сравнению с заводскими кругами.

3. По стойкости кругов:

а) круги, пропитанные серой по заводской технологии – 2530 шт. колец;

б) круги, пропитанные серой по предлагаемой технологии – 3490 шт. колец.

Выводы:

1. Опытные шлифовальные круги, пропитанные серой по предлагаемой технологии, ликвидируют прижоги 80 % шлифуемых изделий и значительно снижают до штриховых у 20 %. Одновременно с этим обеспечивают необходимые требования по шероховатости обработанной поверхности кольца согласно ТУ.

2. Стойкость опытных кругов примерно в 1,4 раза выше применяемых в цехе.

Зам. гл. технолога завода В.И. Степанов

Начальник ЦКП-I В.Е. Гамолин

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер ВМЗ
А.И.Попов
20.09.1999г

А К Т

производственных испытаний опытных кругов, импрегнированных серой по технологии ВолжскИСИ на операции заточки инструмента

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт в том, что в цехе режущих инструментов проведена работа по испытанию опытных шлифовальных кругов на операции заточки фрез из быстрорежущей стали.

Условия проведения испытаний

1. Операция - заточка передней грани зубьев червячных и резьбовых фрез.
2. Материал - сталь марки Р6М5 HRc - 63 ÷ 65.
3. Станок - М 3662 инв. № 3143.
4. Охлаждение - всухую.
5. Шлифовальные круги 4П 200х16х32 25А 25 СМ2 К 6, пропитанные серой по технологии ВолжскИСИ.

Режимы шлифования:

V кр. = 24 м/с; V дет.= 6 м/мин; общий припуск - 1,7 ÷ 2,5 мм; черновой припуск - 1,50 ÷ 2,25 мм; чистовой припуск - 0,20 ÷ ÷ 0,25 мм; черновая подача - 0,01 мм.

Правка круга производилась алмазным карандашом марки С1 по мере затупления шлифовального круга.

Результаты испытаний

1. Стойкость шлифовального круга до полного износа:
   а) неимпрегнированного (применяемого в цехе) 8 фрез;

б) импрегнированного серой (опытного) . . . . . 15 фрез

2. Стойкость шлифовального круга между правками:
   а) неимпрегнированного . . . . . .4 ÷ 5 правок на фрезу;
   б) импрегнированного серой . . . . . 2 ÷3 правки на фрезу
3. Шероховатость шлифовальной поверхности:
   а) неимпрегнированного . . . . . 7б ÷ 7в;
   б) импрегнированного серой . . . . . 7в ÷ 8а
4. На принятых режимах видимые прижоги на шлифованной поверхности отсутствовали.

Выводы:

1. Шлифовальные круги, импрегнированные серой по технологии ВолжскИСИ обеспечивают повышение стойкости до полного износа в среднем на 87 %.
2. Улучшают качество шлифованной поверхности на один разряд.
3. Ликвидируют прижоги на принятых режимах обработки.
4. Увеличивают производительность обработки фрез примерно в 1,2 раза.

Главный технолог В.А.Иванов

Начальник ЦРИ Н.И.Назаренко

Представитель ВолжскИСИ С.А.Крюков

УТВЕРЖДАЮ

директор ООО «НПКО «Маштехсервис»»
Мироседи И.Г

2012 г.

АКТ

Производственных испытаний опытных шлифкругов
ЧК150х50х32 63С25/24А25М36К10 (пат.2354534 Р.Ф.)

Испытания опытных шлифовальных кругов проводились с целью определения стойкости и качества обрабатываемой поверхности.

Испытания проводились на универсальном заточном станке модели 3В642 при заточке в сухую токарных резцов из сплава Р6М5.

Режимы шлифования:

Скорость шлифкруга	25 м/с
Скорость продольной подачи	0,6÷3,0 м/мин
Поперечная подача	0,02÷0,07 мм/дв.х

Правка шлифкругов, по мере затупления, проводилась в ручную с помощью брусков из карбида кремния.

В результате испытаний установлено, что опытные круги по сравнению с серийными имеют более высокую стойкость – на 30-45% ,снижают шероховатость обработанной поверхности резцов на 1-2 разряда и ликвидируют полностью прижоги.

Техн. Директор Мироседи Е.И

«30» января 2012 г.

Представители ВИСТех
к.т.н., доц. Крюков С.А.

инженер Гусельников Д.А.

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель предприятия
ООО «ВОЛГА ТАЙР»
Ген. директор Новгородов Д.А.

«08» февраля 2013 г.

АКТ

О внедрении высокопористых шлифовальных кругов закрытой пористостью.

Настоящий акт составлен в том, что на предприятии ООО «ВОЛГА ТАЙР» была проведена работа по внедрению новых модифицированных высокопористых инструментов. На операциях переработки резиновых изделий методом абразивного истирания. До внедрения на предприятии для получения мелкодисперсного порошка резины использовался криогенный метод. При всех достоинствах низкотемпературной технологии измельчения резины следует отметить её высокую стоимость и низкую технологичность.

После проведения сравнительных испытаний новых высокопористых инструментов в производственных условиях предприятия было установлено:

1. Переработка резиновых изделий методом абразивного истирания высокопористым инструментом позволяет получать резиновые крошки с заданным размером частиц. Регуляция этих размеров частиц осуществляется путем использования инструментов разной зернистости.
2. Производительность процессов переработки повысилась в 1,5÷2,0 раза, а энергоемкость снизилась – в 3,5-4,0 раза, что дает экономический эффект в размере 356 тыс. руб. в год.

От предприятия
директор по
развитию Харин Е.А. _____

Представители ВИСТех
к.т.н., доц.каф. ТМС Крюков С.А. _____
инженер лаборатории ОВТ Шепелев И.В. _____

Российская Федерация
Волгоградской области
Открытое акционерное
общество
«Волжский абразивный завод»
Адрес: 404130, Волгоградская область,
г.Волжский, тел.: 42-10-12
№ 06-1032 12 05 00
на № _____ от _____

Ректору ВолжскИСИ
проф.Шумячеру В.М.

Сообщаем Вам, что представленные аспирантом Крюковым С.А. рекомендации по организации на нашем заводе постов консервации и импрегнирования серой шлифовальных кругов, разработанных на основе научно-обоснованных технологических принципах управления свойствами абразивного инструмента, приняты к использованию.

По данным рекомендациям на заводе приступили к проработке конструкторско-технологической документации и мероприятий по изготовлению импрегнированного инструмента на принципе совмещения операции охлаждения инструмента после обжига с процессом пропитывания его на этой стадии расплавом серы.

Гл.инженер
ОАО "ВАЗ"

Российская Федерация * Открытое акционерное общество * Волжский Абразивный Завод * Волжский Волгоградской обл.
ХОЗ. ОТДЕЛ

В.Ф.Холоденко

12.05.00

epk ВОЛЖСКИЙ ПОДШИПНИКОВЫЙ ЗАВОД

ОАО «ВПЗ» 404112, Россия, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. Пушкина, 45	404112, Russia, Volgograd Region, Volzhsky, 45 Pushkin Street	Тел./факс, tel./fax: (8443) 25 69 96 факс/fax: (8443) 25 30 04 E-mail: vpz@vpz.ru www.epkgroup.ru

01/64
от 02.05.12г.

Ректору ВИСиТ

Шумячеру В.М.

ОТЗЫВ

На модифицированный абразивный инструмент, изготовленный по технологии Волжского института строительства и технологий (ВИСТех)

На предприятии ОАО «Волжский подшипниковый завод» в качестве производственных испытаний проходил проверку абразивный инструмент, разработанный на основе патентов № 2262434; № 2354534; 2301737, а также в рамках производственных испытаний диссертационной работы на тему «Совершенствование процесса шлифования путем стабилизации структурно-механических свойств абразивного инструмента».

ОАО «Волжский подшипниковый завод» применял модернизированный инструмент, изготовленный по патентам ВИСТех, как опытный в своем производстве при обработке деталей подшипников на операциях предварительного и окончательного шлифования отверстий, дорожек качения, диаметра борта наружных и внутренних колец подшипников.

Испытание модифицированного абразивного инструмента в производственных условиях ОАО «Волжский подшипниковый завод» показали следующие результаты: производительность шлифования колец подшипника увеличивается в 1,5-1,6 раза, шероховатость (Ra) поверхности изделия уменьшается примерно в 1,4 раза, стойкость испытанных шлифовальных кругов повышается на 30-40% по сравнению с серийно выпускаемыми кругами.

Шлифовальные круги изготовленные по технологии ВИСТех отличаются стабильностью свойств (равномерная твердость, дисбаланс, стойкость) и качества изделий.

Абразивные круги изготовленные по технологии ВИСТех соответствуют требованиям ОАО «Волжский подшипниковый завод», предъявляемым к абразивной продукции.

Исполнительный директор ОАО «УК ЕПК» **А.А.Копецкий**

ПРИЛОЖЕНИЕ П.4

ПАТЕНТЫ

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ
к патенту Российской Федерации

RU 2164857 C2

1

(21) 99102863/02 (22) 15.02.1999
(24) 15.02.1999
(43) 27.12.2000, бюл. № 36
(46) 10.04.2001 Бюл. № 10
(72) Шумячер В.М., Анохин В.И., Крюков С.А.
(71) (73) Государственное учреждение высшего профессионального образования Волжский инженерно-строительный институт Волгоградской государственной архитектурно-строительной академии
(56) SU 422577, 05.04.1974. SU 366963, 16.01.1973. SU 642144, 15.01.1979. SU 1313679 A2, 30.05.1987.
Адрес для переписки: 404130, Волгоградская обл., г. Волжский, пр. Ленина 72, ВолжскИСИ, Шумячеру В.М.

2

(54) СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

(57) Изобретение относится к производству и эксплуатации мелкозернистого абразивного инструмента на керамической связке. Способ заключается в нагреве, выдержке и охлаждении инструмента. После охлаждения ведут пропитку инструмента гидрофобным импрегнатором. Охлаждение производят на воздухе до температуры технологической среды импрегнатора. Изобретение позволяет улучшить равномерность и полноту пропитки абразивного инструмента, сохранить прочностные качества абразивного зерна, а также позволяет применять при работе инструмента водные СОЖ. 3 табл.

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ
к патенту Российской Федерации

RU 2215643 C2

1

(21) 2001114887/02 (22) 30.05.2001
(24) 30.05.2001
(46) 10.11.2003 Бюл. № 31
(72) Шумячер В.М., Назаренко В.А., Крюков С.А., Дуличенко И.В.
(71) (73) Волгоградская государственная архитектурно-строительная академия
(56) SU 1073082 A, 15.02.1984. SU 1583274 A1, 07.08.1990. RU 2041052 C1, 09.08.1995. DE 2604482, 11.08.1977.
Адрес для переписки: 404111, Волгоградская обл., г. Волжский, пр. Ленина, 72, ВолжскИСИ филиал ВолгГАСА

(54) АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

(57) Изобретение относится к области абразивной обработки и может быть использовано при производстве высокопористого абразивного инструмента. Абразивный инструмент содержит электрокорундовые абразивные зерна, керамическую связку и частицы абразивного огнеупорного наполнителя. Последние выполнены из адгезионно-инертного материала к керамической связке и имеют равный размер и одинаковую форму с абразивными зернами. Отношение объема частиц наполнителя к объему абразивных зерен находится в пределах 0,10 - 0,15. Такое техническое решение сохраняет прочность и пористость инструмента в пределах заданной его структуры, увеличивает поровое пространство между абразивными зернами на рабочей поверхности инструмента непосредственно в процессе шлифования и улучшает равномерность и однородность структуры инструмента при изготовлении. 1 табл.

2

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2004110458/02, 06.04.2004

(24) Дата начала действия патента: 06.04.2004

(45) Опубликовано: 20.10.2005 Бюл. № 29

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 1526968 A1, 07.12.1989. SU 206349 A, 23.01.1968. RU 2152298 C1, 11.10.1999. WO 91/04136 A1, 04.04.1991.

Адрес для переписки:
404111, Волгоградская обл., г. Волжский, пр. Ленина, 72, ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, ректору

(72) Автор(ы):
Шумячер В.М. (RU),
Славин А.В. (RU),
Дуличенко И.В. (RU),
Крюков С.А. (RU)

(73) Патентообладатель(ли):
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ) (RU)

RU 2262434 C1

(54) МАССА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области производства абразивного инструмента, в частности обдирочного карбидкремниевого инструмента для обработки шлифовальных кругов. Масса для изготовления абразивного инструмента на керамической связке содержит смесь карбидкремниевых зерен не менее двух смежных зернистостей, водный раствор временного связующего и частицы абразивного огнеупорного наполнителя. Частицы наполнителя выполнены из адгезионно-активного материала к керамической связке и имеют размер 0,16-0,25 размера зерен карбида кремния по меньшей мере одной из его зернистостей. Отношение объемов частиц наполнителя по их размерам равно отношению объемов зерен карбида кремния смежных зернистостей при следующем соотношении компонентов массы, мас.%:

карбид кремния:	
зернистостью 100	40,8-43,6
зернистостью 63	18,4-19,8
электрокорунд белый:	
зернистостью 25	6,0-6,6
зернистостью 16	2,8-3,0
керамическая связка	23,0-27,0
водный раствор временного связующего	остальное

В результате повышается механическая прочность закрепления зерен карбида кремния в черепке инструмента с обеспечением высокого качества и производительности обработки. 1 табл.

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2005126370/02, 19.08.2005

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 19.08.2005

(43) Дата публикации заявки: 27.02.2007

(45) Опубликовано: 27.06.2007 Бюл. № 18

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 935260 A, 15.06.1982. SU 321513 A, 01.02.1972. SU 401652 A, 22.02.1974. SU 1379066 A1, 07.03.1988. CH 1039204 A, 31.01.1990.

Адрес для переписки:
404111, Волгоградская обл., г. Волжский, пр. Ленина, 72, ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, ректору В.М.Шумячеру

(72) Автор(ы):
Шумячер Вячеслав Михайлович (RU),
Славин Андрей Вячеславович (RU),
Дуличенко Игорь Викторович (RU),
Крюков Сергей Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ) (RU)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области абразивной обработки и может быть использовано при изготовлении, в частности шлифовальных кругов на органической связке. Перед смешиванием абразивных зерен со связкой осуществляют их предварительную обработку обеспыливанием в 3-4% водном растворе щелочи с промыванием проточной водой. Затем производят нагрев зерен до 450-500°С, выдержку 10-20 мин и охлаждение на воздухе до температуры технологического процесса смешивания. После смешивания абразивных зерен со связкой прессуют формовочную смесь, нагревают, бакелизуют и охлаждают инструмент. Такие действия способствуют улучшению прочностных характеристик абразивных зерен и смачивания их жидким бакелитом, равномерности смешивания со связкой, что обеспечивает повышение качества инструмента, его режущей способности и стойкости. 1 табл.

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21), (22) Заявка: **2007122815/02, 18.06.2007**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.06.2007

(45) Опубликовано: **10.05.2009** Бюл. № 13

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2262434 C1, 20.10.2005. RU 2267395 C2, 10.01.2006. SU 206349 A, 23.01.1968. RU 2121427 C1, 10.11.1998.**

Адрес для переписки:
404111, Волгоградская обл., г. Волжский, пр. Ленина, 72, ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, ректору

(72) Автор(ы):
Шумячер Вячеслав Михайлович (RU),
Славин Андрей Вячеславович (RU),
Крюков Сергей Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ) (RU)

RU 2354534 C2

(54) МАССА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области абразивной обработки и может быть использовано при изготовлении обдирочного инструмента для обработки шлифовальных кругов. Масса содержит карбидкремниевые зерна и частицы абразивного огнеупорного наполнителя, адгезионно-активного к керамической связке. Карбидкремниевые зерна использованы изометричной формы. Частицы абразивного огнеупорного наполнителя выполнены пластинчатой и игольчатой формы. Содержание основных фракций карбидкремниевых зерен и частиц абразивного огнеупорного наполнителя по размерам составляет не менее 60%. В результате масса имеет равномерное распределение абразивных зерен с повышенной прочностью мостиков связки и закрепления абразивных зерен, что способствует повышению качества инструмента, уменьшению разновысотности профиля рабочей поверхности и его дисбаланса. 1 табл.

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21), (22) Заявка: **2007122816/02, 18.06.2007**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.06.2007

(45) Опубликовано: **20.04.2009** Бюл. № 11

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 1222521 A, 07.04.1986. SU 833437 A, 30.05.1981. SU 825310 A, 30.04.1981. US 3341355 A, 12.09.1967.**

Адрес для переписки:
404111, Волгоградская обл., г. Волжский, пр. Ленина, 72, ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, ректору

(72) Автор(ы):
Шумячер Вячеслав Михайлович (RU),
Крюков Сергей Анатольевич (RU),
Славин Андрей Вячеславович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ) (RU)

RU 2352451 C1

(54) СПОСОБ ПРОПИТКИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области абразивной обработки и может быть использовано при изготовлении абразивных инструментов. В пропиточную камеру с расплавом серы вводят добавку стабилизатора структуры серы в количестве 2-5% по массе. Погружают абразивный инструмент в камеру. После его пропитки поднимают температуру расплава в камере до 180-190°С и выдерживают 20-30 мин. Затем инструмент извлекают из камеры и быстро охлаждают со скоростью 30-40°С/мин. В результате повышается качество пропитки, снижается энергоемкость процесса и повышается его производительность.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 354 535** (13) **C2**

(51) МПК
B24D 3/34 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: **2007111229/02, 27.03.2007**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.03.2007

(43) Дата публикации заявки: **10.10.2008**

(45) Опубликовано: **10.05.2009 Бюл. № 13**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 1222521 A, 07.04.1986. SU 1355471 A1, 30.11.1987. SU 1191273 A1, 15.11.1985. US 3341355 A, 12.09.1967.**

Адрес для переписки:
404111, Волгоградская обл., г. Волжский, пр. Ленина, 72, ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, ректору

(72) Автор(ы):
Шумячер Вячеслав Михайлович (RU),
Славин Андрей Вячеславович (RU),
Крюков Сергей Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ) (RU)

RU 2354535 C2

(54) СПОСОБ ПРОПИТКИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области абразивной обработки и может быть использовано при изготовлении крупного и высокопористого абразивного инструмента. Последний погружают в пропиточную камеру с раствором или расплавом импрегнатора, в который вводят ферромагнитные частицы размером 5-20 мкм в количестве 15-30% от объема импрегнатора. А в момент извлечения инструмента из камеры с импрегнатором и во время сушки или охлаждения подвергают его воздействию внешним магнитным полем до отверждения импрегнатора в порах инструмента. В результате повышаются качество пропитки, производительность процесса, прочность инструмента и его теплопроводность, а также снижается энергоемкость процесса.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 175 492 (13) U1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
B24D 3/14 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 17.01.2018)
Пошлина: учтена за 1 год с 13.03.2017 по 13.03.2018

(21)(22) Заявка: 2017108264, 13.03.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.03.2017

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **13.03.2017**

(45) Опубликовано: 06.12.2017 Бюл. № 34

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2215643 C2, 10.11.2003. RU 59473 U1, 27.12.2006. RU 2468907 C1, 10.12.2012. US 6197076 B1, 06.03.2001.**

Адрес для переписки:
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, ВолгГТУ, отдел интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
Шумячер Вячеслав Михайлович (RU),
Крюков Сергей Анатольевич (RU),
Славин Андрей Вячеславович (RU),
Кулик Ольга Геннадьевна (RU),
Ткач Максим Александрович (RU),
Крюкова Аксинья Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ) (RU)

(54) АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области производства абразивного инструмента, в частности высокопористого электрокорундового инструмента на керамической связке. Технический результат достигается в абразивном инструменте, содержащем электрокорундовые абразивные зерна, керамическую связку и частицы карбида бора одинаковой формы в качестве порообразующего огнеупорного наполнителя, при этом частицы карбида бора выполнены изометрической формы с обкатанной поверхностью и размером 0,35÷0,45 размера абразивных зерен. Техническим результатом является повышение стойкости и производительности инструмента.

ПРИЛОЖЕНИЕ П.5

ДИПЛОМЫ

DIPLÔME

SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS GENÈVE

Après examen le Jury International a décidé

de remettre à: V.SHUMIACHER,A.SLAVIN,I.DULICHENKO,S.KRUIKOV

pour l'invention: Masse pour la fabrication d'un outil d'abrasion

UNE MEDAILLE D´ARGENT

Genève, le 7 avril 2006

Le Président du Jury

Le Président du Comité d'Organisation du Salon

Seoul International Invention Fair 2010

SPECIAL AWARD

Certificate of Achievement

Presented in recognition of an invention with potential to significantly enhance home living.

Product:

Method of making abrasive tool

Recipient:

SHUMYACHER VYACHESLAV, SLAVIN ANDREY, KRUKOV SERGEY, DULICHENKO IGOR

Tsung-Tai Chen

Taiwan Invention Association
Chairman: **Tsung-Tai Chen**
December 04, 2010

KOREA INVENTION PROMOTION ASSOCIATION

SIIF 2010 Seoul International Invention Fair 2010

Gold Prize

presented to

SHUMYACHER VYACHESLAV, SLAVIN ANDREY, KRUKOV SERGEY

from RUSSIA

in recognition of excellent and creative efforts to invent

THE MASS FOR MAKING OF AN ABRASIVE TOOL

exhibited at the
Seoul International Invention Fair 2010
organized by the
Korea Invention Promotion Association
in Seoul, KOREA
December 2 - 5, 2010

Choi Jong-hyub

President
Korea Invention Promotion Association

MINISTRY OF SCIENCE, TECHNOLOGY & INNOVATION

ITEX 12 MALAYSIA
23rd INTERNATIONAL INVENTION, INNOVATION AND TECHNOLOGY EXHIBITION
UNDER THE PATRONAGE OF THE MINISTER OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION

SILVER JUBILEE MINDS 2012

Certificate of Award

This is to certify that

SHUMYACHER VYACHESLAV, SLAVIN ANDREY, KRYUKOV SERGEY, DULICHENKO IGOR

has been awarded the

ITEX GOLD MEDAL

for the invention

METHOD OF PRODUCING ABRASIVE TOOL ON RESIN BOND

at the

23rd International Invention, Innovation & Technology Exhibition
ITEX 2012
Kuala Lumpur, Malaysia
17th – 19th May 2012

Academician Emeritus Professor Tan Sri Datuk
Dr Augustine Ong Soon Hock
President
Malaysian Invention and Design Society

MINISTRY OF SCIENCE, TECHNOLOGY & INNOVATION

ITEX 12 MALAYSIA
23rd INTERNATIONAL INVENTION, INNOVATION AND TECHNOLOGY EXHIBITION
UNDER THE PATRONAGE OF THE MINISTER OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION

SILVER JUBILEE MINDS 2012

Certificate of Award

This is to certify that

SHUMYACHER VYACHESLAV, SLAVIN ANDREY, KRYUKOV SERGEY, DULICHENKO IGOR

has been awarded the

ITEX GOLD MEDAL

for the invention

HIGHLY STRONG STRIPPING TOOL

at the

23rd International Invention, Innovation & Technology Exhibition
ITEX 2012
Kuala Lumpur, Malaysia
17th – 19th May 2012

Academician Emeritus Professor Tan Sri Datuk
Dr Augustine Ong Soon Hock
President
Malaysian Invention and Design Society



ДИПЛОМ

ЛАУРЕАТА ПРЕМИИ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В СФЕРЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ

НАГРАЖДАЕТСЯ

КРЮКОВ
Сергей Анатольевич

за достижение в научных и технических исследованиях и опытно-конструкторских разработках, завершившихся применением в производстве новых технологий, техники, приборов, оборудования, материалов и веществ

Губернатор
Волгоградской области **А.И. Бочаров**

М.П.

Постановление Губернатора
Волгоградской области от 22 ноября 2017 г. № 774