

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ульяновский государственный технический университет»

УДК 621.923

На правах рукописи

САПУНОВ ВАЛЕРИЙ ВИКТОРОВИЧ



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА БАКЕЛИТОВОЙ СВЯЗКЕ С
ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Веткасов Николай Иванович
доктор технических наук, доцент

Ульяновск 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
Глава 1. Действующие и перспективные технологии изготовления абразивных инструментов на органических термореактивных связках. Цель и задачи исследований.....	11
1.1. Технологии изготовления абразивных инструментов на органических термореактивных связках.....	11
1.2. Термообработка полуфабрикатов АИ на ОТС.....	18
1.3. Наполнители связки, повышающие производительность и энергоэффективность операции термообработки полуфабрикатов абразивного инструмента на органических термореактивных связках и улучшающие его качество.....	33
1.3.1. Наполнители абразивных инструментов, используемые в абразивной промышленности.....	33
1.3.2. Наполнители, повышающие уровень диэлектрических потерь в процессе микроволновой термообработки полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке.....	35
1.3.3. Наполнители-адсорбенты для связывания летучих веществ при термообработке абразивных инструментов на бакелитовой связке.....	39
1.4. Влияние неравномерности микроволнового нагрева полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке на их качество и производительность процесса термообработки. Перспективные направления повышения равномерности микроволнового нагрева.....	44
1.5. Выводы. Цель и задачи исследования.....	50
Глава 2. Теоретические исследования влияния специальных наполнителей и термостатирования полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке на процесс их термообработки микроволновым излучением.....	54
2.1. Расчёт количества летучих веществ, выделяющихся при бакелизации	

полуфабрикатов абразивного инструмента на бакелитовой связке.....	54
2.1.1. Расчёт количества летучих веществ, выделяющихся при полимеризации фенольного порошкообразного связующего.....	54
2.1.2. Расчет количества летучих веществ, выделяющихся при полимеризации жидкого бакелита.....	56
2.1.3. Расчет количества летучих веществ при бакелизации полуфабрикатов шлифовальных кругов.....	57
2.1.4. Расчет количества наполнителей-сорбентов, необходимого для связывания паров воды при бакелизации АИ.....	58
2.2. Исследование влияния физических параметров и содержания в связке АИ радиопоглощающих наполнителей на допустимую скорость микроволнового нагрева полуфабрикатов.....	62
2.2.1. Нагрев полуфабрикатов АИ при однократном прохождении электромагнитной волны.....	62
2.2.2. Определение физических свойств полуфабрикатов АИ.....	72
2.2.3. Нагрев полуфабрикатов АИ с различными радиопоглощающими свойствами в одной СВЧ-камере.....	78
2.2.4. Процессы нагрева полуфабриката АИ (стопки полуфабрикатов) без радиопоглощающих наполнителей и с наполнителями в отдельных СВЧ –камерах.....	85
2.3. Моделирование распределения температур в стопке полуфабрикатов АИ при их микроволновом нагреве с использованием термостатирования.....	85
2.3.1. Математическое моделирование распределения температур в стопке полуфабрикатов АИ при их микроволновом нагреве.....	85
2.3.2. Численное моделирование распределения температур в стопке полуфабрикатов АИ при микроволновом нагреве.....	92
2.4. Выводы.....	100
Глава 3. Экспериментальные исследования влияния термостатирования полуфабрикатов и специальных наполнителей связки абразивных инструментов	

на их качество и производительность процесса микроволновой бакелизации.....	102
3.1. Методика экспериментальных исследований влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей связки абразивных инструментов и термостатирования полуфабрикатов на производительность процесса микроволновой бакелизации.....	102
3.1.1. Критерии оценки влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей связки, а также термостатирования полуфабрикатов на производительность операции бакелизации.....	102
3.1.2. Параметры, контролируемые при исследовании. Методы и средства измерения.....	103
3.1.3. Условия, техника эксперимента и порядок проведения исследования.....	104
3.1.4. Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов.....	113
3.1.5. Обработка результатов исследований и их анализ.....	114
3.2. Результаты экспериментального исследования.....	118
3.2.1. Экспериментальное исследование влияния адсорбирующих наполнителей связки на производительность бакелизации по воздействием микроволнового излучения.....	118
3.2.2. Экспериментальное исследование влияния радиопоглощающих наполнителей связки на производительность бакелизации по воздействием микроволнового излучения.....	117
3.2.3. Экспериментальное исследование влияния термостатирования полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке на качество и производительность их термообработки при микроволновом нагреве.....	124
3.2.4. Многофакторное исследование процесса микроволновой термообработки полуфабрикатов абразивных инструментов с различными наполнителями в условиях теплоизоляции.....	127

3.3. Исследование влияния наполнителей связки на структуру абразивных инструментов бакелизованных в микроволновом поле.....	130
3.3.1. Методика исследования влияния различных наполнителей на структуру абразивных инструментов.....	130
3.3.2. Экспериментальное исследование влияния различных наполнителей на структуру абразивных инструментов.....	132
3.4. Выводы.....	135
Глава 4. Исследование работоспособности абразивных инструментов, содержащих специальные наполнители бакелитовой связки.....	138
4.1. Методика экспериментальных исследований работоспособности абразивных инструментов на бакелитовой связке при плоском шлифовании.....	138
4.1.1. Критерии оценки работоспособности шлифовальных кругов на бакелитовой связке, содержащих специальные наполнители.....	138
4.1.2. Параметры, контролируемые при исследованиях. Методы и средства измерения.....	139
4.1.3. Условия, техника эксперимента и порядок проведения исследований.....	145
4.1.4. Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов.....	148
4.1.5. Обработка результатов исследований и их анализ.....	150
4.2. Экспериментальное исследование работоспособности абразивных инструментов на бакелитовой связке.....	150
4.2.1. Исследование влияния наполнителей связки на износостойкость абразивных инструментов и шероховатость обработанной поверхности.....	150
4.2.2. Многофакторное исследование производительности и теплосилонапряженности плоского шлифования кругами со специальными наполнителями.....	161
4.3. Выводы.....	169

Глава 5. Технико-экономическая эффективность и использование результатов исследований в промышленности.....	171
5.1. Разработка оборудования для микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ.....	171
5.2. Рекомендации по разработке технологического процесса термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, содержащей специальные наполнители, с использованием термостатирования.....	175
5.3. Использование разработок в промышленности.....	176
5.4. Экономическая эффективность применения модернизированной технологии изготовления АИ на бакелитовой связке.....	180
5.5. Выводы.....	184
Заключение.....	186
Список литературы.....	189
Приложения.....	200

Введение

Одной из наиболее ответственных операций изготовления абразивного инструмента (АИ) на бакелитовой связке является термообработка полуфабрикатов, в процессе которой формируются остаточные напряжения, эксплуатационные свойства АИ (прочность, твердость), а также существует риск возникновения скрытых дефектов (микротрещин). Перспективным направлением совершенствования технологий термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке является применение микроволновой технологии нагрева, позволяющей существенно сократить длительность технологического цикла термообработки и удельные энергозатраты. Одно из принципиальных отличий бакелизации с использованием микроволновой энергетики от бакелизации при конвективном нагреве заключается в том, что прогрев полуфабрикатов начинается с их внутренних областей, так как мощное микроволновое излучение проникает в полуфабрикаты на большую глубину. Благодаря этому при микроволновом нагреве полуфабрикатов существенных препятствий движению образующихся при бакелизации связки летучих продуктов от центра полуфабрикатов к их периферии и выходу в окружающее полуфабрикаты воздушное пространство не возникает. Кроме этого, под действием электромагнитных излучений, ряд химических превращений протекает совершенно иначе, чем в обычных условиях, что открывает широкие перспективы использования концентрированных потоков энергии переменных электрических и магнитных полей для управления и стимулирования химических реакций и спекания при производстве АИ на органических термореактивных связках. Тем не менее, резкая активизация образования и выделения летучих веществ при быстром и непродолжительном нагреве полуфабрикатов в СВЧ-поле может привести к необратимым последствиям, вплоть до разрушения полуфабриката. Обеспечить выпуск АИ требуемого качества с максимальной производительностью можно путем введения в формовочную смесь наполнителей, обладающих свойствами химической адсорбции летучих веществ, и наполнителей, повышающих уровень диэлектрических потерь в процессе микроволновой бакелизации их полуфабрика-

тов. Кроме этого микроволновый нагрев зачастую не обеспечивает требуемую равномерность распределения температур из-за наличия теплообмена наружных поверхностей термообрабатываемых полуфабрикатов с относительно холодной окружающей средой. Для повышения равномерности микроволнового нагрева было предложено теплоизолировать полуфабрикаты в процессе термообработки специальным сыпучим радиопрозрачным материалом.

Целью данной работы является повышение производительности изготовления и улучшение качества абразивного инструмента на основе совершенствования микроволновой технологии бакелизации полуфабрикатов путем применения специальных наполнителей и термостатирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать выбор наполнителей ОТС АИ, повышающих способность поглощать энергию микроволнового излучения и снижающих количество выделяющихся в процессе термообработки низкомолекулярных летучих веществ.
2. Выполнить моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов, модифицированных радиопоглощающими наполнителями, с целью обеспечения возможности управления радиопоглощающими свойствами полуфабрикатов АИ.
3. Выполнить математическое и численное моделирование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ при их термостатировании различными технологическими средствами с целью выявления оптимальных параметров последних и определения минимально возможной длительности цикла термообработки.
4. Провести экспериментальные исследования влияния специальных наполнителей и нового способа термостатирования полуфабрикатов АИ на ОТС на производительность микроволновой термообработки.
5. Выполнить исследование влияния наполнителей и нового способа термостатирования полуфабрикатов на структуру и твердость АИ.
6. Провести экспериментальные исследования работоспособности ШК, изготовленных с использованием специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве.

7. Провести опытно-промышленные испытания АИ на бакелитовой связке, термообработанных при микроволновом нагреве.

8. Разработать рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления АИ на ОТС с использованием микроволнового нагрева.

Основные научные положения, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту:

1. Методология, математические модели и зависимости, результаты теоретических исследований влияния количества и вида радиопоглощающих наполнителей на изменение скорости микроволнового нагрева.

2. Математическая модель и результаты численного моделирования процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ в условиях радиопрозрачной теплоизоляции.

3. Результаты экспериментальных исследований эффективности нового способа микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ с использованием специальных наполнителей связки и теплоизоляции объектов нагрева.

4. Результаты экспериментальных исследований работоспособности АИ с наполнителями бакелитовой связки, термообработанного в микроволновом поле с применением радиопрозрачной теплоизоляции.

Реализация цели и решение поставленных задач в работе обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии изготовления АИ, теорий тепломассопереноса и распространения электромагнитных волн, математического моделирования. В экспериментальных исследованиях использовали современные средства измерения температурно-силовой напряженности в процессе шлифования заготовок, качества обработанных поверхностей, современные методы неразрушающего измерения твердости АИ, а также температуры полуфабрикатов в процессе микроволнового нагрева.

Достоверность результатов подтверждается корректным соотношением результатов теоретических и экспериментальных исследований, и применением современных методик и оборудования. Основные положения и результаты выполненной работы докладывались на многочисленных международных и всероссий-

ских семинарах, форумах и конференциях. В 2010 г. работа была поддержана по программе «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» («У.М.Н.И.К.») Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. В 2011 г. стала лауреатом конкурса научно-технического творчества молодежи Приволжского федерального округа и поддержана премией Правительства Ульяновской области.

По теме диссертации опубликовано 29 научных работ, в том числе 2 в изданиях перечня ВАК. Получено 3 патента РФ на новые способы изготовления АИ на бакелитовой связке. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (101 наименование) и приложений, включает 221 страницу машинописного текста, 60 рисунков, 50 таблиц и 130 зависимостей.

Глава 1. Действующие и перспективные технологии изготовления абразивных инструментов на органических термореактивных связках. Цель и задачи исследований

1.1. Технологии изготовления абразивных инструментов на органических термореактивных связках

Как известно, работоспособность абразивного инструмента (АИ) определяется в основном материалом абразивного зерна, зернистостью, твердостью, номером структуры и видом связки. Связка является одним из важнейших компонентов АИ, основное назначение которой – закрепление абразивных зерен в инструменте в единое целое и обеспечение высокой прочности инструмента при воздействии центробежных сил и сил резания в процессе механической обработки [77]. В значительной степени от состава, качества и количества применяемой связки зависят твердость, износостойкость и другие эксплуатационные показатели шлифовальных кругов (ШК) [4, 32, 39, 59, 60]. Например, в работе [60] представлены результаты исследования влияния состава бакелитовой связки (различных модификаторов связующего – каучуков различных марок, гидроксилсодержащих олигомеров и олигомеров с содержанием концевых эпоксидных групп) на эксплуатационные показатели ШК по критерию отсутствия следов огранки на шлифованных поверхностях. Результаты этого исследования позволили выявить оптимальный материал наполнителя – простой полиэфир марки «Лапрол 202» и его процентное содержание. В работе [39] показана существенная роль химически активных наполнителей (например, комплексных фторалюминатов натрия, бисульфита железа, оксида и карбоната кальция) в повышении термостойкости и прочности ШК на бакелитовой связке. Добавление этих компонентов в состав связки позволило повысить прочность обдирочных кругов горячего прессования на 30 %, а коэффициент шлифования – на 15 ... 20 %.

Стандарт [13] определяет следующие связки АИ: керамическую (V), вулканитовую (R), вулканитовую с упрочняющими элементами (RF), бакелитовую (B),

бакелитовую с упрочняющими элементами (BF), шеллаковую (E), магнезиальную (MG), полимерную (PL), глифталевую (BE) связки.

Исходя из анализа рынка АИ, проведенного Академией конъюнктуры промышленных рынков, традиционными и наиболее широко используемыми в РФ являются АИ на керамической и бакелитовой связках. На инструменты на вулканитовой связке приходится менее 2% от общего объема производства (рис. 1.1).

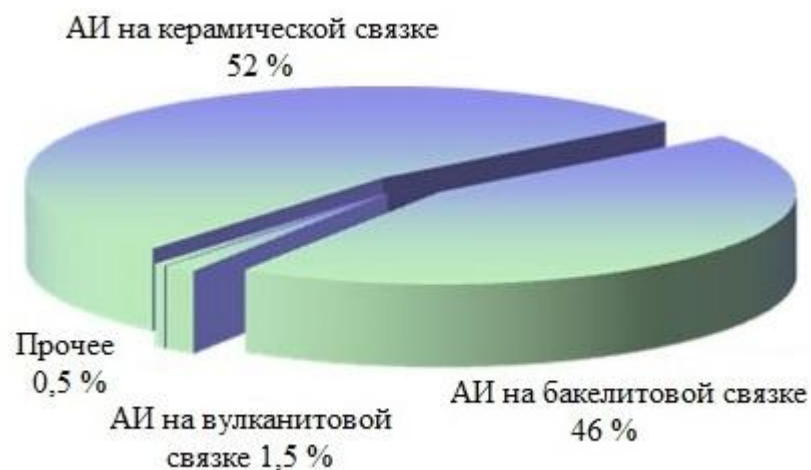


Рис. 1.1. Структура производства абразивного инструмента в РФ по видам связок

Почти половина АИ, производимого в РФ, и более половины АИ, производимого в Западной Европе, изготавливается на органических термореактивных связках (ОТС), к которым относятся: бакелитовая (B), вулканитовая (R), шеллаковая (E), полимерная (PL) и глифталевая (BE) связки.

Термостойкость органических термореактивных связок (ОТС), в частности, бакелитовой, делает возможным применение таких современных технологий, как золь-гель процесс и механохимия [65], которые обеспечивают усиление взаимодействия между компонентами комплексного связующего на бакелитовой основе и поверхностями зерен абразивного наполнителя.

Как показали исследования [6], важную роль играет не только компонентный состав, но и срок хранения связки. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при хранении в связках происходят процессы, изменяющие их свойства, что в

итоге сказывается на работоспособности получаемого АИ. Например, увеличение срока хранения связки приводит к снижению вязкости образующейся при нагреве жидкой фазы, что обуславливает повышение пористости инструмента и уменьшение его механической прочности. Увеличение длительности хранения связки отрицательно сказывается на динамике термических превращений, происходящих в полуфабрикатах инструментов при обжиге. Так как температура плавления твердых тел зависит от размера частиц, то каждая группа компонентов связки одной дисперсности будет плавиться при определенной температуре, отличной от температуры плавления другой группы с другим размером частиц. Температура плавления снижается по мере уменьшения размеров частиц. Поэтому связке, представляющей собой систему групп с частицами разных размеров, соответствует интервал плавления, включающий температуры плавления всех групп по дисперсности. Кроме того, до плавления твердых тел изменяются скорости реакции между твердыми компонентами связки, так как они прямо пропорционально зависят от величины удельной поверхности твердых тел. Следовательно, снижение удельной поверхности связки, вызванное слипанием и коагуляцией частиц при длительном хранении, хаотично повышает температурный интервал плавления связки, делая процесс обжига неуправляемым, а получение инструмента планируемого качества проблематичным [6].

АИ на ОТС может применяться практически во всех видах шлифования: от обдирочных работ и отрезки до отделочного полирования. Совершенствование технологии изготовления АИ на ОТС позволит снизить себестоимость изготовления, повысить качество и как следствие расширить область применения АИ.

Технологический процесс (ТП) изготовления АИ на ОТС представлен на рис. 1.2. Приготовление абразивных смесей осуществляют таким образом, чтобы придать им формовочные свойства и обеспечить получение полуфабрикатов с достаточной для последующих операций прочностью, а также равномерное перемешивание абразивных зерен и связки для получения изделия заданной структуры и твердости с равномерной плотностью и однородными свойствами [45, 47, 64, 84].



Рис. 1.2. Типовая схема изготовления АИ на ОТС [82]

В работе [47] представлены исследования влияния двухстадийного смешивания компонентов формовочной смеси на ее технологичность (получение свободно-текучих формовочных смесей) и физико-механические свойства АИ на бакелитовой связке. Формовочная смесь, полученная двухстадийным методом и искусственным старением, имеет следующие преимущества:

- лучшие характеристики свободного течения (текучести);
- более длительный срок хранения (до 72 часов);
- необходимое оборудование для получения смеси просто в обращении;
- отвержденные смеси просты и недороги;
- потери смеси (потери на агломерирование) ниже, чем у стандартных смесей;

– при дальнейшем формировании таких смесей появляется возможность механизировать и автоматизировать процесс, особенно в сложных условиях (когда речь идет о высокопористых кругах, тонких кругах, кругах с высокими требованиями по неуравновешенной массе);

– возможность получать круги с более высоким коэффициентом шлифования: в 1,5 раза выше, чем у обычных кругов.

Усовершенствованием технологии дозирования формовочной смеси можно добиться повышения качества АИ. Способ и устройство для дозирования и укладки формовочной смеси представлены в работе [84]. Предлагаемое устройство позволяет обеспечить равномерную укладку смеси, возможность изготовления центральной и периферийной части изделия из смесей различного состава, изменение твердости по радиусу и производить смешивание трудносмешиваемых компонентов непосредственно в пресс-форме.

Новые технологии измельчения, разделения и смешивания в производстве АИ на основе эффективного использования винтовых роторов для смешивания представлены и описаны в работе [64].

Методика оценки технологических показателей формовочных смесей на основе бакелита приведена в работе [45]. Физический смысл анализа формовочной смеси заключается в том, чтобы определить время, в течение которого сформованный под расчетным давлением и за определенное время выдержки кубик рассыплется на отдельные гранулы, т.е. смесь должна быть текучей.

Этап прессования – один из наиболее важных этапов ТП изготовления ШК, во многом определяющий его прочностные и эксплуатационные свойства. Для повышения равномерности уплотнения (особенно полуфабрикатов крупногабаритных АИ) применяют гидроплиты (рис. 1.3) [87]. Принцип действия гидроплиты заключается в том, что давление плунжера прессы передается не через поверхность жесткой металлической плиты, а через эластичную прокладку, представляющую собой резиновую гидроподушку, заполненную водой. Применение гидроплиты дает возможность получения высокой равномерности плотности изделия по всему его объему, что

обеспечивает равномерность твердости АИ.

Сушка – это низкотемпературный термический процесс, при котором в результате удаления влаги повышается механическая прочность полуфабриката АИ, что необходимо для проведения дальнейших операций (транспортирование, укладка на плиты печей и др.) [4, 18]. Удаление влаги необходимо также во избежание трещин при проведении термообработки.

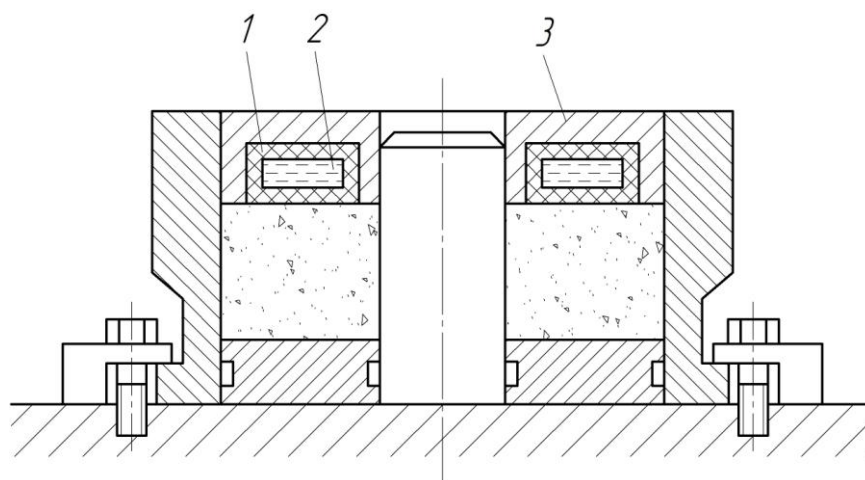


Рис. 1.3. Схема пресс-формы с гидроплитой [87]: 1 – резиновая гидроподушка; 2 – вода; 3 – стальная гидрообойма

Следующим важным этапом ТП изготовления любого АИ является термическая обработка его полуфабриката. При термической обработке, в результате физико-химических преобразований в системе абразивное зерно – связка обеспечиваются основные механические свойства АИ – прочность и твердость. Основная цель термической обработки – максимально прочно скрепить связкой зерна абразивного материала в единое целое [4, 18, 24, 32, 87]. Высокое содержание связки в АИ и наличие в ней большого количества летучих веществ, малая скорость отвердевания смолы, низкая пористость АИ – все эти факторы требуют медленного подъема температуры. Низкая скорость нагрева полуфабрикатов в традиционной технологии обеспечивает спокойное удаление летучих веществ, выделяющихся в процессе полимеризации ОТС и равномерный прогрев термообрабатываемых полуфабрикатов АИ, не вызывающий чрезмерного снижения вязкости связки, способного привести к ее стеканию к нижней плоскости полуфабрикатов АИ. В связи

с этим, длительность технологического цикла операции термообработки может достигать 24 – 40 часов в зависимости от типоразмера и вида связки (рис. 1.4). Технология и техника термообработки полуфабрикатов АИ рассмотрены в следующем параграфе.

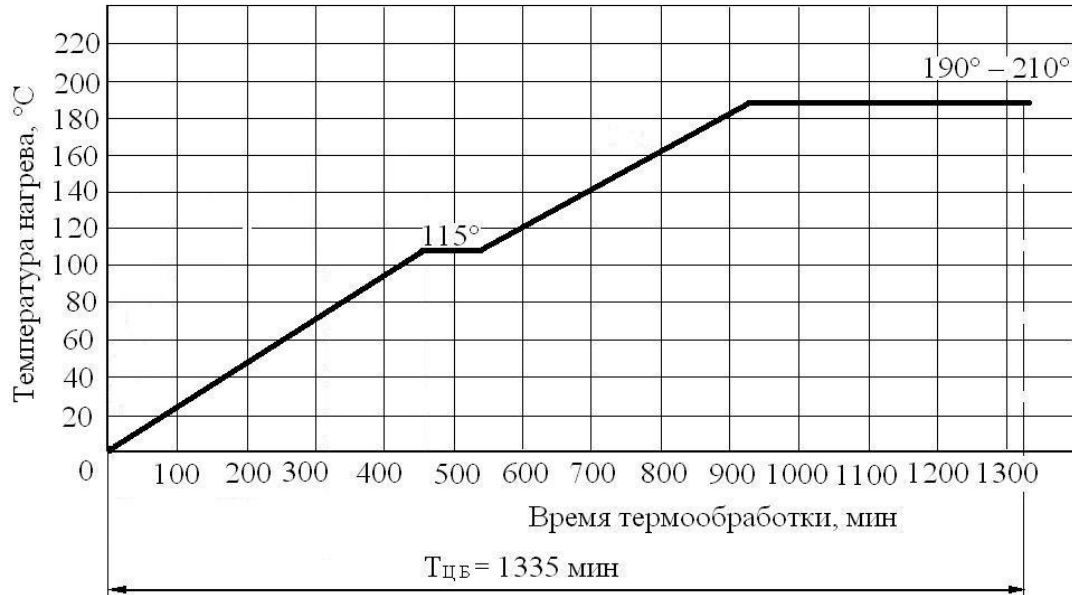


Рис. 1.4. Технологический цикл термообработки шлифовальных кругов на бакелитовой связке конвективным способом

Термообработанный АИ подвергают механической обработке. Обработка посадочных отверстий ШК относительно больших диаметров осуществляется на токарных станках при помощи конусных резцов и звездочек. Обработка ШК с малыми отверстиями (обычно диаметром до 75 мм) производится на сверлильных станках [4, 18].

В качестве инструмента для обработки полуфабрикатов АИ применяют фасонные сверла или развертки, укрепляемые на шпинделе станка; стальное и абразивное зерно. Отверстие круга обрабатывают вращающимся сверлом, в пазы которого периодически подсыпается стальное зерно. Обработку торцевых поверхностей абразивных изделий производят на плоскообдирочных станках.

После механической обработки АИ подвергается контролю, в процессе которого контролируются точность размеров и формы, твердость и неуравновешенность, проводится испытание АИ на разрыв.

Весь АИ, в том числе и круги, подлежащие последующему испытанию враще-

нием, проходит проверку на отсутствие трещин внешним осмотром и легкими ударами (простукиванием) деревянным молотком по боковой (торцевой) поверхности. Для этого круг предварительно свободно надевают на какой-либо стержень или подвешивают. Перед простукиванием АИ должен быть просушен и очищен. Инструмент без повреждений должен издавать чистый звук. Инструменты с дребезжащим звуком бракуются.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ТП изготовления АИ на ОТС, включающий операции дозирования, перемешивания, прессования, термообработки, механической обработки является весьма трудоемким. Наиболее длительной и энергоемкой операцией ТП изготовления АИ на ОТС является операция термообработки, которая во многом определяет их работоспособность. Следовательно, совершенствование технологии термообработки позволит существенно повысить производительность ТП и качество АИ на ОТС.

1.2. Термообработка полуфабрикатов АИ на ОТС

В процессе термообработки полуфабрикатов АИ на ОТС под действием теплоты, отвердителей и катализаторов связка переходит в твердое состояние (отверждается), причем этот процесс необратим. Молекулы-олигомеры, образующиеся в процессе полимеризации связки, легко растворяются в некоторых растворителях (спирте, ацетоне и др.), но после ее отверждения уже не растворимы. Неотвержденная связка состоит из молекул мономеров, имеющих более двух реакционноспособных функциональных групп. В процессе отверждения мономеры растут в трех направлениях, образуя макромолекулы сетчатого строения, все структурные элементы которых соединены друг с другом прочными ковалентными связями [20].

Среди разновидностей ОТС можно выделить вулканитовую связку, представляющую собой композицию, основной компонент которой – синтетический каучук. Инструмент на вулканитовой связке обладает эластичностью и плотностью, поэтому может использоваться как при обычных видах шлифования, так и на по-

лировальных операциях. Круги на вулканитовой связке, в отличие от остальных, могут быть изготовлены очень тонкими (десятые доли миллиметра при диаметре до 150 – 200 мм.). Недостатком является низкая теплостойкость (250 – 300 °С) и слабое закрепление зерна в связке, что объясняет более низкую износостойкость этих кругов в сравнении с бакелитовыми и керамическими [4].

Глифталевая связка – еще один представитель ОТС, продукт взаимодействия глицерина с фталевым ангидридом. Низкая теплостойкость (120 °С) и невысокая твердость ограничивают область применения шлифовальных кругов на глифталевой связке только операцией полирования при рабочей скорости не выше 40 м/с.

Шеллаковая связка состоит из природной смолы шеллака, растворённой в этиловом спирте. Шеллаковая связка очень хороша для изготовления АИ, применяемых на окончательных шлифовальных операциях и полировании.

Поливинилформалеевая связка – вспененный поливинилформаль. Другое название кругов на основе этой связки – поропластовые. АИ на этой связке имеют плотность 0,8 ... 0,9 г/см³, содержат до 80 % пор и используются для полирования с получением шероховатости поверхности по параметру Ra 0,63 ... 1,00 мкм.

Эпоксидная и полиэфирная связки – в основном, используются для изготовления галтовочных тел, абразивных изделий, используемых во вращающихся барабанах и вибрационных контейнерах для очистки поверхностей и снятия заусенцев с деталей малого размера.

Вулканитовая, глифталевая, поливинилформалеевая связки используются для изготовления ведущих кругов бесцентровых шлифовальных станков, гибких кругов для полирования и отделки, кругов для отрезки, прорезки и шлифования пазов, профильного шлифования.

Самой распространенной среди ОТС (до 96 %) является бакелитовая связка. Бакелит получил широкое распространение как лак и как связующее, используемое в производстве корпусов изоляторов, телефонных аппаратов, различных приборов. Именно открытием бакелита было положено начало эры пластиков. В абразивной промышленности используются фенолформальдегидные лаки и смолы. В Российской промышленности используется два обозначения смол: СФЖ – смо-

ла фенольная жидкая и СФП – смола фенольная порошкообразная. В изготовлении связок помимо смол используют различные наполнители неорганического происхождения – криолит, пирит, алебастр и другие. АИ на бакелитовой связке обладает высокой прочностью на сжатие и ударной прочностью, превосходя по этим показателям инструмент на керамической связке. Высокая прочность бакелитовой связки позволяет АИ работать при больших нагрузках и высоких скоростях резания. Такие круги применяются на обдирочных и отрезных операциях, при шлифовании с большими ударными нагрузками и съемом металла. К недостаткам следует отнести: невысокую теплостойкость – деструкция связки происходит при температурах 400 – 700 °С, недостаточную устойчивость к воздействию щелочных растворов, что ограничивает применение ряда СОЖ (нежелательно применение растворов, содержащих щелочи более 1,5 %) [18]. Бакелитовая связка, как представитель группы ОТС выбрана в качестве основы будущих исследований, в связи с чем, далее рассмотрим процесс термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке (процесс бакелизации).

Цикл термообработки при бакелизации заключается в нагреве полуфабрикатов АИ по особому режиму до температуры 170 ... 230 °С и выдержке при этой температуре в течение нескольких часов. При нагреве происходит отверждение бакелита, приводящее к повышению вязкости связки. Одновременно выделяются летучие вещества: пар, свободный фенол, аммиак и другие продукты [77]. АИ на порошкообразном бакелите нельзя термообработать на режимах с медленным подъемом температуры до точки плавления связки, так как при этом происходит испарение или затвердевание увлажнителя до оплавления всей связки и ее растекания по поверхности зерен. Наличие паров увлажнителя и фенола в атмосфере камеры бакелизатора замедляет испарение увлажнителя и фенола из связки. Поэтому при замедленных режимах бакелизации нежелателен воздухообмен в бакелизаторе. Порошкообразный бакелит, при длительной выдержке при температуре ниже температуры плавления связки, становится вязкоплавким, что действует так же, как преждевременное испарение увлажнителя. В результате режимы бакелизации с длительными выдержками при температуре ниже температуры плавления

связки не позволяют получать твердые и прочные изделия. Во всех случаях увеличение скорости нагрева изделий из порошкообразного бакелита повышает прочность и твердость изделий (если при этом не происходит вспучивание изделий выделяющимися летучими продуктами) [4].

При температуре свыше $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается процесс поликонденсации связки, который постепенно охватывает весь объём размягчающегося полуфабриката. Выделение летучих веществ на этом этапе быстро усиливается, а процесс сопровождается экзотермическим эффектом. Максимальное количество выделившегося в единицу времени фенола соответствует температуре теплоносителя $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, формальдегида – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, аммиака – 100 и $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [77].

Известно несколько способов термообработки полуфабрикатов АИ на ОТС (рис. 1.5), однако наибольшее распространение получил способ термообработки при помощи конвективного теплообмена. Нагрев полуфабрикатов конвективным способом до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ производят относительно быстро – со скоростью роста температуры теплоносителя порядка $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. При этом полуфабрикаты разогреваются по направлению от поверхности к внутренним зонам (рис. 1.6). В результате этого нагретые наружные слои материала полуфабрикатов уже выделяют летучие вещества, а внутри полуфабрикатов формовочная смесь остается сравнительно холодной, и эти вещества образуются с существенным сдвигом во времени [77].

С целью обеспечения равномерного прогрева всех полуфабрикатов, находящихся в камере бакелизации, так называемой «садки», и создания условий для эффективной эвакуации при этом летучих веществ термообработку ведут по схеме «набор температуры – пауза – набор температуры» и т.д., а скорость набора температуры по ходу операции бакелизации согласовывают со скоростью поликонденсации (трехмерной полимеризации) связки [77].

Выдержка при температуре теплоносителя $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 60 мин обеспечивает выравнивание температуры по всем полуфабрикатам садки. При наборе температуры свыше $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ с высокой скоростью ($\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) продолжается поликонденсация связки, причем деформация полуфабрикатов практически полностью отсутствует, так как полуфабрикаты при температуре свыше $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ находятся

уже в твердом агрегатном состоянии.



Рис. 1.5. Классификация способов термообработки АИ на ОТС

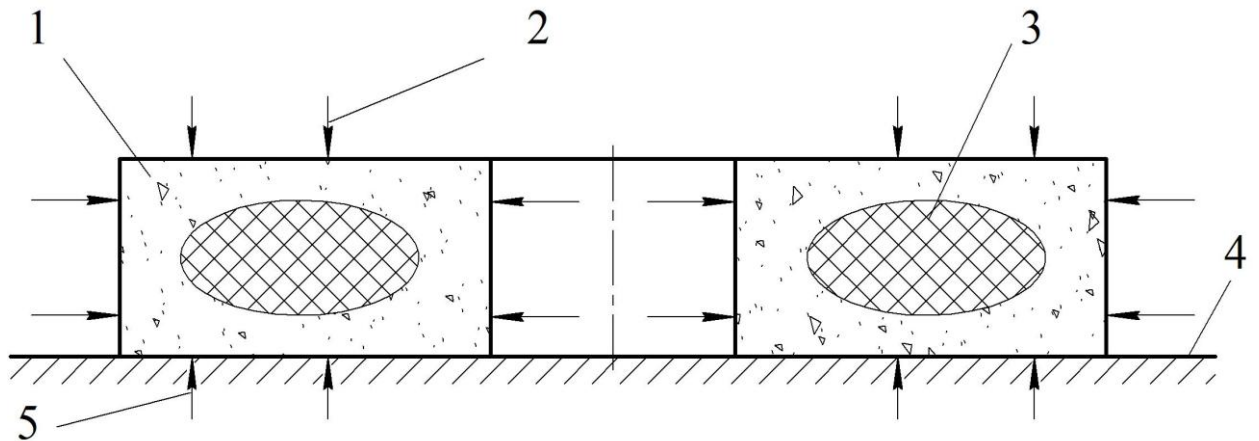


Рис. 1.6 Схема нагрева полуфабриката при бакелизации конвективным способом [77]: 1 – полуфабрикат; 2 – направление конвективной теплопередачи от нагретого воздуха; 3 – низкотемпературная область; 4 – подложка из керамики или кварцевого песка; 5 – направление кондуктивной теплопередачи от подложки

Выдержка при конечной температуре 200 °С в течение 600 мин обеспечивает полный прогрев всех полуфабрикатов садки и полную поликонденсацию связки:

гексаметилентетраамин (уротропин) разрушается с образованием аминотетраметилных соединений $\text{NH}(\text{CH}_2\text{OH})_2$ и $\text{N}(\text{CH}_2\text{OH})_3$, которые обеспечивают пространственную «сшивку» метиленовыми мостиками новолаков и резина; возникает высокопрочное композитное соединение связки, наполнителя и абразивных зерен [77] На последних этапах процесса термообработки проявляется эндотермический эффект.

Нагрев полуфабрикатов АИ производится в печах периодического или непрерывного действия конвективным способом посредством теплоносителя – воздуха. К печам периодического действия относятся камерные печи (рис. 1.7). Загрузку изделий, термообработку, охлаждение и выгрузку проводят последовательно в одном рабочем пространстве печи. Камерные печи просты по конструкции, позволяют вести термообработку АИ по любому индивидуальному режиму. Недостатками камерных печей периодического действия являются относительно низкая производительность, тяжелый физический труд при загрузке и выгрузке изделий, большой удельный расход энергии на термообработку АИ, т. к. значительное количество тепла поглощается кладкой (10 – 20 %) и отходящими газами (35 – 40 %).



Рис. 1.7. Камерная печь

Печи непрерывного действия (проходные) имеют большие преимущества перед печами периодического действия: более низкий удельный расход энергии, высокая производительность, лучшие условия труда. Широкое распространение получили туннельные печи (рис. 1.8). В зависимости от того, какие процессы протекают в печи, всю длину туннеля можно разделить на отдельные зоны. Каждая зона печи имеет свои конструктивные особенности и температурный режим, определенную длину в зависимости от вида термообрабатываемых полуфабрикатов АИ.

Термообработка полуфабрикатов АИ на ОТС может проводиться в печах как без прессформ, так и в прессформах после формования полуфабрикатов. При конструировании прессформы для последнего метода следует учесть, что полуфабрикаты при термообработке дают заметную усадку, в результате чего оправка прессформы плотно удерживается в термообработанном АИ. Для облегчения извлечения полуфабриката при его высоте более 5 мм, оправка изготавливается с конусностью не менее 1/50. Формы, до закладывания в них массы (для прессованных кругов) или сырого прокатанного круга, тщательно очищаются и смазываются смазкой из масляного лака и графита. Главным недостатком термообработки данным способом является длительность технологического цикла, которая может достигать 40 часов.



Рис. 1.8. Туннельная печь

Для проведения термообработки при повышенном давлении используют автоклавы, обогреваемые электричеством, глухим или острым паром. При нагреве острым паром, ввиду гигроскопичности бакелита, изделия помещают в автоклавы в засыпке тальком. Давление в автоклаве создается подачей в него сжатого до 1,0 – 1,2 МПа воздуха или пара. Полуфабрикаты АИ на подкладных плитах загружают в автоклав, последний герметически закрывают, подают сжатый воздух и включают обогрев. При желании удалить максимальное количество летучих веществ из полуфабриката периодически производят продувку автоклава воздухом, не снижая установленного давления. [4].

При радиационном способе термообработки плоские нагреватели, обогреваемые газом или электричеством, располагаются горизонтально над термообрабатываемыми полуфабрикатами АИ (для полуфабрикатов с большой высотой дополнительно устанавливаются нагреватели под подкладными плитами, на которые они уложены). Теплота от нагревателя передается тепловым излучением непосредственно полуфабрикату, что обеспечивает его быстрый нагрев [18].

Нагрев токами высокой частоты (ТВЧ) обеспечивает одновременный нагрев полуфабрикатов по всей высоте. При термообработке ТВЧ полуфабрикат АИ помещается между двумя электродами, к которым подается высокочастотная энергия. В работе [41] предложен способ одновременного формообразования и термообработки в высокочастотном электрическом поле, который характеризуется рядом особенностей:

- АИ, изготовленные этим способом, имеют более высокие физико-механические и эксплуатационные свойства в сравнении с образцами, изготавливаемыми по традиционной технологии с конвективным нагревом из одних и тех же формовочных смесей;
- твердость АИ увеличивается на 1 ... 2 степени, механическая прочность возрастает в 1,7 ... 4 раза;
- возможна экономия связки в среднем на 3,4 % за счет того, что твердость возрастает на 1 ... 2 степени;
- абразивные смеси заданных рецептур можно термообработать до полного

отвержения связки за время, равное 5 ... 10 с. При этом обеспечивается снижение расхода электроэнергии до 110 кВт·ч/т против 210 ... 230 кВт·ч/т, необходимых при традиционной технологии термообработки;

– удельное усилие прессования снижается до 2 ... 2,5 МПа против 20 ... 25 МПа при конвективном нагреве.

Однако высокая стоимость оборудования, пробой электрического тока, возникающие в полуфабрикате, и низкий коэффициент полезного действия не позволяют до сих пор высокочастотным установкам конкурировать с другими типами бакелизаторов, несмотря на то, что нагрев ТВЧ позволяет равномерно прогреть полуфабрикаты за короткое время. В стадии исследований находится бакелизация током промышленной частоты (50 Гц) путем непосредственного пропускания тока через полуфабрикат [4].

Еще одним способом термообработки полуфабрикатов АИ на ОТС является кондуктивный нагрев полуфабрикатов за счет нагреваемых элементов прессформы во время формования (горячее прессование) или после формования полуфабрикатов. Данный способ термообработки используется в основном при производстве силовых обдирочных АИ, абразивный материал которых имеет крупную зернистость.

Длительность нагрева и всей операции термообработки полуфабрикатов АИ и других изделий на ОТС резко сокращаются (в несколько раз), за счет применения микроволнового способа нагрева, который обладает рядом уникальных свойств [77]:

- избирательность нагрева, благодаря которой в многокомпонентной смеси диэлектриков сильнее нагреваются составляющие, имеющие более высокий тангенс угла диэлектрических потерь;

- равномерность нагрева за счет того, что электрическое поле мгновенно проникает в диэлектрические материалы на значительную глубину, прямо связанную с длиной волны излучения, обеспечивая равномерное распределение выделяющейся теплоты по всему объёму материала нагреваемого объекта, независимо от его теплопроводности (рис. 1.9.);

- высокий коэффициент преобразования энергии излучения в тепловую энергию: удельная энергоёмкость бакелизации с использованием микроволновой энергетики - до 0,3 кВт·ч/кг на один кг массы полуфабриката против 1 ... 3 кВт·ч/кг при бакелизации конвективным способом.

Высокая эффективность микроволновой энергетики при термообработке полуфабрикатов АИ и других изделий на ОТС обусловлена присущими достаточно высокими значениями тангенса угла диэлектрических потерь связующего.

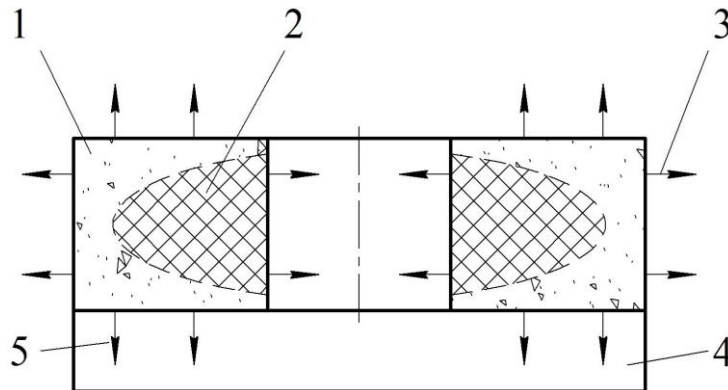


Рис. 1.9. Схема распространения теплоты в полуфабрикате при микроволновой бакелизации [77]: 1 – полуфабрикат; 2 – высокотемпературная область; 3 – направление инфракрасного излучения; 4 – подложка; 5 – направление кондуктивной теплопередачи от полуфабриката к подложке

В начале 2000-х годов творческие коллективы Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) и ОАО «Димитровградхиммаш» развернули широкие теоретико-экспериментальные исследования и ОКР с целью разработки высокопроизводительной технологии и оборудования для микроволновой термообработки изделий на ОТС. В результате выполнения НИОКР был опубликован ряд работ в ведущих изданиях РФ [28 – 38, 50 – 54, 74 – 81].

Так, в работах [33, 34, 74, 76, 81] приведены результаты исследований работоспособности АИ на ОТС, изготовленных с использованием микроволнового нагрева. Показано, что термообработка полуфабрикатов АИ с использованием микроволнового нагрева способствует повышению твёрдости кругов по сравнению с кругами, изготовленными по традиционной технологии. Установлено, что при шлифовании заготовок из различных сталей композиционными и стандартными кругами применение АИ, термообработанного по микроволновой технологии по-

зволило увеличить параметры эффективности шлифования по сравнению с конвективной технологией до 10 %.

В работах [28, 79] показано, что АИ, изготовленные по микроволновой технологии, имеют более плотную структуру, чем круги, изготовленные по действующей технологии. Отмечено, что при использовании микроволнового нагрева физико-механические свойства АИ обеспечиваются на требуемом уровне при резком сокращении длительности операции термообработки.

В работах [31, 36] представлены рекомендации по проектированию технологического процесса изготовления АИ в области подготовки формовочных смесей и полуфабрикатов перед микроволновой термообработкой, позволяющие получать АИ требуемого качества по твердости и геометрической форме, а также обеспечивающие резерв для ускорения процесса микроволновой термообработки.

В работах [35, 78] представлены результаты внедрения технологий микроволнового нагрева в производство АИ на бакелитовой связке с обеспечением многократного (до 9 раз) снижения продолжительности операции бакелизации полуфабрикатов АИ.

В работах [37, 38] показано, что при использовании энергии микроволнового излучения удельные энергозатраты на изготовление АИ снижаются до 4 раз по отношению к технологии, применяемой в настоящее время на абразивных заводах, при обеспечении требуемого качества. Приведены результаты расчета годового экономического эффекта от применения микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ на ОТС.

Разработки в данной области были защищены рядом патентов, первый из которых был получен в 2007 году на способ изготовления АИ на бакелитовой связке [50]. Способ включает формование полуфабрикатов АИ без нагрева в пресс-форме, их последующее извлечение и сушку на воздухе, а также полный цикл термообработки группы полуфабрикатов АИ в микроволновом поле СВЧ-камеры до достижения температуры полной полимеризации бакелитовой связки с выдержкой при этой температуре. Термообработку полуфабрикатов АИ толщиной до 100 мм предлагается проводить при частоте электрического поля 2450 МГц, а

полуфабрикатов толщиной свыше 100 мм – 890 ... 915 МГц.

Итоговой работой, заключающей в себе результаты многолетних исследований в данном направлении, является монография Худобина Л.В., Веткасова Н.И., Михайлина С.М. [77]. В данной работе представлены рекомендации по расчету и проектированию микроволновых установок, предназначенных для термообработки полуфабрикатов АИ на ОТС, рекомендации по проектированию и применению технологий термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, база данных теплосиловой напряженности различных видов шлифования и работоспособности АИ бакелизованных по традиционной конвективной и микроволновой технологиям. Кроме этого, в работе [77] описана спроектированная и изготовленная опытно-промышленная СВЧ - установка УМБ1Э (рис. 1.10, 1.11), предназначенная для реализации микроволнового способа термообработки изделий на ОТС.

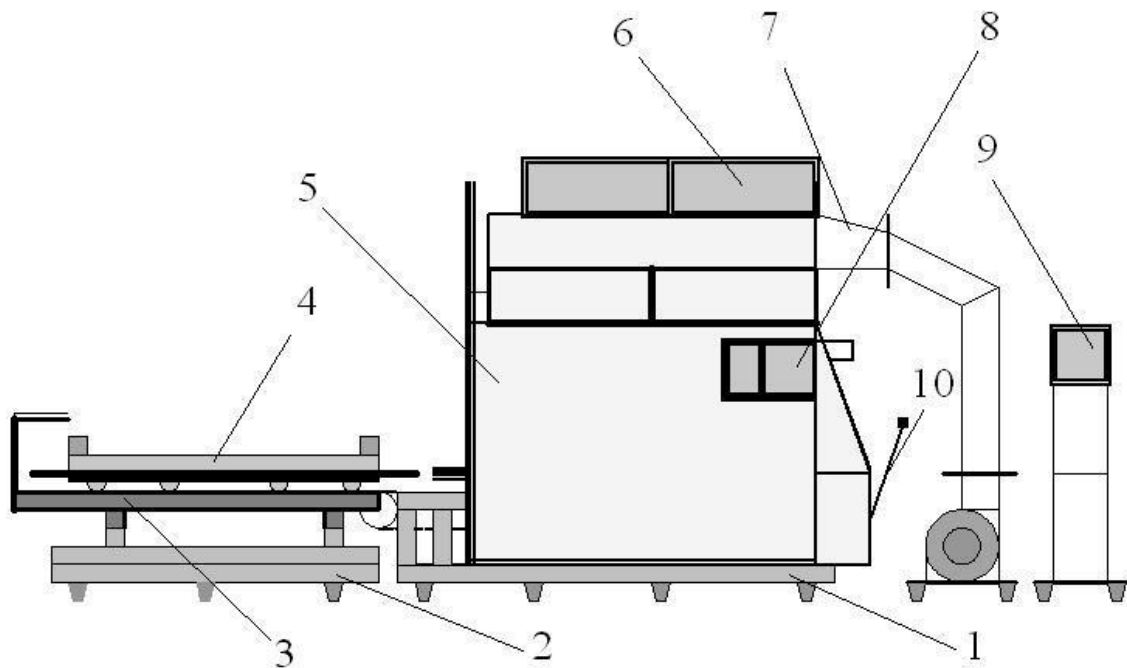


Рис. 1.10. Компоновочная схема СВЧ-установки УМБ1Э [77]: 1 – станина; 2 – платформа; 3 – поперечная тележка; 4 – рабочая тележка; 5 – камера-модуль бакелизации; 6 – БЗР; 7 – система обдува; 8 – пульт управления; 9 – прибор регистрирующий "Диск- 250"; 10 – устройство подключения термопар

СВЧ-установка УМБ1Э оснащена набором термопар для контроля температуры во время термообработки, блоком задания режимов (БЗР), с помощью которого можно программировать режим термообработки, системой обдува возду-

ха для охлаждения магнетронов и удаления летучих веществ из рабочей камеры, пультом, с помощью которого производится управление установкой и регистрирующим прибором "Диск – 250". Максимальная загрузка установки – 150 кг. Максимальное число одновременно работающих магнетронов – 8, мощность каждого из которых 1 кВт. Длительность цикла термообработки полуфабрикатов АИ в установке УМБ1Э была снижена в несколько раз за счет применения микроволнового нагрева (рис. 1.12).



Рис. 1.11. Внешний вид СВЧ - установки УМБ1Э [77]

Однако широкому внедрению в производство разработанной технологии и оборудования для ее реализации препятствует ряд факторов:

1. Несмотря на многократное снижение длительности технологического цикла термообработки, производительность разработанной микроволновой печи относительно не велика и составляет в среднем 30 кг/час. Это связано с тем, что максимальная загрузка установки составляет всего 150 кг, в то время как вместимость бакелизаторов конвективного типа начинается от 500 кг. Увеличение максимальной загрузки микроволновой печи является весьма сложной задачей, решение которой приведет к существенному удорожанию установки и снижению ее надежности.

2. На микроволновый нагрев оказывают влияние не только теплоемкость и ко-

эффицент теплопроводности полуфабрикатов АИ как при конвективном нагреве, но и радиопоглощающие свойства полуфабрикатов, которые изменяются в широком диапазоне в зависимости от марки абразивного материала, твердости АИ, которая определяется количеством связки, пористостью и другими характеристиками. Радиопоглощающие свойства влияют на скорость и равномерность нагрева, КПД микроволновой установки, а также на величину минимально возможной загрузки полуфабрикатов в микроволновую камеру. Для обеспечения технологического процесса микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ широкой номенклатуры необходима методика, а также инструментарий в виде программного обеспечения для оценки радиопоглощающих свойств полуфабрикатов в зависимости от их рецептуры. Также требуется разработать механизмы влияния на радиопоглощающие свойства полуфабрикатов с целью обеспечения возможности варьирования и установления ими оптимальных значений для конкретных условий.

3. Наличие конвективного и радиационного теплообмена между поверхностью полуфабрикатов и окружающей средой, температура которой, как правило, меньше температуры полуфабрикатов, в процессе микроволнового нагрева не позволяет достичь требуемой равномерности прогрева и дополнительно сократить длительность технологического цикла.

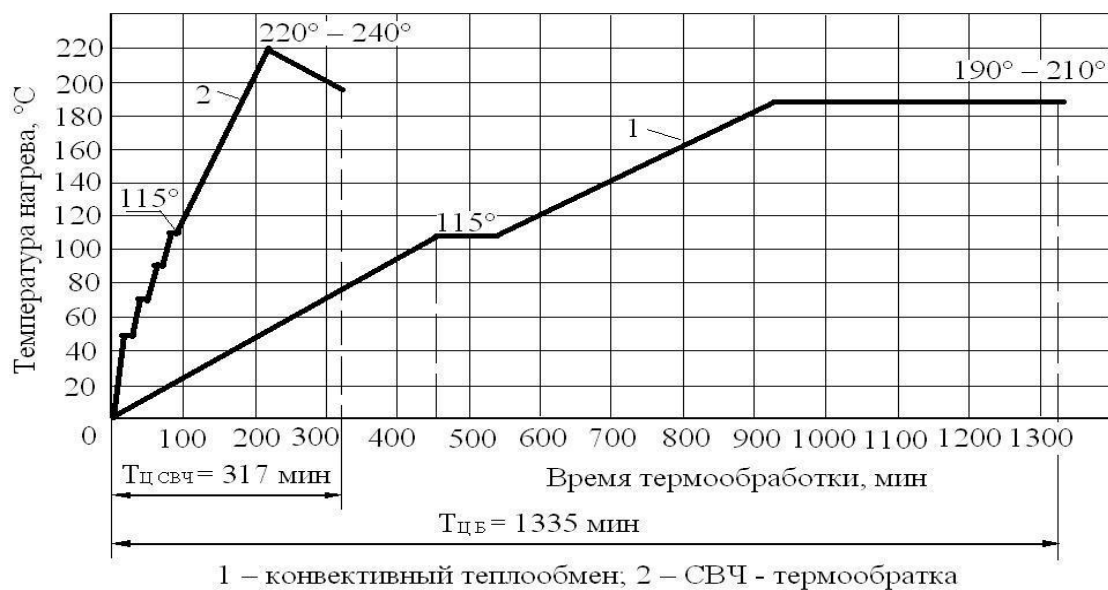


Рис. 1.12. Технологический цикл термообработки шлифовальных кругов на бакелитовой связке

Таким образом можно сделать вывод, что применение нагрева полуфабрикатов АИ под воздействием микроволнового излучения является перспективным методом снижения себестоимости и повышения качества ШК. При этом снижение себестоимости ШК достигается за счет резкого сокращения удельных энергозатрат в 5 ... 6 раз и длительности операции термообработки в 4 ... 5 раз, а повышение качества кругов обеспечивается за счет более равномерного нагрева связки по объему полуфабрикатов по сравнению с традиционной технологией термообработки в конвективных бакелизаторах. Однако для обеспечения широкого внедрения данной технологии в производство требуется дополнительно повысить производительность процесса термообработки, разработать методики управления радиопоглощающими свойствами полуфабрикатов и их оценки. Для решения поставленной актуальной проблемы объектом диссертационного исследования выбрана технология микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке. Одним из способов повышения производительности процесса термообработки является модификация связки специальными наполнителями, способными сократить выход летучих веществ и тем самым минимизировать риск возникновения деформаций. Повышение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов представляется возможным путем модификации связки радиопоглощающими наполнителями. В связи с этим, далее проведем обзор-поиск материалов, способных выступить адсорбирующими и радиопоглощающими наполнителями связки полуфабрикатов АИ.

1.3. Наполнители связки, повышающие производительность и энергоэффективность операции термообработки полуфабрикатов абразивного инструмента на органических термореактивных связках и улучшающие его качество

1.3.1. Наполнители абразивных инструментов, используемые в абразивной промышленности

В настоящее время для повышения прочности связки, уменьшения расхода бакелита, облегчения формования абразивных смесей на жидком бакелите и сокращения длительности термообработки полуфабрикатов вводят в формовочные смеси хлопковые очесы, асбестовую пыль, стеклянные и металлические нити, древесные опилки, каолин, бентонит, глины, цемент, полуводный гипс, окиси железа, хрома и алюминия, криолит, маршаллит и другие материалы. Наибольшее применение в качестве наполнителя находит полуводный гипс, введение которого значительно уменьшает количество летучих веществ, выделяющихся из бакелита при термообработке, что снижает явление вспучивания полуфабрикатов при бакелизации. Кроме того, гипс ускоряет отвердевание смолы при нагреве [4].

Одним из путей сокращения длительности термообработки является введение в формовочные смеси ускорителей бакелизации. Их можно разбить на следующие группы: альдегиды или вещества, способные выделять в процессе термообработки альдегиды, кислоты, щелочи и соли. Ускорители первой группы применяют редко – в отдельных случаях вводят уротропин (гексаметиленetetрамин). Кислоты и щелочи находят несколько более широкое применение – преимущественно при изготовлении полуфабрикатов на жидком бакелите. Из солей широко применяется полуводный гипс, являющийся одновременно наполнителем [18].

Положительное влияние наполнителей на эксплуатационные показатели АИ отмечено при введении в состав связки комплексного наполнителя, который получают путем смешивания цинкового порошка и окиси цинка. Износостойкость кругов с комплексным наполнителем при резке труб из углеродистой стали выше,

чем у серийно выпускаемых в среднем на 24 %. Это объясняется тем, что в результате химического взаимодействия частиц цинка и окиси цинка с фенолформальдегидной смолой часть связующего переходит в упрочненное состояние, что приводит к повышению прочности АИ, увеличению его твердости и соответственно износостойкости. Кроме того, цинковый порошок повышает теплопроводность связки. При введении в связку круга формиатов никеля, меди, свинца в качестве функционального наполнителя также повышается износостойкость АИ, так как он оказывает многоплановое действие на связующее [18].

В процессе резки такими кругами при повышении температуры в зоне контакта происходит поглощение теплоты, обусловленное разложением наполнителя, а также выделением высокодисперсной металлической фазы (никеля, меди, свинца) в рабочей зоне. Кроме того, выделяющиеся при разложении формиатов высокодисперсные металлы выполняют роль смазки, препятствуя засаливанию инструмента. Методами дифференциально-термического анализа были исследованы композиции на основе фенолформальдегидных смол, применяемые для изготовления АИ и содержащие абразивное зерно, жидкий бакелит, пульвербакелит, криолит и формиаты никеля. Установлено, что формиаты никеля, разлагаясь в температурном интервале 463 – 503 К, т. е. до разложения криолита, создают эффект, связанный с поглощением тепла и увеличением теплопроводности связки уже в начальной стадии резания [18].

Одним из наиболее эффективных способов снижения интенсивности взаимодействия пары абразив – металл при шлифовании является введение в зону контакта активных компонентов, которые, реагируя с ювенильными поверхностями металлов, образуют на них изолирующие пленки, препятствующие взаимодействию металла с абразивным материалом. В. А. Носенко предложил вводить химически активные компоненты непосредственно в рецептуру круга при его изготовлении, а в качестве наполнителей использовать хлориды и фториды металлов [32]: AgCl , AlCl_3 , BaCl_2 , CaCl_2 , CdCl_2 , CoCl_2 , CuCl , KCl , MgCl_2 , MnCl_2 , NiCl_2 , ZnCl_2 , AlF_3 , BaF_2 , CaF_2 , CdF_2 , CoF_2 , CuF , CuF_2 , KF , MgF_2 , MnF_2 , NaF , NiF_2 и ZnF_2 . Их выбор обусловлен следующим: для хлоридов и фторидов металлов наиболее полно

определены термодинамические характеристики; следует ожидать, что соли будут взаимодействовать с металлами по однотипным химическим реакциям, в результате которых образуются близкие по свойствам новые фазы, что позволит ярче выделить влияние химической активности наполнителей на термостойкость соединений при температуре бакелизации. Использование химически активных компонентов в качестве наполнителей ШК на бакелитовой связке позволяет в 1,5 - 2,1 раза уменьшить их износ и шероховатость обработанной поверхности, снизить шаржирование обработанной поверхности кристаллами абразивного материала и изменение ее химического состава. Снижение интенсивности взаимодействия зерна с металлом приводит к уменьшению сил шлифования и уровня остаточных напряжений в обработанной поверхности, что способствует увеличению надежности и долговечности деталей и изделий [4].

1.3.2. Наполнители, повышающие уровень диэлектрических потерь в процессе микроволновой термообработки полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке

Одним из направлений в создании эффективных технологий термообработки полуфабрикатов АИ на ОТС с использованием микроволнового нагрева является включение в полимерную связку мелкодисперсных порошков электропроводных веществ. В качестве таких веществ можно использовать порошки сплавов высокого сопротивления, карбидов некоторых металлов или углерода. Поглощение электромагнитной энергии в таких композициях происходит за счет омических потерь в проводящих частицах во время их переполяризации внешним переменным электрическим полем. При одном и том же объемном содержании проводящего порошка в полимерной связке потери в композиции будут тем выше, чем выше удельное электрическое сопротивление вещества порошка [68]. В частности, у углерода существует множество аллотропных модификаций: сажа, графит, алмаз, фуллерен, углеродные нанотрубки (УНТ) и др. (рис. 1.13), большинство из которых можно использовать в качестве радиопоглощающих наполнителей.

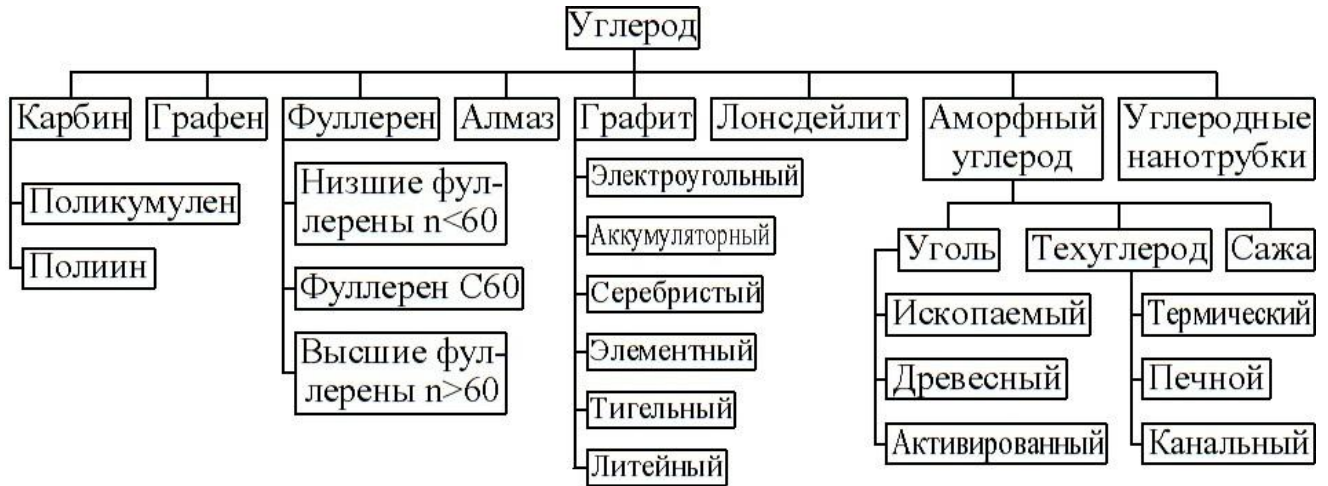


Рис. 1.13. Аллотропные модификации углерода

В работе сотрудников Академии наук Китая [101] показано, что композитный материал из диоксида кремния с добавкой многослойных УНТ эффективно поглощает микроволновое излучение. Нанотрубки диаметром и длиной в диапазоне 20 ... 40 нм и 5 ... 15 мкм, соответственно, были получены термокаталитическим разложением метана. Плотный композитный материал получен горячим прессованием мелкодисперсного диоксида кремния, предварительно перемешанного с УНТ. Для измерений диэлектрической постоянной использовали образцы размером $22,86 \times 10,16 \times 2,0$ мм³. Было выявлено, что в частотном диапазоне от 8 ... 12 ГГц как действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ε' , так и мнимая ε'' монотонно возрастают с ростом содержания УНТ в образце. Так, при добавлении 2,5 % УНТ величина ε' возрастает до 8, что примерно в 2,4 раза превышает ее величину для чистого диоксида кремния. При добавлении 10 % УНТ величина ε' возрастает, в зависимости от частоты излучения, от 36 до 56. Величина ε'' также возрастает с увеличением содержания УНТ в образце, однако в отличие от ε' , которая падает с ростом частоты излучения, частотная зависимость параметра ε'' имеет возрастающий характер. Отношение указанных параметров $\varepsilon''/\varepsilon'$, известное под названием «тангенс угла потерь» $\operatorname{tg} \delta$, при содержании УНТ в образце 25 % примерно на 3 порядка превышает величину, присущую чистому диоксиду кремния. При дальнейшем увеличении содержания

УНТ до 7,5 ... 10 % $\operatorname{tg} \delta$ приближается к единице. Прямые измерения коэффициента пропускания микроволнового излучения синтезированными композициями также указывают на рост коэффициента поглощения микроволнового излучения с увеличением содержания УНТ в образце. Так, при объемном содержании УНТ в образце, равном 10 %, коэффициент пропускания излучения в диапазоне частот 11 ... 12 ГГц достигает 33 дБ, что указывает на отличную поглощающую способность рассматриваемого материала [100, 101].

В Тамбовском государственном техническом университете на кафедре «Техника и технологии машиностроительных производств» выполнены научно-исследовательские работы по применению углеродного наноматериала (УНМ) «Таунит» в качестве модифицирующей добавки в различные полимерные композиты и радиопоглощающие покрытия. В рамках этих работ были выполнены экспериментальные исследования по оценке радиопоглощающих свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ), модифицированных УНМ "Таунит". Исследования проводили в частотном диапазоне радиолокации 8,5...12 ГГц. В качестве показателя эффективности радиопоглощения рассматривали коэффициент отражения исследуемого покрытия на металлической пластине. Предварительно проводили исследования радиотехнических характеристик композиций эпоксидная смола + УНМ (эпоксидная смола холодного отверждения ЭД-10) в волноводе измерительного тракта. Образцы с толщиной от 1,5 до 5 мм и содержанием УНМ 5 и 14 % изготавливали в формах из фторопласта. Определяли диэлектрические характеристики – $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ (тангенс угла диэлектрических потерь и относительная диэлектрическая проницаемость). В табл. 1.2 приведены усредненные значения измеряемых величин. Погрешность измерения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ волноводным мостовым методом составила около $\pm 6 \%$ и $\pm 20 \%$, соответственно. У ферритов, используемых для изготовления радиопоглощающих покрытий (РПП) для стен безэховых камер (например, покрытие типа "Дон"), $\operatorname{tg} \delta$ не превышает 0,9...1,0 [68, 72].

Выявлено, что радиопоглощающие свойства покрытий на основе УНТ «Таунит» толщиной 0,3 мм близки к свойствам поглощающей резины, представляю-

щей собой структуру из конусов высотой 16 мм на общем основании (из той же резины) толщиной 4 мм [68].

1.2. Радиотехнические характеристики исследуемых образцов [68]

Измеряемая радиотехническая характеристика	Содержание УНМ по весу, %	
	5	14
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	4,76	6,8
Тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$	1,6	2,3

В Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского были проведены исследования по определению комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав УНТ и мелкодисперсный графит. Исследуемые образцы, имеющие вид пластин размером 23 x 10 x 1 мм были изготовлены из композитного материала, созданного на основе эпоксидного двухкомпонентного клея (ЭД 20 + полиэтиленполиамин) с различной объемной концентрацией многослойных углеродных нанотрубок. Для сравнения электрофизических свойств полученного композита были также изготовлены образцы с различной объемной долей мелкодисперсного графита (размер частиц ~ 10 мкм). Углеродные нанотрубки были получены газофазным химическим осаждением пропан-бутановой смеси на металлическом катализаторе [42]. Углеродные нанотрубки диспергировались в этиловом спирте при воздействии ультразвука в течение одного часа. Полученная суспензия добавлялась в эпоксидный клей, тщательно перемешивалась до получения однородной массы и заливалась в формочки соответствующего размера. Отверждение клея проходило при комнатной температуре. В результате были получены следующие значения: комплексная диэлектрическая проницаемость УНТ $\epsilon_{cnt} = 62,2 - i \cdot 12,4$; мелкодисперсного графита – $\epsilon_c = 34,3 - i \cdot 13,4$; диэлектрическая проницаемость эпоксидной смолы, выполняющей функцию матрицы композита, равна $\epsilon_0 = 3,36 - i \cdot 0,03$. Из приведенных в [71] зависимостей следует, что величина действительной части диэлектрической проницаемости компози-

та, модифицированного УНТ, больше чем у композита, модифицированного графитом в диапазоне значений объемных долей включений от 0 до 0,2. Однако, коэффициент диэлектрических потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости) образца с мелкодисперсным графитом примерно в 2 раза превышает соответствующую величину для образца с УНТ [68].

В патенте [58] предлагается способ изготовления АИ на гибкой основе с использованием диэлектрического нагрева. При изготовлении АИ на гибкой основе, в основном, используют жидкий бакелит, который во время термообработки имеет значительные потери массы за счет испарения воды. В связи с этим, радиопоглощающие свойства связки во время бакелизации снижаются. В изобретении, кроме вышеописанного способа термообработки, предлагается для повышения радиопоглощающих свойств полуфабрикатов АИ на гибкой основе, вводить в состав связки диэлектрический наполнитель, выбранный из группы: титанат бария, сажа, графит, магнетит, оксид железа, соль четвертичного аммония. Наполнитель предлагается вводить в виде тонкоизмельченного порошка, варьируя его содержанием от 1 до 70 % по массе связки. В качестве связки предполагается использовать терморезистивную связку, например фенолформальдегидную.

1.3.3. Наполнители-адсорбенты для связывания летучих веществ при термообработке абразивных инструментов на бакелитовой связке

Как уже отмечалось ранее в процессе бакелизации АИ на бакелитовой связке выделяются такие летучие вещества, как пары воды, фенол, формальдегид и аммиак, частичное связывание которых позволило бы форсировать режимы термообработки. Как показывает анализ научно-технической информации, наиболее эффективно связывать пары воды можно с помощью сорбентов, способных вступать с водой в химическую реакцию с образованием твердых веществ – гидратов. Гидратами называют соединения, в которых молекула воды присутствует в виде отдельной структурной единицы. [78].

Никитин А. В. при поисках метода ускоренной поликонденсации матриц

ПКМ, использовал следующие виды кристаллогидратов: сульфат магния $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, сульфат кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, гидрат окиси бария $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, железо-аммониевые квасцы $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, сульфат кобальта $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, тетраборат натрия $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, хромкалийсульфат $\text{Cr}(\text{SO}_4)_3\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, сульфат цинка $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, пирофиллит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [42].

Важным критерием выбора потенциальных адсорбентов по мнению А.В. Никитина является их термоустойчивость. По литературным данным [26, 78], реактивный гидратированный сульфат магния должен полностью терять все 7 молекул воды уже при 200 °С. Однако, если взять толстый слой вещества (~ 10 – 15 см), то даже за 2 часа выдержки препарата при 350 °С не удастся достичь полного обезвоживания. Аналогично и даже еще более стойко ведут себя в сходных условиях сульфат кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, гидрат окиси бария $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, хромкалиевые квасцы, сульфаты никеля и цинка и т.д. Гидроксид бария $\text{Ba}(\text{OH})_2$ особенно термоустойчив как сорбент и продолжает поглощать воду при температурах в несколько сотен градусов, даже при атмосферном давлении, частично теряя ее лишь выше 700 °С. Аналогичное устойчивое повышение температуры дегидратации проявляли железо-аммониевые квасцы $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, сульфат кобальта $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, тетраборатнатрия $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, хромкалийсульфат $\text{Cr}(\text{SO}_4)_3\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, сульфат цинка $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, пирофиллит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [26, 42].

Для снижения объема фенола и формальдегида, выделившихся при поликонденсации бакелитовой связки, можно использовать активированный уголь, который прекрасно адсорбирует данные вещества. Активированный уголь – это пористый адсорбент, скелет которого построен из рыхлых и неправильно упакованных пачек, состоящих из сеток 6-членных углеродных колец, менее упорядоченных, чем в графите, и ковалентно связанных с углеродными радикалами, с водородом, а бывает и кислородом. Активированный уголь сильно адсорбирует (физически) органические вещества – углеводороды и многие их производные, слабее адсорбирует низшие спирты, аммиак и особенно плохо – воду. Обычно активиро-

ванный уголь обладает неоднородной поверхностью и пористостью. Различают микропоры размерами 10-20 Å с сильно развитой поверхностью (до 1000 м²/г), поры переходных размеров (50-500 Å) с поверхностью до 100 м²/г и макропоры размерами более 1000 Å и малой поверхностью (около 1 м²/г). Сильная адсорбция происходит в микропорах. В порах переходных размеров наблюдается полимолекулярная адсорбция и капиллярная конденсация паров. Макропоры служат, в основном, транспортными каналами, подводящими молекулы газа и растворённых веществ к внутренним частям зёрен активированного угля. Адсорбция воды, аммиака, низших спиртов и других полярных низкомолекулярных веществ при небольших давлениях паров невелика, но она сильно увеличивается при окислении поверхности угля [78]. Однако активированный уголь, например марки БАУ-А, поставляется достаточно крупной фракцией до 5-10 мм, и для его ввода в формовочную смесь необходимо предварительное измельчение. В процессе измельчения активированного угля, например в шаровой мельнице, до однородной фракции происходит разрушение его скелета до частиц от микро до наноуровня. При этом существенно сокращается удельное число микропор, а макропоры исчезают полностью, что влечет за собой снижение эффективности сорбции фенола и формальдегида.

В качестве сорбентов, способных связать аммиак, можно использовать различные цеолиты. Цеолит – продукт вулканической активности, при которой минералы, пепел и растворы солей сплавляются и кристаллизуются. Подвижность катионов и их способность к ионному обмену определяет высокие сорбционные свойства цеолитов. В упрощенном виде это можно описать так: цеолит "забирает" аммиак и "обменивает его на соль" [78]. Природный цеолит (клиноптилолит) марки ЦПС широко применяется для удаления ионов аммония из воды. Так, наблюдается снижение концентрации ионов аммония в воде с 0,37 мг/л до 0,08-0,04 мг/л при прохождении 80 м³ воды с линейной скоростью 30 м/час через 40 л цеолита ЦПС (высота слоя 1 м) [78]. При использовании цеолита в качестве сорбента при изготовлении ШК на бакелитовой связке он будет поглощать не только аммиак, но и пары воды, фенол и формальдегид. Так, 1 см³ цеолита марки NaX способен

поглотить 135 мг воды.

В качестве сорбентов, при изготовлении шлифовальных кругов, можно использовать также различные глины. Глинистые породы, в состав которых обычно входят материалы с регулярной структурой, являются наиболее распространенными в природе неорганическими сорбентами. Среди них можно выделить природный наноматериал – монтмориллонит. Он имеет первичную микропористую структуру, обусловленную строением составляющих его микрокристаллов силикатов, и вторичную «пластинчатую микропористую» – переходно- и макропористую структуру, возникающую за счет пространства между микрокристаллами. В процессе сорбции вторичная пористая структура способна к расширению за счет увеличения размеров микропор. Этот сорбент обладает значительной емкостью по отношению к полярным веществам (воде, спиртам, аминам), которая по хемосорбционному и молекулярному механизму достигает удвоенного значения катионообменной емкости. Чаще всего монтмориллонит оказывается самым эффективным глинистым минералом для очистки воды от различных органических примесей. Площадь поверхности монтмориллонита по воде достигает 300 – 450 м²/г. Также среди глинистых пород в качестве сорбента можно выделить палыгорскит, который обладает развитой вторичной пористой структурой с микропорами прямоугольного сечения размером 0,37×1,10 нм, которые образуются при соединении ленточных пакетов. При обезвоживании структура палыгорскита изменяется, и каналы минерала приобретают размеры 0,37×0,64 нм. В каналах палыгорскита, в соответствии с их размерами, может адсорбироваться вода, азот, аммиак, метанол. Углеводороды, поверхностно-активные вещества, красители адсорбируются из воды во вторичном пористом пространстве пачек, в которые агрегируются брусоподобные или волокнистые частицы минералов. Он эффективен при сорбции высокомолекулярных соединений. Удельная поверхность по воде для палыгорскита превышает 300 м²/г [78]. Цеолит, также как и активированный уголь, поставляют в виде агрегатов достаточно крупной фракции и при использовании его в качестве наполнителя, он подвергается измельчению. При измельчении разрушается значительное число пор, что приводит к снижению его эффек-

тивности как адсорбента.

В итоге можно заключить, что в настоящее время при изготовлении АИ на ОТС в качестве наполнителей, снижающих выход летучих веществ, в основном используют полуводный гипс, асбестовую пыль, бентонит. Использование графита в качестве наполнителя позволяет снизить мощность шлифования, сил резания и шероховатости обработанной поверхности. В качестве наполнителей, повышающих уровень диэлектрических потерь полуфабрикатов АИ на ОТС, предпочтительно использовать следующие материалы: углеродные нанотрубки, мелкодисперсный графит, сажу, уголь, титанат бария, магнетит, оксид железа, соль четвертичного аммония. Применение наполнителей, повышающих уровень диэлектрических потерь полуфабрикатов АИ на ОТС, позволит повысить энергоэффективность процесса микроволнового нагрева и варьировать скоростью нагрева полуфабрикатов, не изменяя мощности микроволнового излучения. В качестве перспективных наполнителей, снижающих выход летучих веществ, можно выделить сульфат магния, гидрат окиси бария, железо-аммониевые квасцы, сульфат кобальта, сульфат меди, тетраборат натрия, хромкалийсульфат, сульфат цинка, цеолиты и активированный уголь. Применение наполнителей, снижающих выход летучих веществ, позволит повысить скорость нагрева полуфабрикатов и производительность термообработки, а также снизить изменение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов в процессе микроволнового нагрева. Однако повышение производительности операции термообработки вследствие использования специальных наполнителей имеет ограниченный характер, а в ряде случаев, где вмешательство в рецептуру формовочной смеси недопустимо, вообще не имеет места. Далее рассмотрим различные варианты еще одного способа повышения производительности – снижения неравномерности нагрева при микроволновой термообработке.

1.4. Влияние неравномерности микроволнового нагрева полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке на их качество и производительность процесса термообработки. Перспективные направления повышения равномерности микроволнового нагрева

Одним из доминирующих факторов, влияющих на качество АИ на бакелитовой связке, является неравномерность прогрева полуфабрикатов в процессе термообработки. При неравномерном прогреве реактопластов создается неоднородная ориентация макромолекул, а в готовых АИ возникают остаточные напряжения, которые со временем могут вызвать образование микротрещин и его разрушение [48]. Благодаря более равномерному прогреву во время термообработки, увеличивается однородность микроструктуры отвержденного полимерного композиционного материала (ПКМ) [62, 94]. При конвективном способе нагрева повышение равномерности прогрева обеспечивается за счет снижения скорости нагрева полуфабрикатов АИ, т.е. увеличения длительности технологического цикла термообработки. Снижение скорости нагрева при микроволновом способе термообработки в большинстве случаев приведет не к повышению равномерности прогрева, а к увеличению его неравномерности вследствие повышения тепловых потерь с открытых поверхностей термообрабатываемых полуфабрикатов АИ на ОТС. Одним из направлений повышения равномерности прогрева в процессе микроволновой термообработки является повышение равномерности электромагнитного поля в микроволновой камере. В этом направлении выполнено много исследований, по результатам которых предложены конструкции микроволнового оборудования, позволяющие добиться приемлемого распределения микроволнового излучения в рабочей камере, например:

- в работах Морозова Г.А., Потаповой О.В., Седельникова Ю.Е. [40] и Степанова В. В. [66], равномерность нагрева диэлектрика и обеспечение в его объеме равномерного распределения микроволновой энергии достигается либо методами сфокусированной апертуры, либо использованием многоэлементных систем излучателей микроволновой энергии;

- в работе Архангельского Ю.С., Тригорлого С.В. [3] равномерность нагрева диэлектрика повышается за счет применения многоэлементных излучающих систем или использованием перемещающегося излучателя микроволновой энергии;

- в работе Копусова В.Н. и Швыркина Н.В. [21] сформулированы принципы построения многомагнетронных микроволновых установок, обеспечивающих равномерность электромагнитного поля;

- в работе Анфиногентова В.И., Гараева Т.К., Морозова Г.А. [1] при моделировании микроволнового нагрева диэлектрика движущимся излучателем использовалось аналитическое решение, полученное для неподвижного излучателя. Проведено сравнение результатов моделирования с методом конечных разностей.

При микроволновой термообработке изделий с высокими радиопоглощающими свойствами, добиться повышения равномерности прогрева можно путем оптимизации частоты микроволнового излучения, т.е. для каждой рецептуры можно подобрать оптимальную частоту. Однако, для изменения частоты микроволнового поля в микроволновой печи необходимо заменять магнетроны, что неприемлемо в производственных условиях.

Еще одним направлением повышения равномерности прогрева при микроволновой термообработке является снижение тепловых потерь с поверхностей полуфабрикатов АИ. Коллективом ученых (Худобин Л.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М. и др.) предложены способы термической обработки полуфабрикатов АИ на ОТС [51, 52], согласно которым полуфабрикаты АИ перед микроволновой термообработкой помещают в теплоизолированный радиопрозрачный контейнер-термостат. В процессе микроволновой термообработки осуществляют принудительное равномерное удаление летучих веществ из свободного объема термостата, исключая возможность достижения парами летучих веществ состояния насыщения при сохранении максимально возможного эффекта теплоизоляции рабочей зоны термостата и обеспечения разброса температуры полуфабрикатов внутри термостата, не превышающего $\pm 10 \%$ от ее среднего уровня. Удаление летучих веществ осуществляется потоком воздуха через щели, выполненные в передней и задней стенках термостата. После достижения температуры полной полимериза-

ции термореактивной связки и выдержки при этой температуре термостат извлекают из микроволновой камеры и выдерживают полуфабрикаты АИ в термостате до снижения их температуры до 80 °С, после чего открывают термостат.

В работе [6] представлены результаты моделирования тепловых процессов в садке полуфабрикатов ШК в процессе их микроволновой бакелизации по вышеприведенному способу. Описан алгоритм численного решения математических моделей и проведена его программная реализация в среде *Borland® Delphi™ 7*. Разработанная программа Svch может работать на любом современном компьютере под управлением операционной системы *Windows* и требует от инженера лишь начальных навыков работы на компьютере. Программа расчета температур при нагреве садки полуфабрикатов АИ микроволновой энергией, выполненная по модульному принципу, имеет два основных (формирования микроволнового поля в камере бакелизации и собственно моделирования процесса нагрева садки) и несколько вспомогательных блоков: ввода исходных данных; формирования садки полуфабрикатов; графического отображения текущего состояния энергетического или температурного полей; вывода текущего изображения поля (энергетического или температурного) в файл для сохранения и дальнейшей обработки и др. (рис. 1.13) [77].

При моделировании тепловых процессов было сделано допущение, что основной поток воздуха проходит сквозь верхнюю область камеры бакелизации (над термостатом), в которой размещены магнетроны. Вентиляция термостата осуществляется медленным (менее 0,1 м/с) потоком воздуха, что реализуется созданием окон в виде узких щелей в верхней части передней и задней стенок термостата (см. рис. 1.14).

Учитывая малую скорость (менее 0,1 м/с) движения потоков воздуха внутри термостата также было сделано допущение о постоянной по высоте и ширине (в направлениях, перпендикулярных вектору движения потока воздуха) термостата температуре воздуха. Также в процессе моделирования не учитывался перенос тепла за счет теплового излучения от стопки полуфабрикатов к стопке и от стопки к стенкам термостата. В связи с чем, в результате численного моделирования ин-

женер-проектировщик получает температурные поля в определенном сечении садки полуфабрикатов АИ, где градиент температур зависит, в основном, только от неравномерности электромагнитного поля (рис. 1.15).

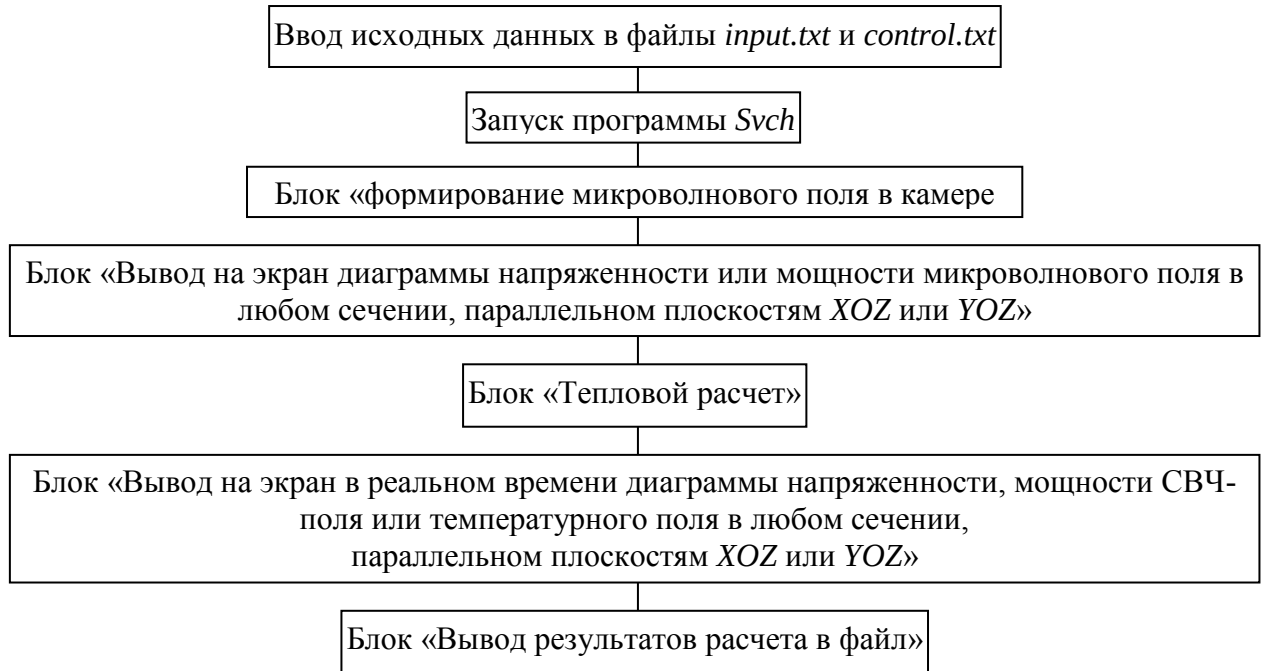


Рис. 1.14. Блок-схема программы расчета распределения микроволновой энергии в садке полуфабрикатов и процесса ее нагрева по заданному циклу [77]

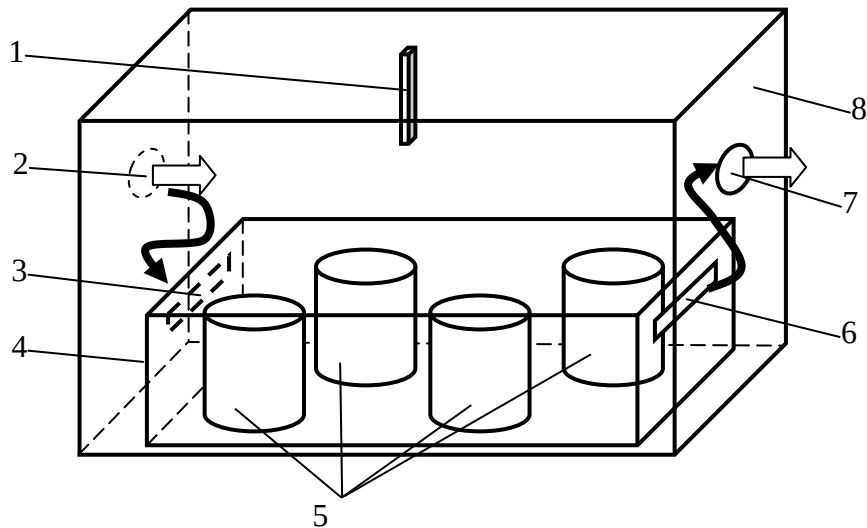


Рис. 1.15. Схема вентиляции камеры СВЧ-бакелизации [77]: 1 – излучатель магнетрона; 2 – окно притока свежего воздуха в камеру; 3 – окно притока воздуха в термостат; 4 – термостат; 5 – стопка полуфабрикатов; 6 – окно вытяжки воздуха из термостата; 7 – окно вытяжки воздуха из камеры; 8 – камера бакелизации. Стрелками показаны направления тока воздуха

Разработанная программа не позволяет провести моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов без использования термостата и оценить эффект (снижение градиента температур) от его использования. Также программа не позволяет проводить моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов при использовании других видов теплоизоляции полуфабрикатов АИ.

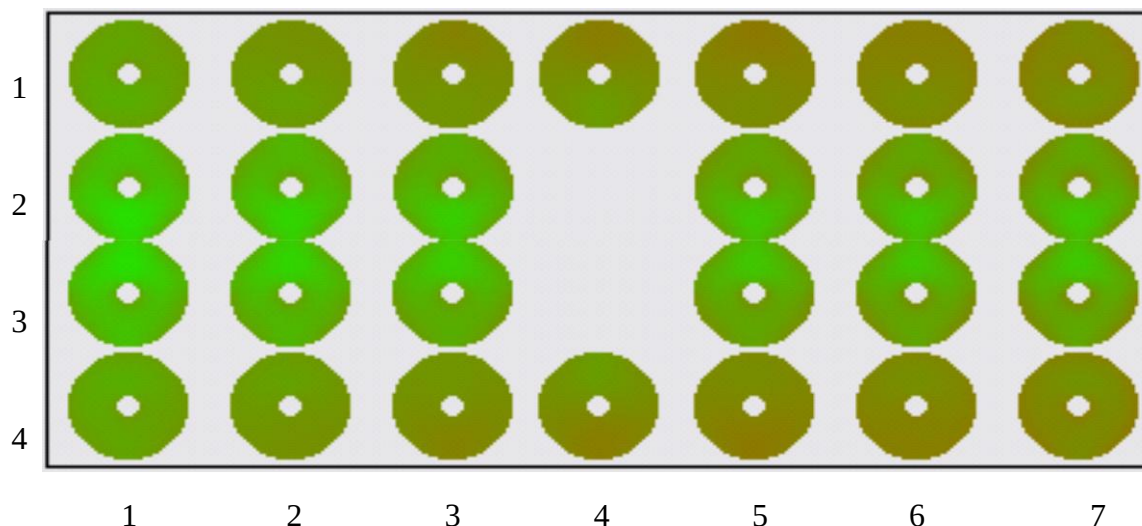


Рис. 1.16. Температурное поле садки полуфабрикатов шлифовальных кругов 1 150' 25' 32 на уровне (по высоте) $z = 64$ мм при нагреве садки до 230 °С [77]: 1 – 7 номера продольного и поперечного рядов стопок полуфабрикатов

В 2011 году был предложен еще один способ термической обработки полуфабрикатов АИ на ОТС [53], направленный на снижение градиента температур, согласно которому в процессе микроволновой термообработки воздух, поступающий в теплоизолированный радиопрозрачный термостат, нагревают до температуры полуфабрикатов, которую контролируют с помощью устройства, установленного в термостате. Однако реализация данного способа приведет к существенному увеличению энергоемкости процесса и стоимости установки.

Соискателем в составе группы сотрудников УлГТУ был предложен новый способ микроволновой термообработки полуфабрикатов из композиционных материалов на ОТС, позволяющий увеличить равномерность микроволнового нагрева, а также проведены предварительные исследования его эффективности [54].

Согласно разработанному способу полуфабрикаты перед термообработкой размещают в открытом радиопрозрачном контейнере внутри термостатирующего

слоя из теплоизолирующего парогазопроницаемого радиопрозрачного сыпучего материала с высоким коэффициентом диффузного отражения в инфракрасном диапазоне. После укладки полуфабрикатов на дно радиопрозрачного контейнера, проводят засыпку полуфабрикатов упомянутым теплоизолирующим материалом с формированием термостатирующего слоя над и между полуфабрикатами, а также между боковыми краями садки полуфабрикатов и стенками контейнера. После завершения полного цикла термообработки и извлечения контейнера из микроволновой камеры материал термостатирующего слоя удаляют с помощью пневмоустройства в емкость-накопитель.

В качестве сыпучих материалов для формирования упомянутого термостатирующего слоя, внутри которого проводится микроволновая термообработка полуфабрикатов, могут быть использованы сыпучие теплоизолирующие материалы, обладающие радиопрозрачностью и парогазопроницаемостью, с рабочей температурой не менее 500 °С и высоким коэффициентом диффузного отражения инфракрасного излучения, например: вермикулит вспученный, перлит, гранулы вспененного жидкого стекла с различными наполнителями и др.

Исследования эффективности данного метода показали, что его применение позволяет существенно снизить градиент температур в сечении садки полуфабрикатов в процессе их микроволнового нагрева.

Как было отмечено в п. 1.2, термообработка полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке состоит из нескольких этапов, каждый из которых характеризуется определенной скоростью нагрева. При этом второй этап (этап с меньшей скоростью нагрева) начинается тогда, когда максимальная температура стопки полуфабрикатов достигнет критического значения. Третий этап (этап с большей скоростью нагрева) начинается, когда минимальная температура стопки превысит определенную отметку. В связи с этим повышение равномерности микроволнового нагрева позволит существенно снизить длительность второго этапа (этапа с меньшей скоростью нагрева) и повысить производительность процесса термообработки полуфабрикатов АИ вне зависимости от наличия наполнителей.

Таким образом показано, что неравномерный прогрев во время термообработ-

ки АИ на ОТС приводит к появлению остаточных напряжений, которые со временем могут вызвать образование микротрещин и разрушение АИ. Неравномерность нагрева в процессе микроволновой термообработки возникает, в основном, из-за неравномерности электромагнитного поля в рабочей камере и тепловых потерь с поверхностей полуфабрикатов. Решению первой проблемы посвящено множество исследований, по результатам которых предложены конструкции микроволнового оборудования, позволяющие добиться приемлемого распределения микроволнового излучения в рабочей камере. Для снижения тепловых потерь с поверхностей полуфабрикатов АИ на ОТС в процессе микроволнового нагрева и повышения равномерности их прогрева, одним из наиболее перспективных является использование способа термообработки, включающего засыпку полуфабрикатов сыпучим радиопрозрачным теплоизолирующим материалом. В качестве теплоизолирующего материала может быть использован сыпучий материал, отвечающий ряду требований:

- низкий уровень диэлектрических потерь (высокий уровень прозрачности в микроволновом диапазоне);
- низкая теплопроводность;
- высокая термостойкость (до 500 °С) и химическая стойкость.

Применение термостатирования полуфабрикатов АИ таким материалом позволит повысить производительность и энергоэффективность процесса, а также добиться повышения качества АИ на ОТС (снижение остаточных напряжений, микротрещин, увеличения однородности микроструктуры и твердости АИ).

1.5. Выводы. Цель и задачи исследования

На основе анализа научно-технической и патентной информации можно сделать следующие выводы:

1. АИ на ОТС является одним из наиболее широко применяемых, подавляющую часть которого изготавливают на бакелитовой связке.
2. Наиболее длительной и энергоемкой операцией технологического процесса

изготовления АИ на ОТС является операция термообработки полуфабрикатов, которая во многом определяет работоспособность АИ.

3. Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования технологии АИ на ОТС является применение в процессе термообработки микроволнового нагрева, позволяющего повысить в несколько раз производительность процесса и качество АИ.

4. Факторами, препятствующими широкому распространению технологии изготовления АИ на ОТС с использованием микроволнового нагрева, являются тепловые потери с поверхностей полуфабрикатов в процессе термообработки и недостаточные радиопоглощающие свойства полуфабрикатов определенных рецептур.

5. В настоящее время при изготовлении АИ на ОТС в качестве наполнителей, снижающих выход летучих веществ, используют полуводный гипс, асбестовую пыль, бентонит. Для снижения мощности шлифования, сил резания и шероховатости обработанной поверхности используют графит.

6. В качестве наполнителей, повышающих уровень диэлектрических потерь полуфабрикатов АИ на ОТС, предпочтительно использовать следующие материалы: углеродные нанотрубки, мелкодисперсный графит, сажа, уголь, оксид железа. Применение наполнителей, повышающих уровень диэлектрических потерь полуфабрикатов АИ на ОТС, позволит повысить энергоэффективность процесса микроволнового нагрева и варьировать скоростью нагрева полуфабрикатов, не изменяя мощности микроволнового излучения.

7. В качестве перспективных наполнителей, снижающих выход летучих веществ, можно применять сульфат магния, гидрат окиси бария, железо-аммониевые квасцы, цеолиты и активированный уголь. Применение наполнителей, снижающих выход летучих веществ, позволит повысить скорость нагрева полуфабрикатов и производительность термообработки, а также снизить изменение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов в процессе микроволнового нагрева.

8. Для снижения тепловых потерь с поверхностей полуфабрикатов АИ на ОТС

в процессе микроволнового нагрева и повышения равномерности их прогрева предпочтительно использовать способ термообработки, включающий засыпку полуфабрикатов сыпучим радиопрозрачным теплоизолирующим материалом. Применение термостатирования полуфабрикатов АИ таким материалом позволит повысить производительность и энергоэффективность процесса, а также добиться повышения качества АИ на ОТС (снижение остаточных напряжений, микротрещин, увеличения однородности микроструктуры и твердости АИ).

Целью данной работы является повышение производительности изготовления и улучшение качества абразивного инструмента на основе совершенствования микроволновой технологии бакелизации полуфабрикатов путем применения специальных наполнителей и термостатирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать выбор наполнителей ОТС АИ, повышающих способность поглощать энергию микроволнового излучения и снижающих количество выделяющихся в процессе термообработки низкомолекулярных летучих веществ.
2. Выполнить моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов, модифицированных радиопоглощающими наполнителями, с целью обеспечения возможности управления радиопоглощающими свойствами полуфабрикатов АИ.
3. Выполнить математическое и численное моделирование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ при их термостатировании различными технологическими средствами с целью выявления оптимальных параметров последних и определения минимально возможной длительности цикла термообработки.
4. Провести экспериментальные исследования влияния специальных наполнителей и нового способа термостатирования полуфабрикатов АИ на ОТС на производительность микроволновой термообработки.
5. Выполнить исследование влияния наполнителей и нового способа термостатирования полуфабрикатов на структуру и твердость АИ.
6. Провести экспериментальные исследования работоспособности ШК, изготовленных с использованием специальных наполнителей и термостатирования

при микроволновом нагреве.

7. Провести опытно-промышленные испытания АИ на бакелитовой связке, термообработанных при микроволновом нагреве.

8. Разработать рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления АИ на ОТС с использованием микроволнового нагрева.

Глава 2. Теоретические исследования влияния специальных наполнителей и термостатирования полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке на процесс их термообработки микроволновым излучением

2.1. Расчёт количества летучих веществ, выделяющихся при бакелизации полуфабрикатов абразивного инструмента на бакелитовой связке

2.1.1. Расчёт количества летучих веществ, выделяющихся при полимеризации фенольного порошкообразного связующего

Как показано в главе 1, в процессе термообработки из полуфабрикатов АИ на ОТС выделяются летучие продукты – пары воды, свободный фенол, аммиак и формальдегид. Наблюдается усадка связки, а с ней и полуфабрикатов АИ, увеличивается плотность связки, повышается коэффициент ее преломления [4]. При повышении скорости нагрева увеличивается интенсивность выделения летучих веществ, что приводит к деформации и вспучиванию полуфабрикатов. Подобрать специальные наполнители, способные связать летучие вещества, можно существенно повысить скорость термообработки полуфабрикатов АИ. Для решения этой задачи необходимо знать количество каждого летучего вещества, выделяющегося в процессе термообработки, и определить тем самым вещество, оказывающее наибольшее влияние на процесс деформации полуфабрикатов. Объективную оценку количеству выделившихся в процессе термообработки летучих веществ можно дать, взяв за основу методику, предложенную в статье [40] для АИ на бакелитовой связке, как наиболее распространенного представителя АИ на ОТС.

В работе [66] показано, что в выделяющихся газах при бакелизации фенольного порошкообразного связующего доля аммиака по массе составляет 95 %, оставшиеся 5 % приходится на долю фенола, формальдегида и воды. Мольное соотношение формальдегида и фенола имеет вид $(0,75 - 0,85):1$, для расчетов принимаем $0,8:1$ [40].

Рассчитаем молярную массу каждого вещества, выделяющегося при поликонденсации:

$$M(C_6H_5OH) = 6 \cdot M(C) + 5 \cdot M(H) + M(O) + M(H) = 94 \text{ г/моль}; \quad (2.1)$$

$$M(CH_2O) = M(C) + 2 \cdot M(H) + M(O) = 30 \text{ г/моль}; \quad (2.2)$$

$$M(NH_3) = M(N) + 3 \cdot M(H) = 17 \text{ г/моль}; \quad (2.3)$$

$$M(H_2O) = 2 \cdot M(H) + M(O) = 18 \text{ г/моль}, \quad (2.4)$$

где $M(C_6H_5OH)$, $M(CH_2O)$, $M(NH_3)$, $M(H_2O)$, $M(C)$, $M(H)$, $M(O)$, $M(N)$ – молярная масса соответственно фенола, формальдегида, аммиака, воды, углерода, водорода, кислорода и азота, г/моль.

Для расчета соотношения количества фенола, формальдегида и воды в 5 г выделяющихся газов принимаем: x – масса фенола, г; y – масса формальдегида, г; z – масса воды, г, x_1 – количество молей фенола; y_1 – количество молей формальдегида; z_1 – количество молей воды, тогда:

$$x + y + z = 5. \quad (2.5)$$

При этом:

$$x = x_1 M(C_6H_5OH); y = y_1 M(CH_2O); z = z_1 M(H_2O). \quad (2.6)$$

При поликонденсации фенольного порошкообразного связующего из 1 моля фенола и 0,8 моля формальдегида выделяется 0,5 моля воды [23, 66]. По закону Авогадро 1 моль любого газа при нормальных условиях (0 °С и 760 мм.рт.ст.) занимает объём 22,416 л. Следовательно соотношения между x_1 , y_1 , z_1 будут иметь следующий вид: $y_1 = 0,8 \cdot x_1$, $z_1 = 0,5 \cdot x_1$, тогда выражение (2.5) примет вид:

$$94x_1 + 30y_1 + 18z_1 = 5; \quad (2.7)$$

$$94x_1 + 0,8 \times 30x_1 + 0,5 \times 18x_1 = 5; \quad (2.8)$$

$$x_1 = 5/127 = 0,0394; y_1 = 0,8 \cdot x_1 = 0,0315; z_1 = 0,5 \cdot x_1 = 0,0197 \quad (2.9)$$

$$x = 3,7 \text{ г}; y = 0,9 \text{ г}; z = 0,4 \text{ г}.$$

В конечном итоге, получаем следующее распределение летучих веществ: 95 % – аммиак; 3,7 % – фенол; 0,9 % – формальдегид; 0,4 % – вода.

Обозначим расход порошкообразного связующего при изготовлении АИ как S , г, на 1 кг АИ. Потеря массы порошкообразного связующего при бакелизации составляет 2,0 %. Следовательно, при бакелизации связующего, необходимого

для изготовления 1 кг АИ на бакелитовой связке, выделится $0,02 \cdot C$ летучих веществ. Массу конкретного летучего вещества, выделившегося при бакелизации АИ, можно определить по следующим зависимостям:

$$m_{an} = 95 \cdot 0,02 \cdot C / 100 \% = 1,9 \cdot 10^{-2} C \text{ г/кг}; \quad (2.10)$$

$$m_{fn} = 3,7 \cdot 0,02 \cdot C / 100 \% = 7,4 \cdot 10^{-4} C \text{ г/кг}; \quad (2.11)$$

$$m_{форн} = 0,9 \cdot 0,02 \cdot C / 100 \% = 1,8 \cdot 10^{-4} C \text{ г/кг}; \quad (2.12)$$

$$m_{en} = 0,4 \cdot 0,02 \cdot C / 100 \% = 8 \cdot 10^{-5} C \text{ г/кг}, \quad (2.13)$$

где m_{an} , m_{fn} , $m_{форн}$, m_{en} – масса соответственно аммиака, фенола, формальдегида и паров воды, выделившихся при бакелизации 1 кг полуфабрикатов АИ за счет поликонденсации фенольного порошкообразного связующего, г.

2.1.2. Расчет количества летучих веществ, выделяющихся при полимеризации жидкого бакелита

Расчет произведем для жидкого бакелита марки БЖ-3 ОКП 22 2122 0103, процесс полимеризации в микроволновом поле которого был исследован Худобиным Л.В., Веткасовым Н.И. и Михайлиным С.М. [77]. Согласно ГОСТ 4559 «Бакелит жидкий», физико-химические показатели жидкого бакелита данной марки должны соответствовать следующим значениям:

- массовая доля свободного фенола – 8 ... 16 %;
- массовая доля воды, не более – 19 %;
- потери при поликонденсации, не более – 30 %.

Для расчета принимаем следующие значения физико-химических показателей жидкого бакелита, определенные в работе [6]:

- потеря массы при поликонденсации за счет выделения фенола Δm_{ϕ} – 11 %;
- потеря массы при поликонденсации за счет выделения паров воды Δm_e – 18 %;
- общая потеря массы жидкого бакелита при поликонденсации Δm – 29 %.

Обозначим расход жидкого бакелита как B , г, на 1 кг АИ. Следовательно, при бакелизации 1 кг АИ масса выделившихся летучих веществ составит:

$$m_{фжс} = B \cdot \Delta m_{ф} / 100 \% = 0,11 \cdot B; \quad (2.14)$$

$$m_{вжс} = B \cdot \Delta m_{в} / 100 \% = 0,18 \cdot B, \quad (2.15)$$

где $m_{фжс}$, $m_{вжс}$ – масса соответственно фенола и паров воды, г, выделившихся при бакелизации 1 кг полуфабрикатов АИ за счет поликонденсации жидкого бакелита.

2.1.3. Расчет количества летучих веществ при бакелизации полуфабрикатов шлифовальных кругов

Вероятность возникновения деформаций в полуфабрикатах АИ во время их термообработки повышается при увеличении процентного содержания бакелитовой связки, т.е. при необходимости изготовления АИ высокой твердости, в связи с чем, расчет будем производить для полуфабрикатов АИ со степенью твердости U (BT), понизить риск возникновения деформаций которых является наиболее сложной задачей. Для изготовления 1000 кг АИ на бакелитовой связке этой твердости, требуется 869,6 кг абразивного зерна, 39,1 кг жидкого бакелита (B), 78,3 кг фенольного порошкообразного связующего (C) и 13 кг гипса. Исходя из зависимостей (2.10 – 2.15), можно определить массу летучих веществ, выделяющихся при бакелизации 1 кг полуфабрикатов АИ:

$$m_{в} = m_{вп} + m_{вжс} = 0,18 \cdot B + 0,00008 \cdot C = 7,044 \text{ г}; \quad (2.16)$$

$$m_{ф} = m_{фп} + m_{фжс} = 0,11 \cdot B + 0,0007 \cdot C = 4,356 \text{ г}; \quad (2.17)$$

$$m_{а} = m_{ап} = 0,019 \cdot C = 1,488 \text{ г}; \quad (2.18)$$

$$m_{фор} = m_{форп} = 0,00022 \cdot C = 0,017 \text{ г}. \quad (2.19)$$

Так как в процессе бакелизации указанные выше вещества находятся в газообразном состоянии, то необходимо найти их объем. Для определения плотности вещества воспользуемся зависимостью:

$$\rho = \frac{M}{V_m}, \quad (2.20)$$

где M – молярная масса газа, г/моль, V_m – молярный объем, л/моль (при нормальных условиях равен 22,4 л/моль).

Общий объем летучих веществ, выделяющихся в процессе бакелизации 1000

кг полуфабрикатов АИ, составляет $11,82 \text{ м}^3$, при этом объем паров воды составляет 74,5 % от общего объема (табл. 2.1). Кроме того вода обладает высокими радиопоглощающими свойствами, и ее потеря в процессе поликонденсации приведет к снижению радиопоглощающих свойств полуфабрикатов АИ. Таким образом, доминирующее влияние на процесс деформации полуфабрикатов АИ при их бакелизации оказывают именно пары воды, связать которые следует в первую очередь для обеспечения возможности повышения скорости нагрева при термообработке полуфабрикатов АИ и неизменности их радиопоглощающих свойств в процессе микроволнового нагрева. Связывание вредных летучих веществ, таких как фенол, формальдегид и аммиак, может привести к их выделению в процессе шлифования и ухудшению условий труда рабочего. В связи с этим далее произведем расчет количества наполнителей-сорбентов, необходимого для связывания в процессе бакелизации АИ только паров воды.

2.1. Количество летучих веществ, выделившихся при бакелизации 1000 кг АИ

Летучее вещество	Масса, кг	Плотность, кг/м ³	Объем, м ³
Пары воды	7,044	0,8	8,81
Фенол	4,356	4,2	1,04
Аммиак	1,488	0,76	1,96
Формальдегид	0,017	1,34	0,01

2.1.4. Расчет количества наполнителей-сорбентов, необходимого для связывания паров воды при бакелизации АИ

Как показал анализ научно-технической информации, приведенный в главе 1, в качестве наполнителей-сорбентов, способных связать пары воды, наиболее эффективно использовать вещества, образующие в процессе химической реакции с водой кристаллогидраты:



где K – вещество, способное образовывать кристаллогидраты.

Рассчитав молярную массу кристаллогидрата и зная количество присоединенных к нему молекул воды, можно рассчитать процентное содержание воды ϑ в данном соединении:

$$\vartheta = \frac{n \cdot M_B}{M_K} \cdot 100\%, \quad (2.22)$$

где n – количество молекул воды в кристаллогидрате, M_B – молярная масса воды (18 г/моль), M_K – молярная масса кристаллогидрата, г/моль.

Характеристика ϑ показывает массовое соотношение дегидратированного наполнителя-сорбента и связанных им паров воды. Результаты расчетов, стоимость различных кристаллогидратов в зависимости от чистоты (квалификации) представлены в таблице 2.2. По чистоте различают следующие квалификации химических реактивов: Т – технический (низшая квалификация химического реактива, содержание основного компонента выше 70%), ЧДА – чистый для анализов (квалификация химического реактива, содержание основного компонента может быть выше или значительно ниже 98 %, в зависимости от области применения), Ч – чистый (квалификация химического реактива, содержание основного компонента (без примесей) 98 % и выше), ХЧ – химически чистый (высшая степень чистоты химического реактива, содержание основного компонента более 99 %.), ОСЧ – особо чистый (квалификация установлена для веществ высокой чистоты. К особо чистым относятся вещества более высокой степени чистоты по сравнению с соответствующими химическими реактивами высшей из существующих квалификаций).

Минимальную массу наполнителя-сорбента, необходимого для связывания определенного количества паров воды, можно определить по зависимости:

$$m_C = m_K - m_B = \frac{m_B \cdot 100 \%}{\vartheta} - m_B = m_B \left(\frac{100 \%}{\vartheta} - 1 \right), \quad (2.23)$$

где m_K – масса кристаллогидрата, образующегося в процессе химической реакции, кг; m_B – масса паров воды, связанных в процессе химической реакции, кг.

2.2. Сравнительные характеристики различных кристаллогидратов

№ п/п	Наименование кристаллогидрата	Молярная масса, г/моль	Процентное содержание воды ϑ , %	Стоимость*, руб./кг	Квалификация
1	Сульфат магния $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246	51,2	38	-
				28 – 32	Т. – Ч, 7-вод.
				35 – 40	ЧДА – ХЧ, 7-вод.
				60	ОСЧ, 7-вод.
2	Сульфат кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172	20,9	8,33	Гипс ГВВС-16
				70 – 85	Ч – ЧДА, 2-водный
				77 – 84	Ч – ЧДА, безводный
3	Гидрат окиси бария $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	315	45,7	70 – 77	Ч – ЧДА, 8-вод.
				85	ХЧ, 8-вод.
4	Сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	250	36	136 – 155	Ч – ЧДА, 5-вод.
				175	Ч, основная
5	Сульфат цинка $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	287	43,9	40 – 45	Т
				7	ХЧ, 7-вод.
				58 – 65	Ч – ЧДА, 7-вод.
6	Сульфат кобальта $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	281	44,8	700 – 770	Ч – ЧДА, 7-вод.
7	Железо-аммониевые квасцы $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	482	44,8	260 – 280	Ч. – ЧДА

* – Цены на 19.02.2013 г. без учета НДС и транспортных расходов.

При бакелизации 1000 кг АИ (рецептура представлена в п. 2.1.3.) выделится, как было рассчитано выше, 7,044 кг паров воды. Исходя из этого, по зависимости (2.4) был рассчитан минимальный расход различных наполнителей-сорбентов на 1000 кг АИ (табл. 2.3).

Таким образом, на основании проведенного анализа, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным сорбентом, способным связать пары воды при бакелизации АИ, по критерию «цена-качество» является сульфат магния. Однако,

даже самые эффективные сорбенты в силу условий процесса термообработки не в состоянии связать абсолютно все выделяющиеся пары воды, а при приближении к температуре 200 °С образованный наполнителем кристаллогидрат постепенно начнет разлагаться с выделением паров воды. Кроме этого, потеря воды, как отличного радиопоглощающего материала (на частоте 2450 МГц), влечет за собой снижение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов АИ и скорости их нагрева в СВЧ-поле. В связи с этим, для обеспечения эффективного процесса микроволновой термообработки необходимо принять меры по увеличению СВЧ-поглощающих свойств полуфабрикатов АИ в диапазоне температур 20...200 °С.

2.3. Минимальное количество наполнителей-сорбентов, необходимое для связывания паров воды, выделяющихся при бакелизации 1000 кг АИ

№ п/п	Наименование наполнителя-сорбента	Масса наполнителя, кг	Содержание наполнителя в связке АИ, %	Содержание наполнителя в полуфабрикате АИ, %
1	Сульфат магния	6,71	5,4	0,67
2	Сульфат кальция	26,65	18,5	2,67
3	Гидрат окиси бария	8,37	6,7	0,84
4	Сульфат меди	12,5	9,6	1,25
5	Сульфат цинка	8,61	6,8	0,86
6	Сульфат кобальта	8,68	6,9	0,87
7	Железо-аммониевые квасцы	8,68	6,9	0,87

2.2. Исследование влияния физических параметров и содержания в связке АИ радиопоглощающих наполнителей на допустимую скорость микроволнового нагрева полуфабрикатов

2.2.1. Нагрев полуфабрикатов АИ при однократном прохождении электромагнитной волны

Неметаллические материалы полупрозрачны для СВЧ-энергии. Микроволновое поле проникает в такие материалы на значительную глубину, которая зависит от их свойств. Взаимодействуя со средой на атомном и молекулярном уровне, эти поля влияют на движение электронов. Ионы из-за своей большой массы не в состоянии взаимодействовать с СВЧ полем. Электроны в таких материалах движутся более или менее свободно в зависимости от значений диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь. Движение электронов, связанное с диэлектрической проницаемостью, носит упругий характер и по существу приводит к запасанию энергии. Если движение электронов выходит за пределы упругости, характерные для данного материала, то происходит преобразование СВЧ энергии в теплоту через гистерезис.

Величина диэлектрической проницаемости среды является комплексным числом [66]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon'^* - i\varepsilon''^*, \quad (2.24)$$

где ε'^* , ε''^* – действительная и мнимая составляющие диэлектрической проницаемости, Ф/м.

Знак минус показывает, что изменения в поляризующемся материале происходят с некоторой задержкой по отношению к изменениям поля. Комплексная диэлектрическая проницаемость связана с диэлектрической проницаемостью вакуума и относительной диэлектрической проницаемостью [44]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \varepsilon, \quad (2.25)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная), Ф/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

Величина относительной диэлектрической проницаемости также является комплексным числом [44]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'', \quad (2.26)$$

где ε' , – действительная составляющая относительной диэлектрической проницаемости, ε'' – мнимая составляющая относительной диэлектрической проницаемости (коэффициент диэлектрических потерь).

Отношение мнимой составляющей относительной диэлектрической проницаемости к действительной определяет тангенс угла диэлектрических потерь [66]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (2.27)$$

Предположим, что электромагнитное поле изменяется во времени по гармоническому закону. Тогда, в произвольной точке с координатой x напряженность электрического поля в момент времени t та же, что в точке $x = 0$ в более ранний момент времени $(t - x/c)$. Уравнение бегущей гармонической волны напряженности электрического поля, распространяющейся в положительном направлении оси x со скоростью c (рис. 2.1), имеет вид:

$$E = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (2.28)$$

где E_0 – амплитуда напряженности электромагнитного поля, В/м; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с; f – частота приложенного поля, Гц, c – скорость света в вакууме, м/с; t – время, с; x – расстояние на которое распространилось возмущение, м.

При движении электромагнитной волны в среде с определенной диэлектрической проницаемостью она затухает вследствие уменьшения амплитуды ее напряженности по экспоненциальному закону [44]:

$$E_x = E_0 \exp(-kx), \quad (2.29)$$

где k – постоянная затухания, м^{-1} ; x – глубина, на которой определяется величина E_x , м.

При достижении глубины x значения $1/k$, величина амплитуды напряженности E_x уменьшается в e раз по сравнению с E_0 . Уровень, на котором амплитуда напряженности E_x составляет 37 % от первоначального значения E_0 называют глубиной

проникновения [44]:

$$l = \frac{1}{k} . \quad (2.30)$$

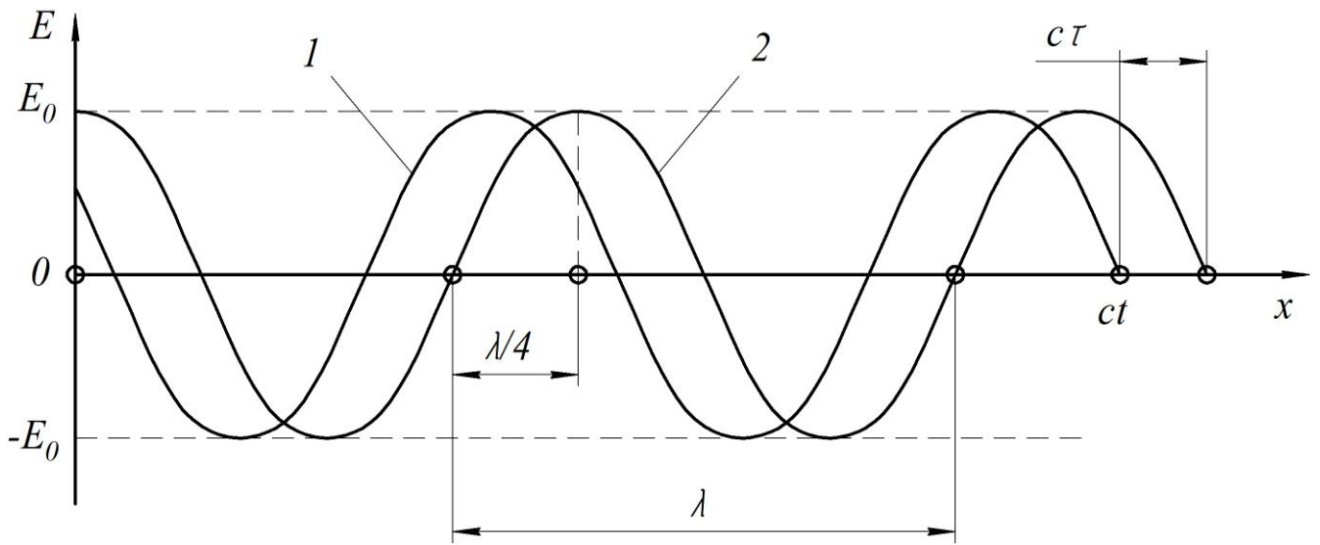


Рис. 2.1. Гармоническое возмущение электромагнитного поля, движущегося в пространстве без потерь в моменты времени t (кривая 1) и $(t + \tau)$ (кривая 2)

Напряженность электромагнитного поля изменяется в пространстве с периодичностью λ , а амплитуда волны заключается между экспоненциальными огибающими, определяемыми постоянной затухания k (рис. 2.2, а). В полярных координатах амплитуда волны может быть представлена радиусом-вектором, который вращаясь по часовой стрелке по мере увеличения глубины x описывает логарифмическую спираль (рис. 2.2, б) [73].

При малой величине коэффициента диэлектрических потерь постоянная затухания определяется следующим выражением [44]:

$$k = \frac{2\pi f \epsilon''}{c \sqrt{\epsilon'}} \quad (2.31)$$

Удельная мощность тепловой энергии q_{mw} , выделенной в материале полуфабриката за счет воздействия на него микроволнового поля (в Вт/м³), определяется следующим выражением [2]:

$$q_{mw} = 0,5 \epsilon_0 \epsilon'' \omega E^2 = \pi \epsilon_0 \epsilon'' f E^2, \quad (2.32)$$

где E – амплитуда напряженности электрического поля, В/м.

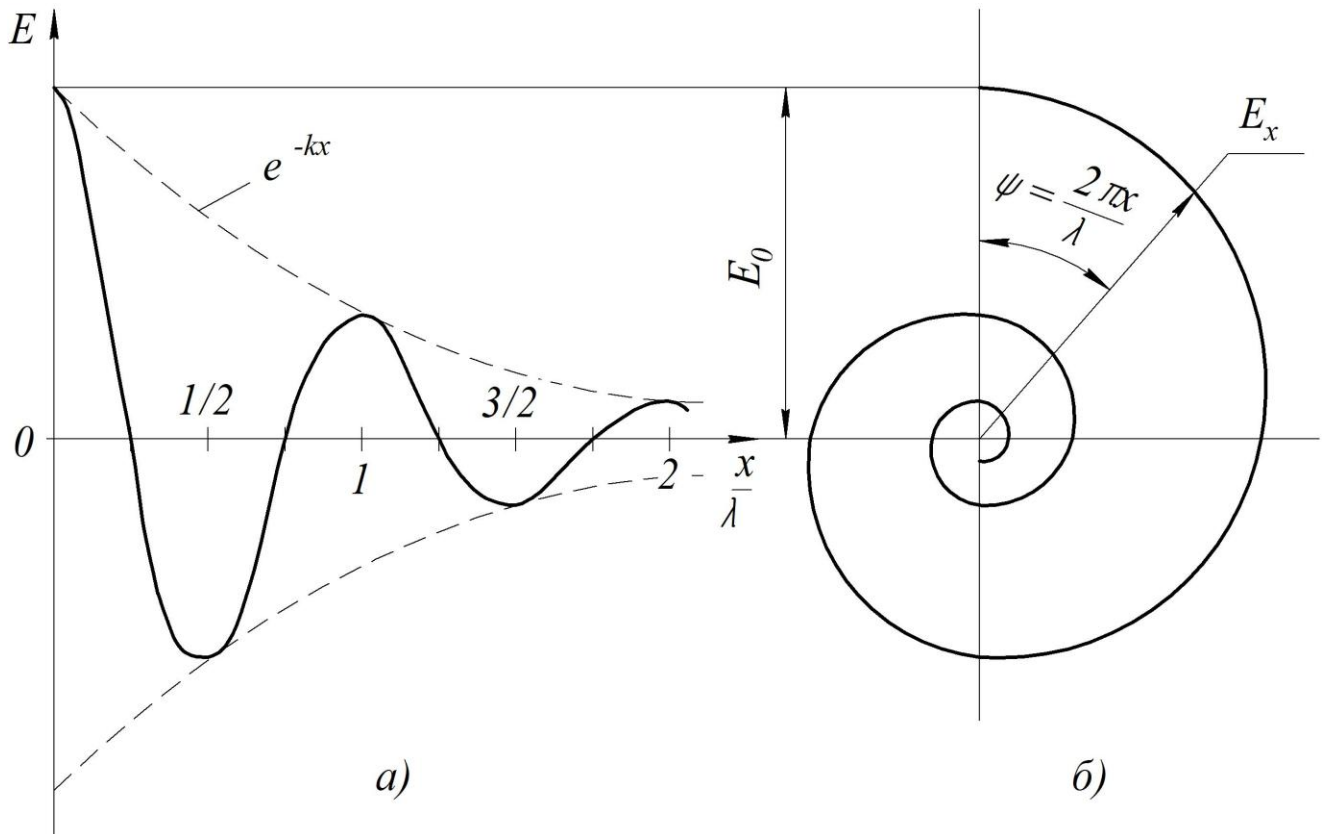


Рис. 2.2. Затухающая электромагнитная волна в пространстве: а – в декартовой системе координат; б – в полярной системе координат [73]

Энергия, затрачиваемая на нагрев тела, определяется по зависимости:

$$Q = c_T m \Delta T, \quad (2.33)$$

где c_T – удельная теплоемкость тела, Дж/(кг·°C); m – масса тела, кг; ΔT – изменение температуры тела, °C ($\Delta T = T_2 - T_1$);

Удельную мощность энергии, необходимой для нагрева тела до температуры T_2 (в Вт/м³), в этом случае можно определить по следующей зависимости:

$$q_T = \frac{Q}{Vt} = \frac{c_T m \Delta T}{Vt} = \frac{c_T \rho \Delta T}{t}, \quad (2.34)$$

где V – объем тела, м³; t – время нагрева, с; ρ – плотность тела, кг/м³.

Если в процессе микроволнового воздействия на элементарный объем его температура повысилась с T_1 до T_2 , то, согласно закону сохранения энергии, удельная мощность тепловой энергии q_{mw} , выделенной в элементарном объеме за счет воздействия на него микроволнового поля должна быть равна удельной мощности энергии, необходимой для нагрева тела до температуры T_2 :

$$Q_{mw} = Q_T. \quad (2.35)$$

Таким образом, были рассмотрены основные положения теории микроволнового нагрева и зависимости, необходимые для проведения анализа влияния радиопоглощающих наполнителей на скорость нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке.

Рассмотрим два полуфабриката АИ на ОТС одинакового типоразмера и объема высотой a , первый из которых изготовлен из формовочной смеси стандартной рецептуры, второй – из смеси, модифицированной радиопоглощающим наполнителем. Вследствие модификации полуфабриката АИ, были изменены следующие его параметры: действительная ϵ' и мнимая ϵ'' части относительной диэлектрической проницаемости, удельная теплоемкость c_T и плотность ρ .

Предположим, что на каждый из полуфабрикатов в направлении, перпендикулярном торцевой поверхности, со скоростью света в вакууме падает электромагнитная волна с частотой f и амплитудой напряженности E_0 (рис. 2.3).

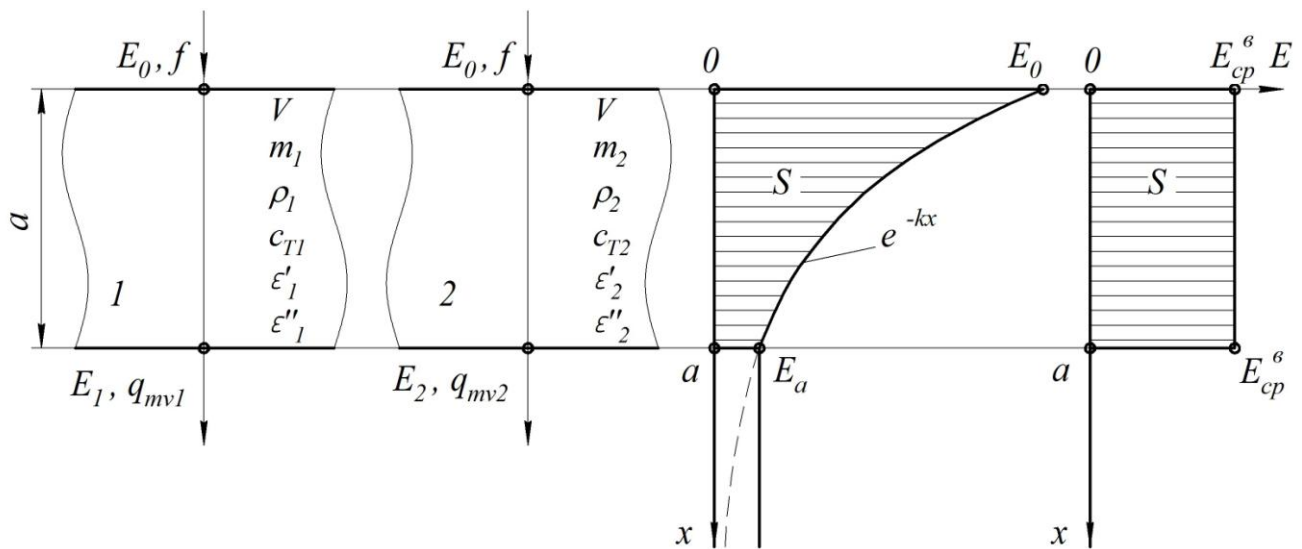


Рис. 2.3. Воздействие электромагнитной волны на полуфабрикаты АИ объемом V : 1 – полуфабрикат АИ стандартной рецептуры; 2 – полуфабрикат АИ, модифицированный радиопоглощающим наполнителем

По мере проникновения электромагнитной волны в полуфабрикат АИ ее амплитуда напряженности будет снижаться согласно зависимости (2.30). Для определения среднего значения амплитуды напряженности по высоте полуфабриката

a , проинтегрируем зависимость (2.30) на длине $[0; a]$ и найдем площадь криволинейной трапеции S (см. рис. 2.3):

$$S = \int_0^a E_x dx = \int_0^a E_0 \exp(-kx) dx = \frac{E_0}{k} (1 - e^{-ak}). \quad (2.36)$$

Площадь данной трапеции равна площади прямоугольника со сторонами a и E_{cp} (см. рис. 2.3):

$$S = aE_{cp}^e. \quad (2.37)$$

Следовательно, среднее значение амплитуды напряженности по высоте полуфабриката a можно определить по следующей зависимости:

$$E_{cp}^e = \frac{E_0}{ak} (1 - e^{-ak}). \quad (2.38)$$

Рассмотрим объем V полуфабриката АИ как сумму элементарных объемов dV с размерами dx, dy, dz . Тогда:

$$\begin{aligned} V &= ndV; \\ a &= udy, \end{aligned} \quad (2.39)$$

где n – количество элементарных объемов в полуфабрикате; u – количество элементарных объемов по высоте полуфабриката a .

Следовательно, среднее значение амплитуды напряженности по объему полуфабриката V можно определить по следующей зависимости:

$$E_{cp} = \frac{uE_{cp}^e}{n} = \frac{uE_0}{akn} (1 - e^{-ak}). \quad (2.40)$$

Удельная мощность тепловой энергии q_{mw} , выделенной в материале полуфабриката за счет воздействия на него микроволнового поля, в рассматриваемом случае будет определяться следующим выражением:

$$q_{mw1} = \pi \varepsilon_0 \varepsilon_1'' f E_{cp1}^2 = \pi \varepsilon_0 \varepsilon_1'' f \left(\frac{uE_0}{ak_1 n} (1 - e^{-ak_1}) \right)^2; \quad (2.41)$$

$$q_{mw2} = \pi \varepsilon_0 \varepsilon_2'' f \left(\frac{uE_0}{ak_2 n} (1 - e^{-ak_2}) \right)^2, \quad (2.42)$$

где индекс 1 – соответствует микроволновому нагреву первого полуфабриката

(рис. 2.3); индекс 2 – второму.

Тогда, с учетом выражений (2.34), (2.35), (2.41), (2.42), можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \pi \varepsilon_0 \varepsilon_1'' f \left(\frac{u E_0}{a k_1 n} (1 - e^{-a k_1}) \right)^2 = \frac{c_{T1} \rho_1 \Delta T_1}{t}; \\ \pi \varepsilon_0 \varepsilon_2'' f \left(\frac{u E_0}{a k_2 n} (1 - e^{-a k_2}) \right)^2 = \frac{c_{T2} \rho_2 \Delta T_2}{t}. \end{cases} \quad (2.43)$$

Поделив второе уравнение в системе (2.43) на первое, получим следующую зависимость:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{c_{T1} \rho_1 \varepsilon_2''}{c_{T2} \rho_2 \varepsilon_1''} \left(\frac{k_1 (1 - e^{-a k_2})}{k_2 (1 - e^{-a k_1})} \right)^2, \quad (2.44)$$

где
$$k_1 = \frac{2\pi f \varepsilon_1''}{c \sqrt{\varepsilon_1'}}; \quad k_2 = \frac{2\pi f \varepsilon_2''}{c \sqrt{\varepsilon_2'}}. \quad (2.45)$$

С учетом зависимости (2.45) выражение (2.44) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{c_{T1} \rho_1 \varepsilon_1'' \varepsilon_2'}{c_{T2} \rho_2 \varepsilon_2'' \varepsilon_1'} \left(\frac{1 - e^{-a k_2}}{1 - e^{-a k_1}} \right)^2. \quad (2.46)$$

С учетом (2.27) зависимость (2.46) можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{c_{T1} \rho_1 \operatorname{tg} \delta_1}{c_{T2} \rho_2 \operatorname{tg} \delta_2} \left(\frac{1 - e^{-a k_2}}{1 - e^{-a k_1}} \right)^2; \\ k_1 = 2,096 \cdot 10^{-8} f \operatorname{tg} \delta_1 \sqrt{\varepsilon_1'}; \\ k_2 = k_1 \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{\operatorname{tg} \delta_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_2'}{\varepsilon_1'}}. \end{cases} \quad (2.47)$$

В процессе модификации связки полуфабрикатов АИ радиопоглощающими наполнителями их плотность и удельная теплоемкость изменятся незначительно, следовательно, доминирующее влияние на изменение скорости нагрева в микроволновом поле будет оказывать изменение комплексной относительной диэлектрической проницаемости полуфабрикатов АИ.

Рассмотрим случай, когда глубина проникновения электромагнитной волны l_1 в полуфабрикат АИ до его модификации составляет 1 м, после модификации связки полуфабриката АИ его плотность, удельная теплоемкость и тангенс угла диэлектрических потерь не изменились, а значения действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости увеличились в 2 раза. Тогда постоянная затухания k_1 , с учетом зависимости (2.30), также равна единице, а зависимость отношения прироста температур от высоты полуфабриката (стопки полуфабрикатов), с учетом зависимости (2.46), примет следующий вид (рис. 2.4, кривая 2):

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \left(\frac{1 - e^{-\sqrt{2}a}}{1 - e^{-a}} \right)^2. \quad (2.48)$$

Загрузка в СВЧ - печь стопки полуфабрикатов АИ высотой более 1 м в силу ряда обстоятельств нецелесообразна, в связи с чем на рисунках 2.4 – 2.6 сплошной линией показаны участки кривых, справедливые для загрузки полуфабриката АИ или стопки полуфабрикатов высотой от 0 до 1 м, пунктиром – возможная динамика изменения исследуемого показателя при дальнейшем увеличении высоты стопки полуфабрикатов.

Как следует из рисунка 2.4 (кривая 2), по мере увеличения высоты полуфабриката или их стопки эффект от модификации радиопоглощающими наполнителями (увеличение скорости нагрева) будет снижаться и при достижении высотой a определенного значения практически нивелируется.

Если рассматривать ситуацию, при которой после модификации связки полуфабриката АИ его плотность, удельная теплоемкость и мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости не изменились, а значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости увеличилось в 2 раза (следовательно, тангенс угла диэлектрических потерь, согласно зависимости (2.27), уменьшился в 2 раза), то зависимость отношения прироста температур от высоты полуфабриката (стопки полуфабрикатов) примет вид (рис. 2.4, кривая 1):

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = 2 \cdot \left(\frac{1 - e^{-\frac{a}{\sqrt{2}}}}{1 - e^{-a}} \right)^2. \quad (2.49)$$

В рассматриваемом случае, при микроволновом нагреве полуфабрикатов АИ, высота которых на порядок меньше глубины проникновения микроволн, эффекта от модификации радиопоглощающими наполнителями (увеличения скорости нагрева) практически не наблюдается, однако по мере увеличения высоты полуфабриката или стопки полуфабрикатов он будет увеличиваться и при достижении высотой значения 1 м скорость нагрева увеличится в 1,3 раза.

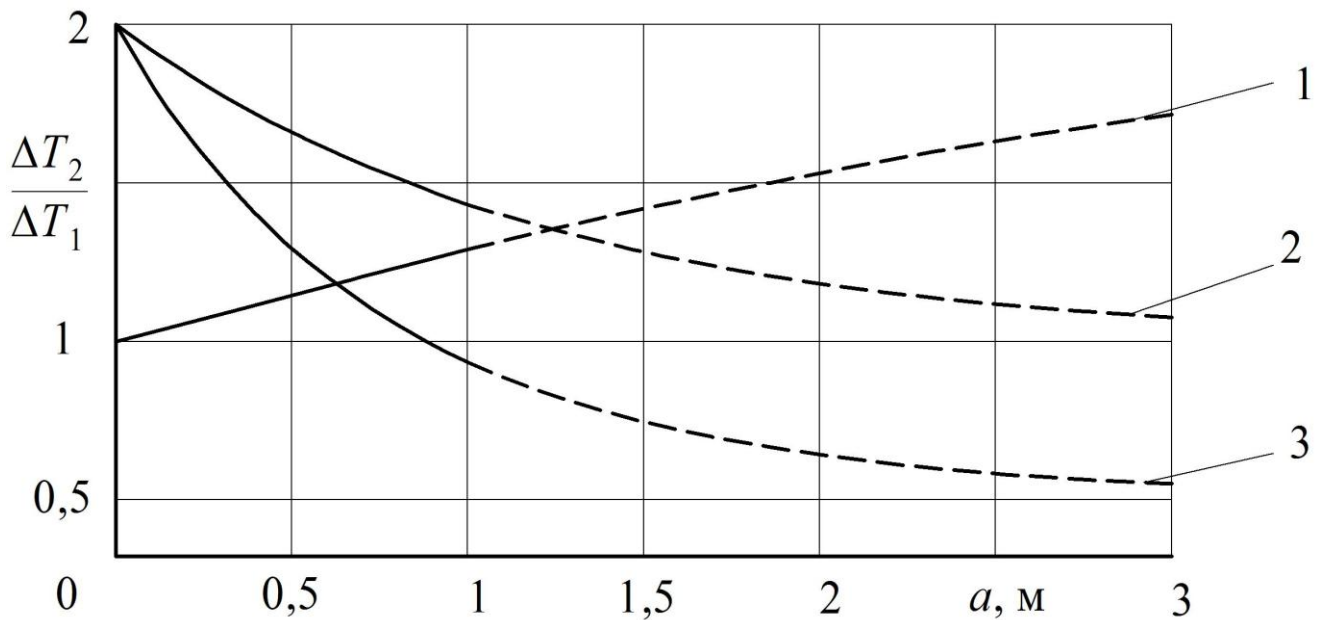


Рис. 2.4. Зависимость отношения скоростей нагрева модифицированного полуфабриката АИ (ΔT_2) и полуфабриката стандартной рецептуры (ΔT_1) от высоты их стопки: 1 – $k_1 = 1$; $c_{T1} = c_{T2}$; $\rho_1 = \rho_2$; $\varepsilon'_1 = 0,5\varepsilon'_2$; $\varepsilon''_1 = \varepsilon''_2$; $\operatorname{tg}\delta_1 = 2\operatorname{tg}\delta_2$; 2 – $k_1 = 1$; $c_{T1} = c_{T2}$; $\rho_1 = \rho_2$; $\varepsilon'_1 = 0,5\varepsilon'_2$; $\varepsilon''_1 = 0,5\varepsilon''_2$; $\operatorname{tg}\delta_1 = \operatorname{tg}\delta_2$; 3 – $k_1 = 1$; $c_{T1} = c_{T2}$; $\rho_1 = \rho_2$; $\varepsilon'_1 = \varepsilon'_2$; $\varepsilon''_1 = 0,5\varepsilon''_2$; $\operatorname{tg}\delta_1 = 0,5\operatorname{tg}\delta_2$

Когда после модификации связи полуфабриката АИ его плотность, удельная теплоемкость и действительная часть относительной диэлектрической проницаемости не изменились, а значение мнимой части относительной диэлектрической проницаемости увеличилось в 2 раза (а значит, тангенс угла диэлектрических потерь, согласно зависимости (2.27), также увеличился в 2 раза), зависимость отно-

шения прироста температур от высоты полуфабриката примет вид кривой 3 на рисунке 2.4:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = 0,5 \cdot \left(\frac{1 - e^{-2a}}{1 - e^{-a}} \right)^2. \quad (2.50)$$

В рассматриваемом случае, по мере увеличения высоты полуфабриката АИ, эффект от модификации радиопоглощающими наполнителями (увеличение скорости нагрева) будет снижаться и при достижении высотой значения 0,88 м практически нивелируется. При дальнейшем увеличении высоты полуфабриката АИ (стопки полуфабрикатов) будет наблюдаться обратный эффект от модификации полуфабрикатов радиопоглощающими наполнителями, т.е. скорость микроволнового нагрева модифицированного полуфабриката окажется меньше скорости нагрева полуфабриката стандартной рецептуры. При достижении высотой полуфабриката АИ значения 1 м скорость микроволнового нагрева полуфабриката стандартной рецептуры будет в 1,08 раза больше, чем модифицированного.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при микроволновом нагреве полуфабрикатов АИ (стопки полуфабрикатов), высота которых значительно меньше глубины проникновения электромагнитного излучения, для повышения скорости нагрева необходимо больше внимания уделить повышению мнимой части относительной диэлектрической проницаемости, а при нагреве полуфабрикатов, высота которых превышает глубину проникновения микроволн необходимо принимать меры для увеличения действительной части относительной диэлектрической проницаемости. Однако во втором случае радиопоглощающие свойства полуфабрикатов будут достаточными, и повышать скорость их нагрева, вероятнее всего, не понадобится. Для определения глубины проникновения и постоянной затухания полуфабриката стандартной рецептуры и модифицированного радиопоглощающими наполнителями, а также отношения скоростей их нагрева, необходимо определить комплексные относительные диэлектрические проницаемости полуфабрикатов АИ до и после модификации.

2.2.2. Определение физических свойств полуфабрикатов АИ

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов можно воспользоваться формулами Максвелла - Гарнетта (Maksvell - Garnett) и В.И. Оделевского [7, 22]. Применение этих формул обеспечивает соответствие расчетных зависимостей диэлектрической проницаемости исследуемых композитов от объемной доли v включений экспериментальным данным в диапазоне значений v от 0 до 0,05. Использование для решения этой задачи формулы Нильсена (Nielsen) [71] позволит расширить диапазон значений v до 0,35, в котором наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных значений экспериментальным данным. В связи с этим, в дальнейших расчетах используем формулу Нильсена:

$$\varepsilon_{comp} = \varepsilon_m \frac{1 + ABv}{1 - B\Psi v}, \quad (2.51)$$

где

$$B = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_m^{-1} - 1}{\varepsilon_n \varepsilon_m^{-1} + A}; \quad (2.52)$$

$$\Psi = 1 + \frac{1 - v_p}{v_p^2} v; \quad (2.53)$$

v_p – максимально возможная объемная доля диспергированного компонента твердой фазы, характеризующая укладку и форму частиц; v – объемная доля диспергированного компонента; ε_n – комплексная диэлектрическая проницаемость диспергированного компонента; ε_m – комплексная диэлектрическая проницаемость непрерывного компонента, A – коэффициент, учитывающий влияние формы частиц диспергированного компонента и изменяющий свое значение от 1,5 (для сферических частиц) до 4 (для частиц в форме чешуек); принимается, что непрерывным компонентом является больший по объему компонент твердой фазы.

В зависимостях (2.51) – (2.53) необходимо оперировать комплексными числами, что усложняет расчет и повышает риск возникновения ошибок. В связи с этим соискатель разработал программу «NIELSEN» для расчета комплексной диэлек-

трической проницаемости композита. В исходных данных этой программы, задаются комплексные относительные диэлектрические проницаемости диспергированного и непрерывного компонентов композита, объемная доля и максимально возможная объемная доля диспергированного компонента, а также коэффициент, позволяющий учитывать влияние формы частиц диспергированного компонента. В таблице 2.4 представлены значения диэлектрической проницаемости некоторых веществ, необходимые для проведения расчетов в программе «NIELSEN». По окончании расчета его результаты и введенные исходные данные выводятся на печать (прил. 2.1).

2.4. Электрофизические характеристики некоторых веществ при нормальных условиях на частоте 2 – 3 ГГц [11, 16, 71]

Вещество	Действительная часть относительной диэлектрической проницаемости	Мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости	Тангенс угла диэлектрических потерь
Воздух	1,00058986	$2,80165 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$
Вода	78	13,3	0,17
Абразивные материалы			
Электрокорунд белый 25 А	10	0,005	$5 \cdot 10^{-4}$
Нитрид бора	3,8	3,5	0,92
Алмаз	5,7	0,057	0,01
ОТС			
Бакелит	4,5	0,17	0,038
Эпоксидная смола отвержденная	3,36	0,03 – 0,67	0,01 – 0,2
Шеллак	3,5	0,035	0,01
Радиопоглощающие наполнители			
Мелкодисперсный графит	34,3	13,4	0,391
Углеродные нанотрубки (УНТ)	62,2	12,4	0,2

На первом этапе исследований определяли диэлектрическую проницаемость полуфабриката АИ на бакелитовой связке, в составе которого нет каких либо на-

полнителей и пор (двухкомпонентный композит). Согласно рецептуре, представленной в п. 2.1.3, массовое соотношение абразивного зерна и бакелитовой связки составляет 1 : 8,4, объемное – 1 : 2,6. Диспергированным компонентом в данном композите является бакелитовая связка (объемная доля $v = 0,275$), непрерывным – абразивный материал (электрокорунд белый 25А). Коэффициент А приняли равным 1,5, а максимально возможную объемную долю бакелитовой связки – 0,8. Результаты расчетов сведены в таблице 2.5.

2.5. Результаты расчета комплексной диэлектрической проницаемости в программе «NIELSEN»

№ п/п	Композит*	Диэлектрическая проницаемость	Глубина проникновения, м	Постоянная затухания	Тангенс угла диэлектрических потерь
1	Э + Б	$8,15 - i \cdot 0,071$	0,783	1,277	0,0087
2	Э + Б + П	$6,62 - i \cdot 0,055$	0,911	1,098	0,0083
3	Э + Б + П + + Г (1 % по массе)	$6,81 - i \cdot 0,102$	0,498	2,008	0,0150
4	Э + Б + П + Г (2 %)	$7,01 - i \cdot 0,149$	0,346	2,890	0,0213
5	Э + Б + П + Г (3 %)	$7,2 - i \cdot 0,199$	0,263	3,802	0,0276
6	Э + Б + П + Г (4 %)	$7,4 - i \cdot 0,249$	0,213	4,695	0,0336
7	Э + Б + П + + УНТ (1 %)	$6,97 - i \cdot 0,086$	0,598	1,672	0,0123
8	Э + Б + П + + УНТ (2 %)	$7,33 - i \cdot 0,117$	0,451	2,217	0,0160
9	Э + Б + П + + УНТ (3 %)	$7,71 - i \cdot 0,151$	0,358	2,793	0,0196
10	Э + Б + П + + УНТ (4 %)	$8,08 - i \cdot 0,185$	0,299	3,344	0,0229
* Приняты следующие обозначения: Э – электрокорунд; Б – бакелит; П – поры; Г – графит; УНТ – углеродные нанотрубки.					

Для расчета комплексной диэлектрической проницаемости полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке с определенной пористостью приняли в качестве непрерывной фазы рассмотренный ранее двухкомпонентный композит, а в качестве диспергированной фазы – воздух. Учли, что в полуфабрикате АИ рассматриваемой рецептуры объемная доля пор составляет $v = 0,15$, максимально возможная объемная доля воздуха – 1. Диэлектрическую проницаемость данного композита

приняли за основу и рассматривали его как непрерывную фазу при расчете диэлектрической проницаемости полуфабрикатов АИ, модифицированных радиопоглощающими наполнителями.

В качестве радиопоглощающих наполнителей в расчетах использовали параметры мелкодисперсного графита и углеродных нанотрубок (УНТ). Содержанием наполнителей варьировали от 1 до 4 % по массе. Исходные данные для расчета приведены в приложении 2.1, результаты расчета сведены в таблице 2.5.

Для определения влияния радиопоглощающих наполнителей на скорость нагрева полуфабрикатов АИ в СВЧ - поле необходимо также определить изменение плотности и удельной теплоемкости композита после его модификации. Исходные данные для расчетов представлены в таблице 2.6.

2.6. Физические свойства компонентов полуфабриката АИ при нормальных условиях [5, 16]

№ п/п	Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)
1	Воздух	0,957	1006
2	Электрокорунд белый	3950	837
3	Бакелит	1250	1245
4	Графит	2160	696
5	УНТ	1650	750

Для определения плотности композита воспользовались зависимостью [27]

$$\rho = \rho_1 P_{v1} + \rho_2 P_{v2} + \dots + \rho_i P_{vi}, \quad (2.54)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента композита, кг/м³; P_{vi} – относительная объемная доля i -го компонента композита.

Для определения удельной теплоемкости композита применили зависимость, предложенную А.В. Лыковым [27]:

$$c\rho = c_1\rho_1 P_{v1} + c_2\rho_2 P_{v2} + \dots + c_i\rho_i P_{vi}, \quad (2.55)$$

где c_i – удельная теплоемкость i -го компонента композита, Дж/(кг·°С).

Результаты расчета сведены в табл. 2.7.

Таким образом были получены все исходные данные, необходимые для оцен-

ки влияния радиопоглощающих наполнителей (мелкодисперсного графита, УНТ) на изменение скорости нагрева полуфабриката (стопки полуфабрикатов) высотой a при однократном прохождении сквозь него электромагнитной волны.

2.7. Физические свойства композитов при нормальных условиях

№ п/п	Композит (обозначение по табл. 2.5)	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)
1	Э + Б	3207,5	880,7
2	Э + Б + П	2727,5	880,4
3	Э + Б + П + Г (1 % по массе)	2720,7	878,6
4	Э + Б + П + Г (2 %)	2713,9	876,9
5	Э + Б + П + Г (3 %)	2707,1	875,1
6	Э + Б + П + Г (4 %)	2700,3	873,4
7	Э + Б + П + УНТ (1 %)	2709,7	879,1
8	Э + Б + П + УНТ (2 %)	2691,9	877,8
9	Э + Б + П + УНТ (3 %)	2674,2	876,5
10	Э + Б + П + УНТ (4 %)	2656,4	875,2

На основе полученных данных и системы уравнений (2.47) были построены графические зависимости отношения скоростей нагрева модифицированного радиопоглощающим наполнителем полуфабриката АИ и полуфабриката стандартной рецептуры от их высоты a (рис. 2.5, 2.6).

Анализ зависимостей, показанных на рисунке 2.5, свидетельствует, что при минимальных высотах полуфабриката АИ, вследствие его модификации мелкодисперсным графитом в количестве 1, 2, 3, 4 % по массе, скорость нагрева в микроволновом поле при однократном прохождении электромагнитной волны повышается соответственно в 1,8; 2,7; 3,6; 4,1 раза.

При увеличении высоты стопки полуфабрикатов до 0,7 – 0,9 м эффект от модификации полуфабрикатов АИ мелкодисперсным графитом практически нивелируется.

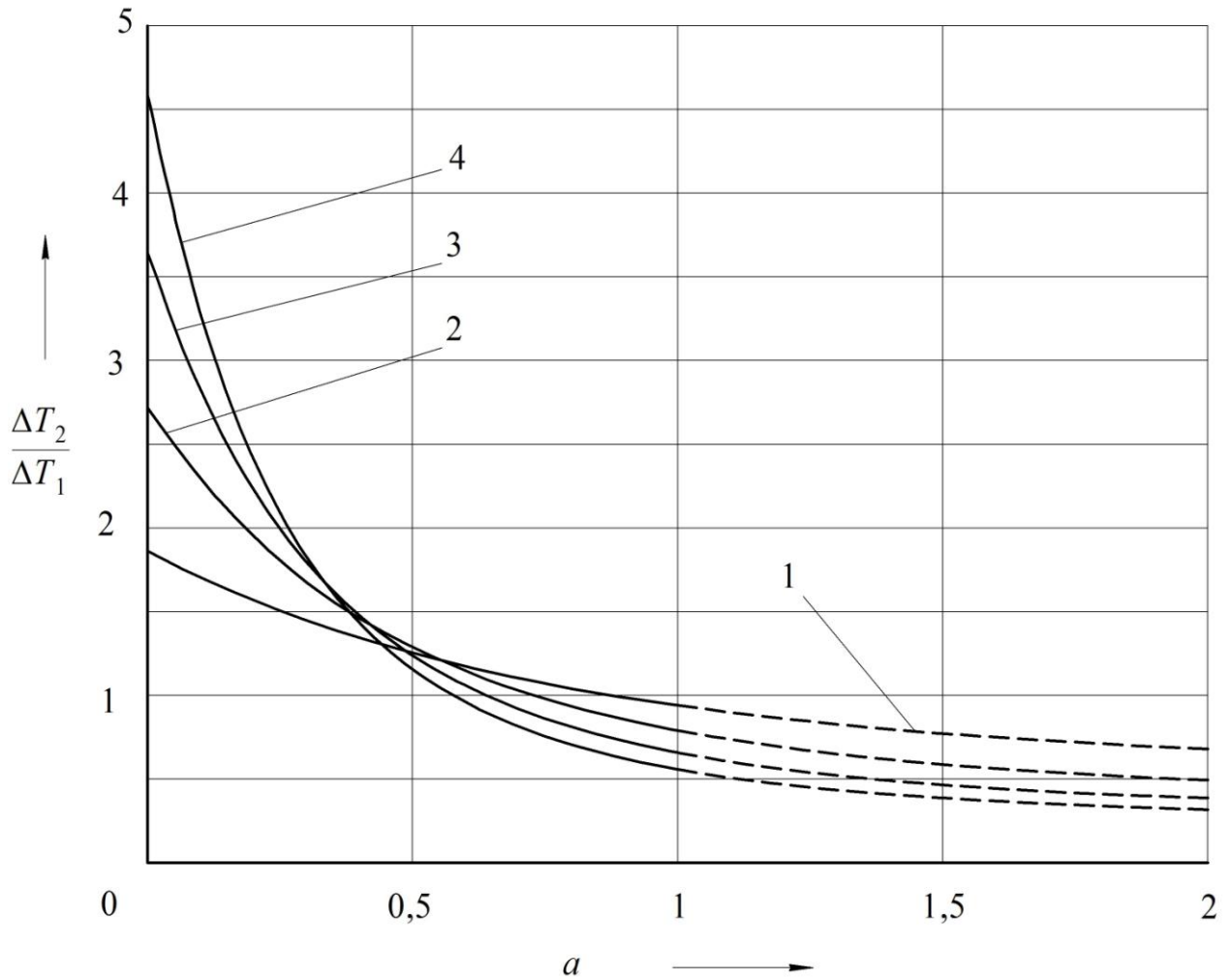


Рис. 2.5. Зависимость отношения скоростей нагрева модифицированного графитом полуфабриката АИ (ΔT_2) и полуфабриката стандартной рецептуры (ΔT_1) от высоты их стопки: 1, 2, 3, 4 – содержание мелкодисперсного графита (по массе) в полуфабрикате соответственно 1, 2, 3, 4 %

Данные рисунка 2.6 показывают, что при минимальных высотах полуфабриката АИ, модификация ОТС наполнителем УНТ в количестве 1, 2, 3, 4 % по массе повышает скорость нагрева полуфабрикатов в микроволновом поле при однократном прохождении электромагнитной волны соответственно в 1,6; 2,2; 2,8; 3,4 раза.

При увеличении высоты загружаемой в СВЧ-печь стопки полуфабрикатов АИ до 0,75 – 1,0 м, эффект от модификации полуфабрикатов АИ мелкодисперсным графитом практически нивелируется.

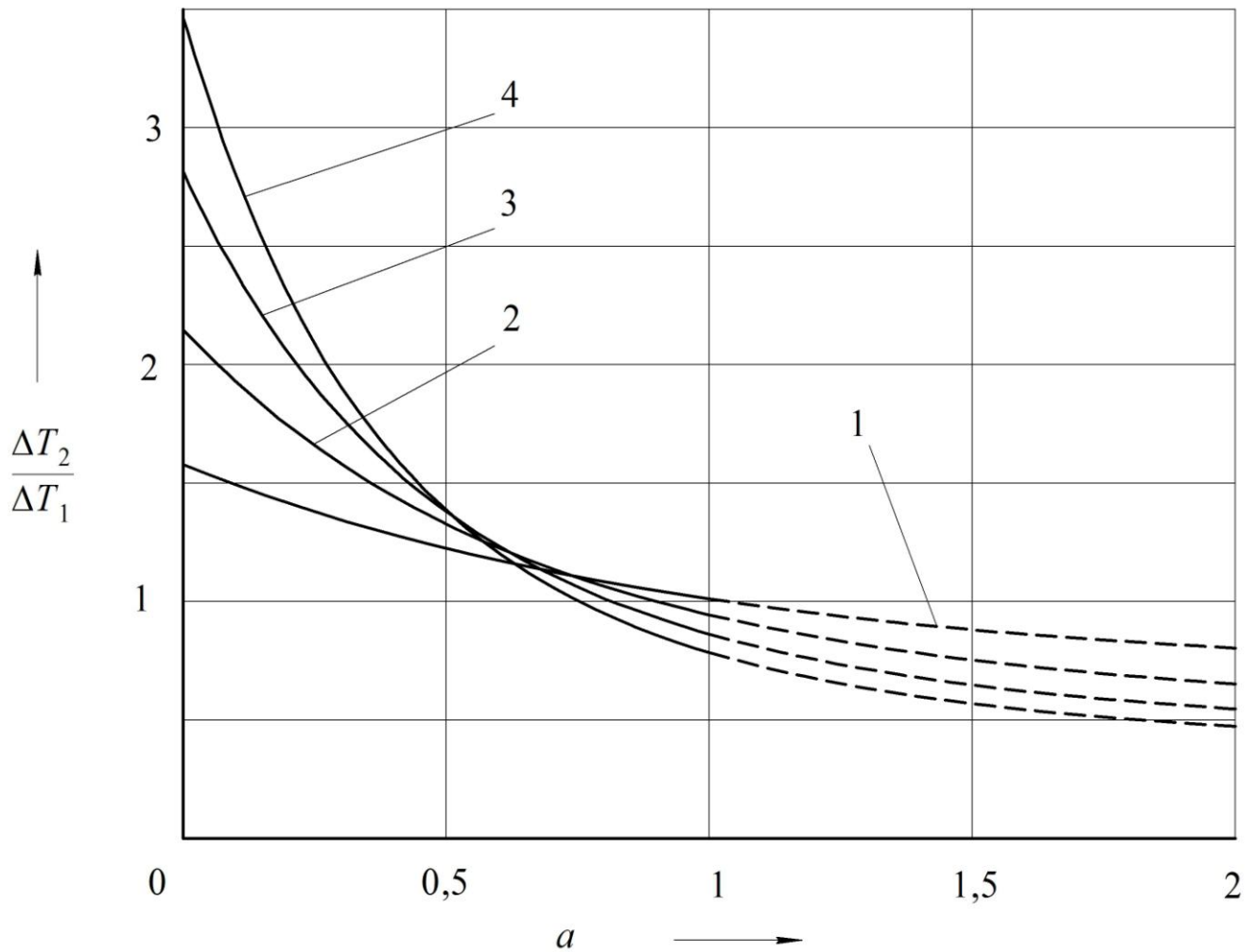


Рис. 2.6. Зависимость отношения скоростей нагрева полуфабриката АИ, модифицированного УНТ (ΔT_2) и стандартной рецептуры (ΔT_1), от высоты их стопки: 1, 2, 3, 4 – содержание УНТ (по массе) в полуфабрикате соответственно 1, 2, 3, 4 %

2.2.3. Нагрев полуфабрикатов АИ с различными радиопоглощающими свойствами в одной СВЧ-камере

При изменении рецептуры формовочной смеси (уменьшении количества связки для уменьшения твердости АИ, увеличении пористости, замене абразивного материала и др.) будут существенно изменяться радиопоглощающие свойства полуфабриката АИ, в связи с чем, совместная термообработка полуфабрикатов с различными характеристиками (твердость, пористость и др.) в одной СВЧ-камере не представляется возможной из-за значительного увеличения градиента температур. Однако путем использования радиопоглощающих наполнителей можно добиться выравнивания радиопоглощающих свойств полуфабрикатов различных

рецептур для обеспечения возможности проведения их совместной СВЧ-термообработки за один технологический цикл.

Рассмотрим процесс нагрева двух полуфабрикатов АИ одинаковой высоты и одного объема с различными радиопоглощающими свойствами в одной СВЧ-камере (рис. 2.7). Так как полуфабрикаты АИ находятся в одинаковых условиях (в одном электромагнитном поле), то при увеличении КПД СВЧ-установки средняя амплитуда напряженности в каждом полуфабрикате будет также пропорционально увеличена, при этом изменения отношения скоростей нагрева полуфабрикатов с различными радиопоглощающими свойствами не произойдет. В связи с этим КПД СВЧ-установки можно пренебречь.

Предположим, что магнетрон 3 излучает в разные направления два луча под углом 45° от верхней стенки. Теплообмена между полуфабрикатами, а также между полуфабрикатами и окружающей средой нет. После каждого прохождения электромагнитной волны сквозь полуфабрикат амплитуда ее напряженности E будет уменьшаться в e^{-bk} раз, а средняя температура полуфабриката повышаться на ΔT °С. С учетом зависимостей (2.38) – (2.40), получено выражение для определения средней амплитуды напряженности по объему первого полуфабриката для данного случая (см. рис. 2.7):

$$\begin{aligned}
 E_{cp1} &= \frac{uE_{cp1}^{e1} + uE_{cp1}^{e2} + \dots + uE_{cp1}^{ei}}{n} = \\
 &= \frac{u}{n} \left(E_0 \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + E_0 e^{-bk_2} \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + E_0 e^{-b(k_1+k_2)} \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + \right. \\
 &\quad \left. + E_0 e^{-b(k_1+2k_2)} \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} \dots \right) = \\
 &= \frac{E_0 u (1 - e^{-bk_1})}{bk_1 n} \left(1 + e^{-bk_2} + e^{-b(k_1+k_2)} + e^{-b(k_1+2k_2)} + e^{-b(2k_1+2k_2)} + \dots \right),
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

где $b = a / \sin 45^\circ$.

Средняя амплитуда напряженности по объему второго полуфабриката в таком случае определяется следующей зависимостью:

$$E_{cp2} = \frac{E_0 u (1 - e^{-bk_2})}{bk_2 n} \left(1 + e^{-bk_1} + e^{-b(k_1+k_2)} + e^{-b(2k_1+k_2)} + e^{-b(2k_1+2k_2)} + \dots \right). \quad (2.57)$$

С учетом вышеприведенных зависимостей, выражение (2.44) для данного случая примет следующий вид:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{c_{T1} \rho_1 \varepsilon_2''}{c_{T2} \rho_2 \varepsilon_1''} \left(\frac{k_1 (1 - e^{-bk_2})}{k_2 (1 - e^{-bk_1})} \left(\frac{1 + e^{-bk_1} + e^{-b(k_1+k_2)} + e^{-b(2k_1+k_2)} + e^{-b(2k_1+2k_2)} + \dots}{1 + e^{-bk_2} + e^{-b(k_1+k_2)} + e^{-b(2k_1+k_2)} + e^{-b(2k_1+2k_2)} + \dots} \right) \right)^2. \quad (2.58)$$

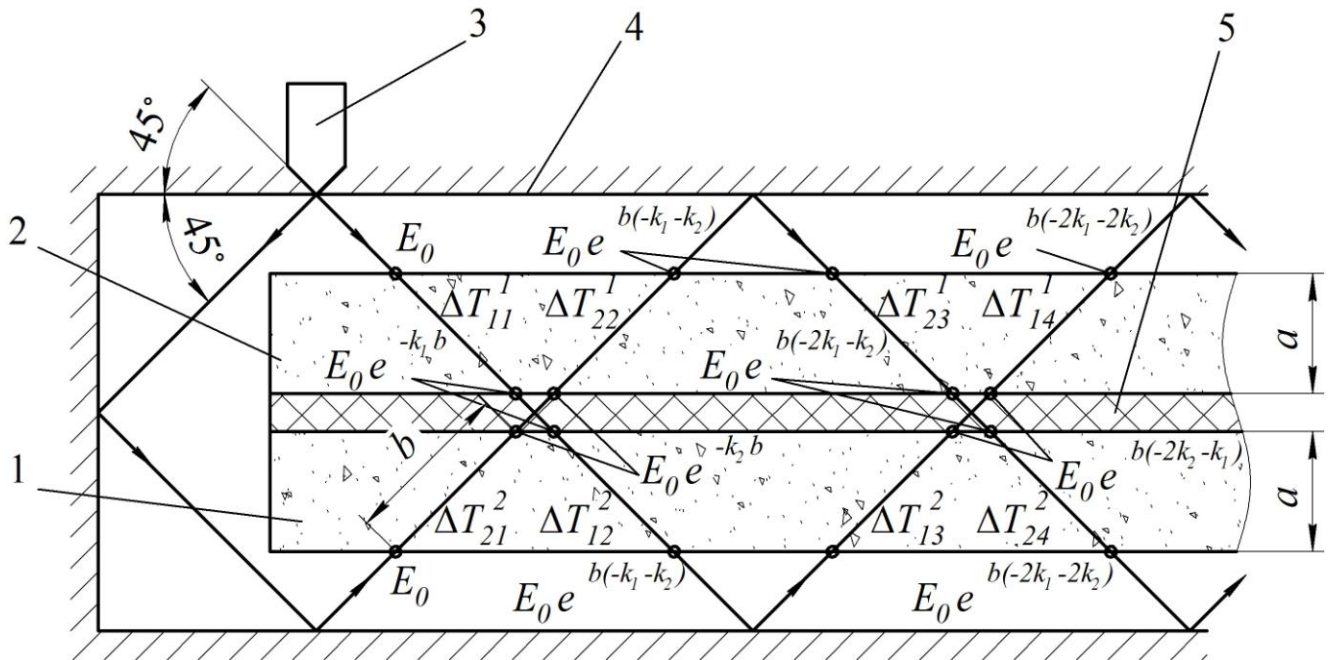


Рис. 2.7. Схема нагрева двух полуфабрикатов АИ с различными радиопоглощающими свойствами в одной СВЧ-камере: 1, 2 – полуфабрикаты АИ; 3 – излучающее устройство (магнетрон); 4 – стенка СВЧ-камеры; 5 – радиопрозрачная теплоизолирующая прокладка

Для определения отношения скоростей микроволнового нагрева полуфабрикатов различных рецептов, объем и высота которых равны, используя зависимости (2.27), (2.31), (2.51) – (2.53), (2.58), разработаны программы RPT1 и RPT2. С помощью программы RPT1 можно определить во сколько раз скорость микроволнового нагрева полуфабриката АИ, модифицированного радиопоглощающим наполнителем, будет больше скорости нагрева полуфабриката стандартной рецептуры при их совместной термообработке. Например, с помощью программы RPT1 было выявлено, что полуфабрикат АИ (стопка полуфабрикатов), высотой 0,05 м модифицированный 2 % - ами (по массе) мелкодисперсным графитом, в электро-

Рассмотрим по отдельности процессы нагрева полуфабрикатов АИ (стопки полуфабрикатов) одинаковой высоты и одного объема с различными радиопоглощающими свойствами (рис. 2.8).

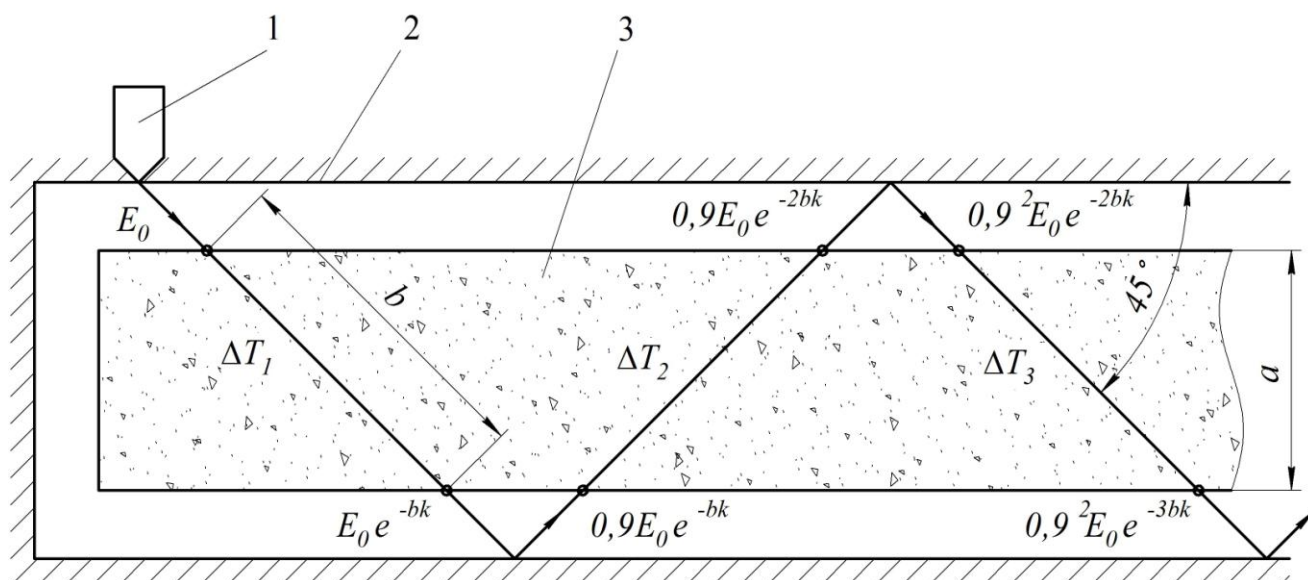


Рис. 2.8. Схема нагрева полуфабриката АИ (стопки полуфабрикатов) в СВЧ-камере: 1 – излучающее устройство (магнетрон); 2 – стенка СВЧ-камеры; 3 – полуфабрикат АИ

Предположили, что магнетрон 1 излучает луч под углом 45° к верхней стенке, а теплообмена между полуфабрикатом и окружающей средой нет. Внутренние стенки СВЧ - камеры 2 изготавливают из материалов, обладающих хорошей электропроводностью. В качестве таких материалов используют нержавеющую сталь, конструкционную сталь, покрытую эмалью или керамикой, неблагородные металлы, плакированные нержавеющими материалами, медные сплавы, покрытые серебром, и др. Даже при использовании оптимальных материалов при каждом отражении электромагнитной волны от стенки СВЧ - камеры она теряет часть энергии, которая расходуется на нагрев материала стенок. Незначительная часть электромагнитных волн пробиваются сквозь щели и другие дефекты СВЧ - камеры и образуют электромагнитный фон за пределами СВЧ - установки. В процессе хаотичного отражения электромагнитных волн от стенок СВЧ - камеры они встречаются, в результате чего возникает интерференция, при этом волны, пришедшие в фазе, усиливают одна другую, а пришедшие в противофазе – гасят друг друга. На основе анализа научно-технической литературы приняли, что в рассматриваемом случае после каждого отражения от стенки СВЧ-камеры, изготовленной из стали с цинковым покрытием, амплитуда напряженности электромагнитной волны в среднем снижается на 10 %. Следует учитывать, что нельзя производить термообработку в СВЧ - камере при недостаточной нагрузке в силу недостаточного объема или низких радиопоглощающих свойств полуфабрикатов. Встречая на своём пути небольшие препятствия, микроволны будут многократно отражаться от внутренних стенок полости СВЧ - камеры и концентрировать в ней энергию излучения, что, как минимум, будет снижать ресурс магнетрона и впоследствии выведет его из строя. Кроме этого повысится электромагнитный фон в рабочей зоне оператора СВЧ - установки и резко снизится КПД микроволнового нагрева полуфабрикатов. Так, в работе [83], в качестве минимальной загрузки СВЧ - печи резонаторного типа мощностью 1 кВт на частоте 2450 МГц был принят эквивалент в виде 200 мл воды (глубина проникновения для воды на этой частоте при 25°C составляет 1,6 см, а для льда эта величина возрастает до 1,2 м).

С учетом зависимостей (2.38) – (2.40), можно получить выражение для определения средней амплитуды напряженности по объему полуфабриката стандартной рецептуры для рассматриваемого случая (см. рис. 2.8):

$$\begin{aligned}
 E_{cp1} &= \frac{uE_{cp1}^{e1} + uE_{cp1}^{e2} + \dots + uE_{cp1}^{ei}}{n} = \\
 &= \frac{u}{n} \left(E_0 \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + 0,9E_0 e^{-bk_1} \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + 0,9^2 E_0 e^{-2bk_1} \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + \right. \\
 &\quad \left. + 0,9^3 E_0 e^{-3bk_1} \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + 0,9^4 E_0 e^{-4bk_1} \frac{(1 - e^{-bk_1})}{bk_1} + \dots \right) = \\
 &= \frac{E_0 u (1 - e^{-bk_1})}{bk_1 n} (1 + 0,9e^{-bk_1} + 0,9^2 e^{-2bk_1} + 0,9^3 e^{-3bk_1} + 0,9^4 e^{-4bk_1} + \dots). \quad (2.59)
 \end{aligned}$$

Среднюю амплитуду напряженности по объему полуфабриката, модифицированного радиопоглощающим наполнителем, в таком случае можно рассчитать по зависимости

$$E_{cp2} = \frac{E_0 u (1 - e^{-bk_2})}{bk_2 n} (1 + 0,9e^{-bk_2} + 0,9^2 e^{-2bk_2} + 0,9^3 e^{-3bk_2} + 0,9^4 e^{-4bk_2} + \dots). \quad (2.60)$$

С учетом вышеприведенных зависимостей, выражение (2.44) трансформируется:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{c_{T1} \rho_1 \varepsilon_2''}{c_{T2} \rho_2 \varepsilon_1''} \left(\frac{k_1 (1 - e^{-bk_2}) (1 + 0,9e^{-bk_2} + 0,9^2 e^{-2bk_2} + 0,9^3 e^{-3bk_2} + 0,9^4 e^{-4bk_2} + \dots)}{k_2 (1 - e^{-bk_1}) (1 + 0,9e^{-bk_1} + 0,9^2 e^{-2bk_1} + 0,9^3 e^{-3bk_1} + 0,9^4 e^{-4bk_1} + \dots)} \right)^2. \quad (2.61)$$

Для определения отношения скорости микроволнового нагрева полуфабриката АИ или стопки полуфабрикатов, модифицированных радиопоглощающими наполнителями, к скорости нагрева полуфабриката стандартной рецептуры, объем и высота которых равны, используя зависимости (2.27), (2.31), (2.51) – (2.53), (2.61), была разработана программа RPT3. С помощью этой программы установлено, например, что полуфабрикат АИ или стопка полуфабрикатов высотой 50 мм, модифицированных 2 % - ами (по массе) мелкодисперсным графитом, в электромагнитном поле частотой 2450 МГц будет нагреваться в 1,6 раза быстрее, чем полуфабрикат АИ стандартной рецептуры той же высоты (прил. 2.4).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что на радиопоглощающие свойства полуфабрикатов АИ оказывают влияние абразивный материал, материал связки, твердость (содержание связки), пористость. При изменении рецептуры необходимо корректировать режимы термообработки или модифицировать формовочную смесь специальными наполнителями. Снижение объема термообрабатываемых полуфабрикатов АИ, их твердости, повышение пористости, применение в качестве компонентов формовочной смеси более радиопрозрачных материалов приводят к снижению нагрузки для микроволнового излучения и могут привести к снижению КПД установки, поломке оборудования или нанести вред рабочему персоналу. В связи с этим были разработаны инструменты, позволяющие моделировать изменение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов АИ и скорости их нагрева в процессе модификации радиопоглощающими наполнителями при различных вариантах загрузки в СВЧ - камеру. Выявлено, что существенное влияние на изменение скорости микроволнового нагрева при неизменном объеме оказывает высота полуфабриката (стопки полуфабрикатов АИ). При повышении высоты полуфабрикатов эффект от модификации радиопоглощающими наполнителями снижается и при достижении определенного значения может полностью нивелироваться. Выявлено, что повышение скорости нагрева вследствие модификации полуфабрикатов при совмещенной микроволновой термообработке полуфабрикатов с разными радиопоглощающими свойствами более существенно, чем при их термообработке в разных СВЧ - камерах. При разработке физических моделей нагрева полуфабрикатов АИ в микроволновом поле (см. рис. 2.7, 2.8) не учитывался их теплообмен с окружающей средой, поэтому для определения дополнительных механизмов повышения производительности и качества АИ необходимо провести математическое моделирование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ с учетом тепловых потоков, протекающих между элементами моделируемой системы.

2.3. Моделирование распределения температур в стопке полуфабрикатов АИ при их микроволновом нагреве с использованием термостатирования

2.3.1. Математическое моделирование распределения температур в стопке полуфабрикатов АИ при их микроволновом нагреве

Одним из путей снижения длительности процесса термообработки и повышения качества АИ является обеспечение равномерности нагрева всей стопки полуфабрикатов. Для оценки распределения температур в сечении стопки полуфабрикатов АИ проведем математическое моделирование процесса их нагрева в микроволновом поле. Температурное поле в различных сечениях, проходящих через ось стопки полуфабрикатов АИ в любой момент времени микроволнового нагрева не изменяется, в связи с чем, будет достаточным построение двумерной математической модели. В основу двумерной нестационарной математической модели было положено дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для изотропного твердого тела в декартовой системе координат, которое имеет следующий вид [79]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (2.62)$$

где χ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время, с ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$; q_v – удельное внутреннее тепловыделение в объеме $dV = dx \, dy \, dz$, $\text{Вт}/\text{м}^3$; x, y, z – координаты в декартовой системе координат, м ; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коэффициент температуропроводности определяли по формуле [79]:

$$\chi = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (2.63)$$

где λ – теплопроводность материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Для тел цилиндрической формы уравнение (2.62) можно представить в цилиндрической системе координат: $x = r \cdot \cos \psi$, $y = r \cdot \sin \psi$, которые характеризуются осью z , радиусом r и углом поворота ψ [27]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (2.64)$$

В рассматриваемой постановке для любого продольного сечения цилиндра задача будет осесимметричной, и искомая функция будет зависеть только от трех переменных $(T(r, z, \tau))$. Тогда уравнение теплопроводности в полярных координатах с учетом зависимости (2.63) примет следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (2.65)$$

Внутреннее тепловыделение в процессе микроволнового нагрева происходит только в стопке полуфабрикатов:

$$q_v = q_{mw}(T, \tau) + q_e(T, \tau), \quad (2.66)$$

где $q_{mw}(T, \tau)$ – количество теплоты, выделенной в материале за счет энергии микроволн, Вт/м³; $q_e(T, \tau)$ – количество теплоты, выделенной за счет экзотермического эффекта.

Количество теплоты, выделенной в материале за счет энергии микроволн, определяли по зависимости (2.32). Энергию, выделяющуюся в стопке полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке за счет реакции полимеризации $q_e(T, \tau)$, выявляли экспериментально по экзотермическим кривым.

Учли, что объемная теплоемкость C ($C = c\rho$, Дж/(м³·°C)) и коэффициент теплопроводности λ полуфабрикатов, теплоизоляции и основания зависят от температуры T . Таким образом, математическая модель нагрева стопки полуфабрикатов в микроволновом поле выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} C_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_i(T)}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + q_{vi}; \\ i = \overline{1, 2, 3}; \quad q_{v1} = 0,55\varepsilon_0\varepsilon(T)tg\delta(T)\omega E^2(\tau) + q_e(T, \tau); \\ q_{v2} = q_{v3} = 0, \end{cases} \quad (2.67)$$

где i – индекс (1 – полуфабрикаты АИ, 2 – диатомитовое основание, 3 – теплоизолятор).

Граничные условия были заданы с учетом конвективного теплообмена и теп-

лового излучения на открытых поверхностях стопки полуфабрикатов и кондуктивного теплообмена с радиопрозрачным основанием и теплоизолятором (при наличии). Схема распространения тепловых потоков при микроволновой бакелизации стопки полуфабрикатов АИ, расположенных на диатомитовом основании, представлена на рисунке 2.9.

В качестве начального условия приняли равномерное распределение температуры во всех телах в начальный момент времени:

$$\tau = 0, \quad T_i(r, z, 0) = T_0. \quad (2.68)$$

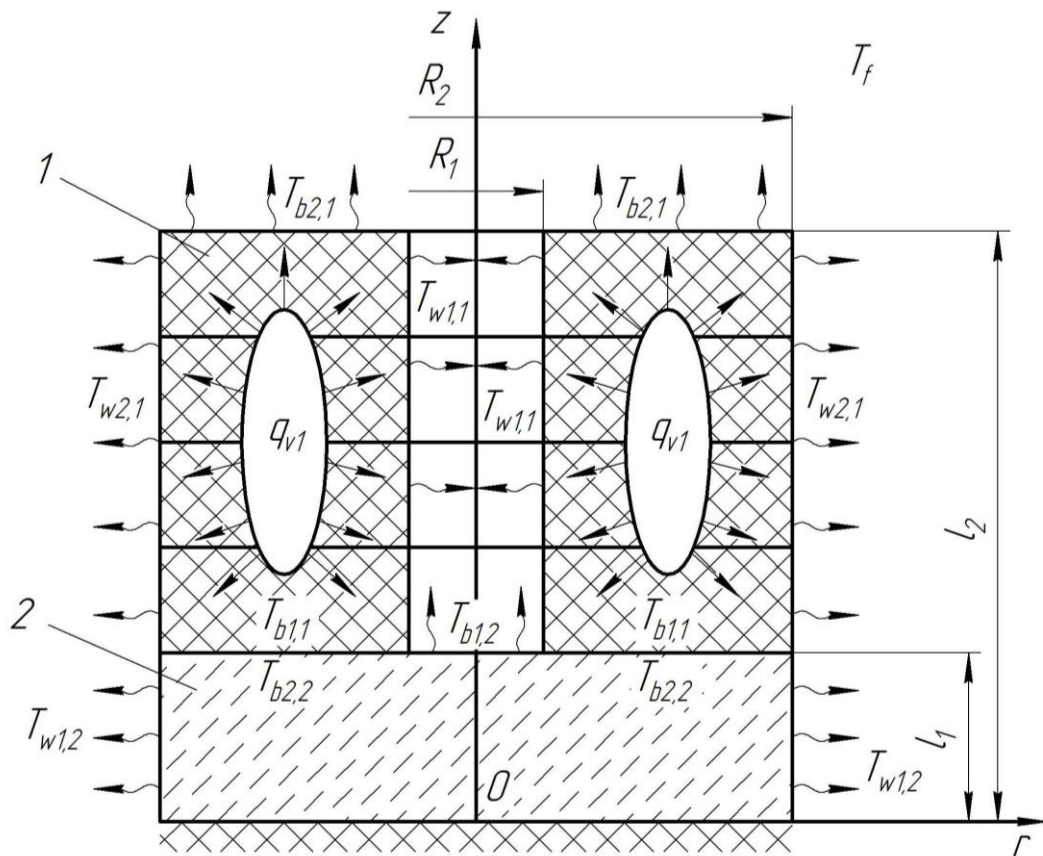


Рис. 2.9. Схема распространения тепловых потоков при микроволновой бакелизации стопки полуфабрикатов АИ 1, расположенных на диатомитовом основании 2 [84]

Процессы распространения теплоты симметричны относительно оси Oz , а нормальные составляющие удельных тепловых потоков в точках, зеркально расположенных относительно оси Oz , равны между собой по величине и противоположны по направлению. Для нижней поверхности диатомитового основания, ко-

торая совпадает с осью $0r$, приняли условие отсутствия теплообмена с другими телами и окружающей средой. В любой точке данной поверхности удельный тепловой поток и пропорциональный ему градиент по нормали к ней равны нулю. Таким образом, оси $0z$ и $0r$ можно считать адиабатическими границами, для которых справедлив частный случай граничного условия второго рода:

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0; \quad r = 0; \quad z \in [0; l_1] ; \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial z} = 0; \quad z = 0; \quad r \in [-R_2, R_2] , \quad (2.70)$$

где T_2 – температура диатомитового основания, °С; R_2 – радиус полуфабриката, м; l_1 – высота диатомитового основания, м;

На открытых поверхностях полуфабрикатов и диатомитового основания в процессе микроволнового нагрева имеет место конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой. Конвективный теплообмен подчиняется закону Ньютона-Рихмана [79]:

$$q_k = \alpha_f (T_p - T_f) , \quad (2.71)$$

где α_f – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С); T_f – температура окружающей среды, °С; T_p – температура поверхности тела, °С.

Радиационный теплообмен с открытых поверхностей тел подчиняется закону Стефана-Больцмана [79]:

$$q_r = \varepsilon_p \sigma_0 (T_p^4 - T_f^4) , \quad (2.72)$$

где ε_p – степень черноты поверхности тела; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°С⁴)).

По закону сохранения энергии количество теплоты, отданной поверхностью тела, равно количеству теплоты, которая подводится изнутри к поверхности тела в единицу времени к единице площади поверхности путем теплопроводности, т.е. для поверхности, перпендикулярной направлению оси $0z$, будет справедливо выражение:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} = q_k + q_r. \quad (2.73)$$

Таким образом, граничные условия третьего рода, учитывающие конвективный и радиационный теплообмен между открытыми поверхностями тел и окружающей средой, и применимые к расчетной схеме, представленной на рисунке 2.9, будут иметь следующий вид:

$$-\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_f (T_{w1,1} - T_f) + \varepsilon_{p1} \sigma_0 (T_{w1,1}^4 - T_f^4); \quad r = R_1; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.74)$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_f (T_{w2,1} - T_f) + \varepsilon_{p1} \sigma_0 (T_{w2,1}^4 - T_f^4); \quad r = R_2; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.75)$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_f (T_{w1,1} - T_f) + \varepsilon_{p1} \sigma_0 (T_{w1,1}^4 - T_f^4); \quad r = -R_1; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.76)$$

$$-\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_f (T_{w2,1} - T_f) + \varepsilon_{p1} \sigma_0 (T_{w2,1}^4 - T_f^4); \quad r = -R_2; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.77)$$

$$\lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_f (T_{w1,2} - T_f) + \varepsilon_{p2} \sigma_0 (T_{w1,2}^4 - T_f^4); \quad r = R_2; \quad z \in [0; l_1]; \quad (2.78)$$

$$-\lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_f (T_{w1,2} - T_f) + \varepsilon_{p2} \sigma_0 (T_{w1,2}^4 - T_f^4); \quad r = -R_2; \quad z \in [0; l_1]; \quad (2.79)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{z,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial z} &= \alpha_f (T_{b2,1} - T_f) + \varepsilon_{p1} \sigma_0 (T_{b2,1}^4 - T_f^4); \\ z = l_2; \quad r &\in [-R_2; -R_1]; \quad r \in [R_1; R_2]; \end{aligned} \quad (2.80)$$

$$\lambda_{z,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial z} = \alpha_f (T_{b1,2} - T_f) + \varepsilon_{p2} \sigma_0 (T_{b1,2}^4 - T_f^4); \quad z = l_1; \quad r \in [-R_1; R_1], \quad (2.81)$$

где T_i – температура внутри тела, °C; $\lambda_{r,i}$ – теплопроводность тела в направлении оси $0r$, Вт/(м·°C); $\lambda_{z,i}$ – теплопроводность тела в направлении оси $0z$, Вт/(м·°C); $T_{wk,i}$ – температура поверхности тела, перпендикулярной направлению оси $0r$, °C; $T_{bk,i}$ – температура поверхности тела, перпендикулярной направлению оси $0z$, °C; ε_{pi} – степень черноты поверхности тела; i – номер элемента системы (рис. 2.9); k – порядковый номер поверхности тела в направлении осей координат (рис. 2.9); R_1 – радиус посадочного отверстия полуфабриката, м; l_2 – общая высота стопки полуфабрикатов и диатомитового основания, м.

На границе соприкосновения полуфабриката и диатомитового основания обеспечивается равенство температур и равенство потоков теплоты. Таким образом, граничное условие четвертого рода примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial z} &= \lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial z}; \quad T_{b1,1} = T_{b2,2}; \\ z &= l_1; \quad r \in [-R_2; -R_1]; \quad r \in [R_1; R_2]. \end{aligned} \quad (2.82)$$

Схема распространения тепловых потоков при микроволновой бакелизации стопки полуфабрикатов АИ, расположенных на диатомитовом основании, в условиях термостатирования представлена на рисунке 2.10.

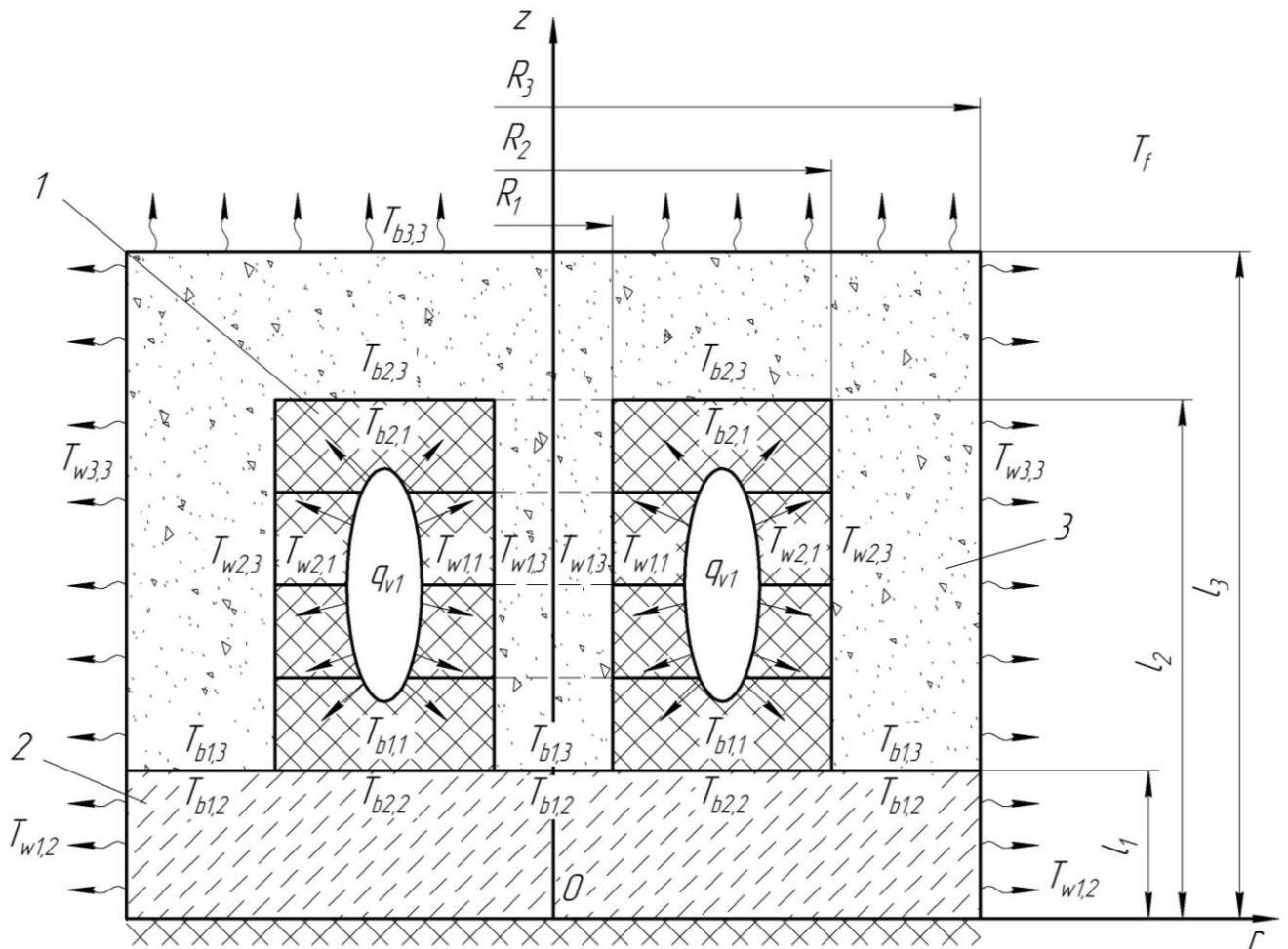


Рис. 2.10. Схема распространения тепловых потоков при микроволновой бакелизации стопки полуфабрикатов АИ 1, расположенных на диатомитовом основании 2 в условиях термостатирования радиопрозрачным теплоизолятором 3 [84]

Начальные и граничные условия для микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ в условиях термостатирования задавали по аналогии с рассмотренным

выше случаем. Так, граничные условия второго рода имеют следующий вид:

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0; \quad r = 0; \quad z \in [0; l_1]; \quad (2.83)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial r} = 0; \quad r = 0; \quad z \in [l_1; l_3]; \quad (2.84)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial z} = 0; \quad z = 0; \quad r \in [-R_3, R_3], \quad (2.85)$$

где R_3 – радиус диатомитового основания, м; l_3 – общая высота слоя теплоизоляции и диатомитового основания, м.

Граничные условия третьего рода:

$$\lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,3} - T_f) + \varepsilon_{p3} \sigma_0 (T_{w3,3}^4 - T_f^4); \quad r = R_3; \quad z \in [l_1; l_3]; \quad (2.86)$$

$$-\lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,3} - T_f) + \varepsilon_{p3} \sigma_0 (T_{w3,3}^4 - T_f^4); \quad r = -R_3; \quad z \in [l_1; l_3]; \quad (2.87)$$

$$\lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,2} - T_f) + \varepsilon_{p2} \sigma_0 (T_{w3,2}^4 - T_f^4); \quad r = R_3; \quad z \in [0; l_1]; \quad (2.88)$$

$$-\lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,2} - T_f) + \varepsilon_{p2} \sigma_0 (T_{w3,2}^4 - T_f^4); \quad r = -R_3; \quad z \in [0; l_1]; \quad (2.89)$$

$$\lambda_{z,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha_f (T_{b3,3} - T_f) + \varepsilon_{p3} \sigma_0 (T_{b3,3}^4 - T_f^4); \quad z = l_3; \quad r \in [-R_3, R_3]. \quad (2.90)$$

Граничные условия четвертого рода:

$$-\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w1,1} = T_{w1,3}; \quad r = R_1; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.91)$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w1,1} = T_{w1,3}; \quad r = -R_1; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.92)$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w2,1} = T_{w2,3}; \quad r = R_2; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.93)$$

$$-\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w2,1} = T_{w2,3}; \quad r = -R_2; \quad z \in [l_1; l_2]; \quad (2.94)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial z} &= \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial z}; \quad T_{b1,3} = T_{b1,2}; \\ z = l_1; \quad r &\in [-R_3; -R_2]; \quad r \in [-R_1; R_1]; \quad r \in [R_2; R_3]; \end{aligned} \quad (2.95)$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial z}; \quad T_{b2,1} = T_{b2,3};$$

$$z = l_2; \quad r \in [-R_2; -R_1]; \quad r \in [R_1; R_2]. \quad (2.96)$$

2.3.2. Численное моделирование распределения температур в стопке полуфабрикатов АИ при микроволновом нагреве

Решить представленную выше математическую модель аналитическим путем не представляется возможным, в связи с чем, ее решение было осуществлено численным методом при помощи ЭВМ в программной среде NX 7.5. Для этого на первом этапе были созданы трехмерные геометрические модели стопки полуфабрикатов, основания, теплоизолятора и сборки, состоящей из данных тел, в соответствии со схемами, представленными на рисунках 2.9, 2.10. Задавали теплофизические характеристики каждого тела, соответствующие реальным материалам. Теплоизоляцию осуществляли в соответствии с описанным в первой главе способом СВЧ-термообработки полуфабрикатов из композиционных материалов на ОТС. В качестве материалов теплоизолятора были выбраны вермикулит вспученный фракционированный ВВФ-2 (размер гранул 0,7 – 3,0 мм), ВВФ-1 (размер гранул 0,3 – 1,5 мм) ТУ 5712-091-00281915-2007, войлок муллитокремнеземистый марки МКРВ-130 ГОСТ 23619-79. Теплопроводность и теплоемкость материалов задавали как функции зависимости от температуры (табл. 2.8).

Коэффициент теплопроводности полуфабрикатов АИ определяли для температур 20 и 200 °С по формулам В.И. Одолевского [79]:

$$\lambda_{ca} = \lambda_a - V_c \lambda_a \left((1 - \lambda_c \lambda_a^{-1})^{-1} - (1 - V_c) \cdot 3^{-1} \right)^{-1},$$

$$\lambda_{can} = \lambda_{ca} - V_n \lambda_{ca} \left((1 - \lambda_n \lambda_{ca}^{-1})^{-1} - (1 - V_n) \cdot 3^{-1} \right)^{-1}, \quad (2.97)$$

$$\lambda_k = \lambda_{can} (1 - \Pi) + \lambda_g \Pi,$$

где $\lambda_k, \lambda_a, \lambda_c, \lambda_n, \lambda_g, \lambda_{ca}, \lambda_{can}$ – соответственно теплопроводность полуфабриката АИ, абразива, связки, наполнителя, воздуха, двухкомпонентной твердой фазы “связка-

абразив”, трехкомпонентной твердой фазы “связка-абразив-наполнитель”, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; V_c, V_n – объемная концентрация соответственно связки в твердой фазе “связка-абразив” и наполнителя в фазе “связка-абразив-наполнитель”, P – пористость полуфабриката АИ.

2.8. Теплофизические характеристики компонентов системы [71, 72]

№ п/п	Наименование материала	Плотность, $кг/м^3$	Удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$	Коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$
1	Вермикулит вспученный фракционированный ВВФ-1	160	840	$0,056 + 0,00025T$
2	Вермикулит вспученный фракционированный ВВФ-2	150	840	$0,055 + 0,00025T$
3	Войлок муллитокремнеземистый МКРВ-200	200	1047	$0,0344 + 0,00028T$
4	Диатомитовый кирпич	500	900	$0,113 + 0,00023T$

Зависимость удельной теплоемкости полуфабрикатов АИ от температуры определяли по выражению (2.55). Исходя из справочных данных [72 – 76], при расчетах сделали допущение, что в диапазоне температур $20 \dots 200 \text{ } ^\circ C$ теплоемкость и теплопроводность компонентов формовочной смеси изменяются в зависимости от температуры по линейному закону. Исходные данные и результаты расчетов приведены в таблице 2.9 и изображены на рисунке 2.11.

В качестве решателя был выбран NX Thermal / Flow (NX тепловой / поток), позволяющий получать результаты теплового анализа, гидро / газодинамического анализа и связанного анализа тепломассопереноса. При моделировании в опциях программы был выбран тепловой тип анализа. Для создания конечно-элементной модели на все тела была наложена 3D тетраэдральная сетка (размер элементов составил 2 мм).

2.9. Теплофизические свойства отдельных компонентов полуфабрикатов АИ в целом в диапазоне температур 20...200 °С [36 – 38, 85]

№ п/п	Наименование материала	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	
			при 20 °С	при 200 °С
1	Электрокорунд белый	$0,338T + 830,2$	28	22
2	Бакелитовая связка	$3,65T + 1171,5$	0,23	-
3	Гипс полуводный	$1,776T + 816,6$	0,35	-
4	Графит	$2,58T + 644,3$	256	197
5	Воздух	$1,167 \cdot 10^{-4}T + 1,00267$	0,0259	0,0393
6	Полуфабрикат АИ без графита	$0,729T + 878,8$	16,033	12,62
			$- 0,019T + 16,42$	
7	Полуфабрикат АИ с графитом (2 % по массе)	$0,762T + 863,9$	16,862	13,269
			$- 0,02T + 17,27$	

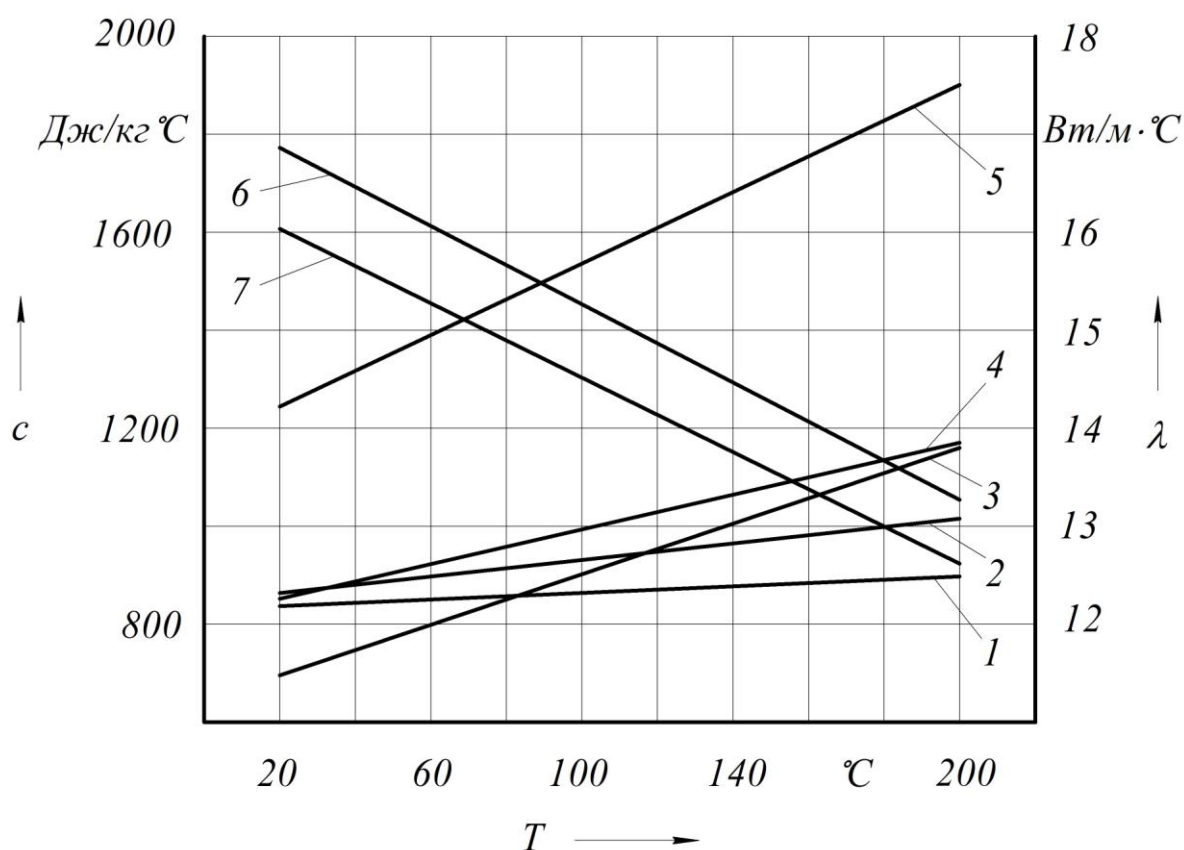


Рис. 2.11. Зависимость теплоемкости и теплопроводности полуфабриката АИ и его компонентов от температуры: 1 – 5 – теплоемкость соответственно электрокорунда белого, полуфабриката АИ, графита, гипса, фенолформальдегидной смолы; 6, 7 – коэффициент теплопроводности соответственно полуфабрикатов АИ с графитом (2 % по массе) и без графита

На следующем этапе моделирования были заданы начальные и граничные условия, описанные в пункте 2.3.1. Затем к стопке полуфабрикатов были приложены тепловые нагрузки. Для определения тепловой нагрузки от воздействия электромагнитного излучения на стопку полуфабрикатов были проведены экспериментальные исследования. Для этого нагревали стопку полуфабрикатов определенной массы в условиях эффективной радиопрозрачной теплоизоляции под воздействием микроволнового излучения мощностью 1 кВт и фиксировали прирост температуры за определенное время нагрева. Таким образом была определена удельная мощность тепловой энергии, генерируемой в единичном объеме стопки полуфабрикатов, при воздействии электромагнитного поля мощностью 1 кВт. Исходя из отработанных режимов термообработки, на основе полученных данных, был построен график зависимости удельной мощности генерируемой тепловой энергии в стопке полуфабрикатов от времени термообработки (рис. 2.12), который и был задан в программе.

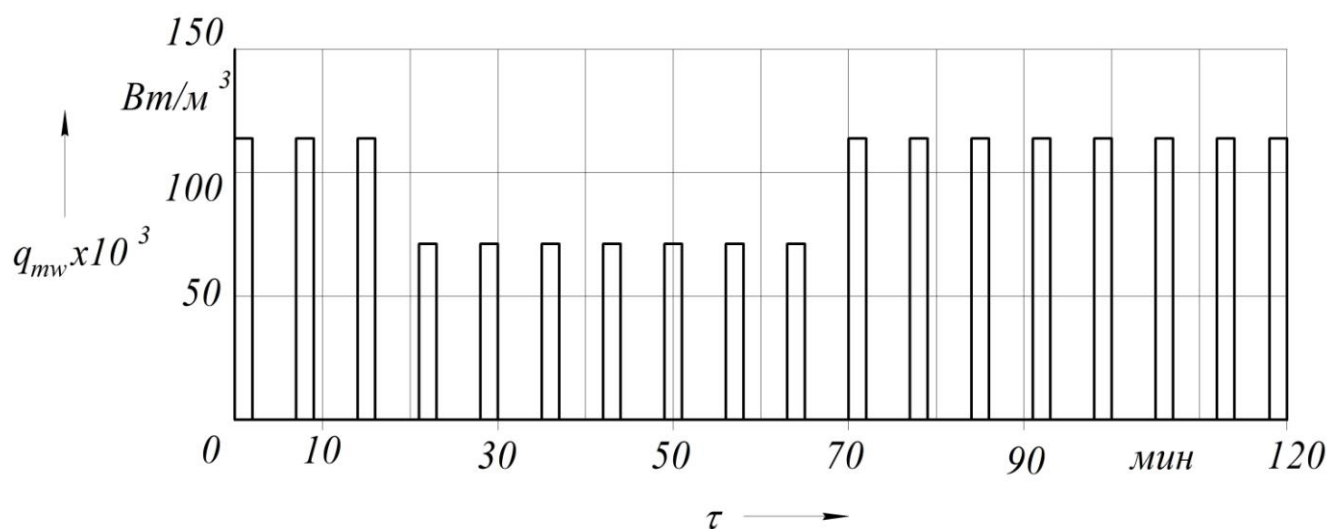


Рис. 2.12. Зависимость удельной мощности генерируемой тепловой энергии в стопке полуфабрикатов от времени термообработки

Энергию, выделяющуюся в стопке полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке за счет реакции полимеризации $q_e(T, \tau)$, определяли экспериментально. Для этого термообработывали сырые полуфабрикаты по отработанным режимам в условиях эффективной теплоизоляции и строили кривые температурного нагрева. После

полного остывания стопки полуфабрикатов проводили ее повторный нагрев в тех же условиях и по тем же режимам, что и в первом случае, для которого также была построена температурная кривая. Температуру измеряли в первом и втором случаях в одной и той же «точке» стопки полуфабрикатов. Зная удельную теплоемкость и плотность полуфабрикатов АИ, с использованием зависимости (2.34), по кривым нагрева построили кривую изменения удельной мощности теплообразования и теплопоглощения в стопке полуфабрикатов АИ за счет реакции полимеризации во времени (рис. 2.13). Так как реакция происходит в объеме связующего, то принимали выделенную энергию равномерно распределенной по объему стопки.

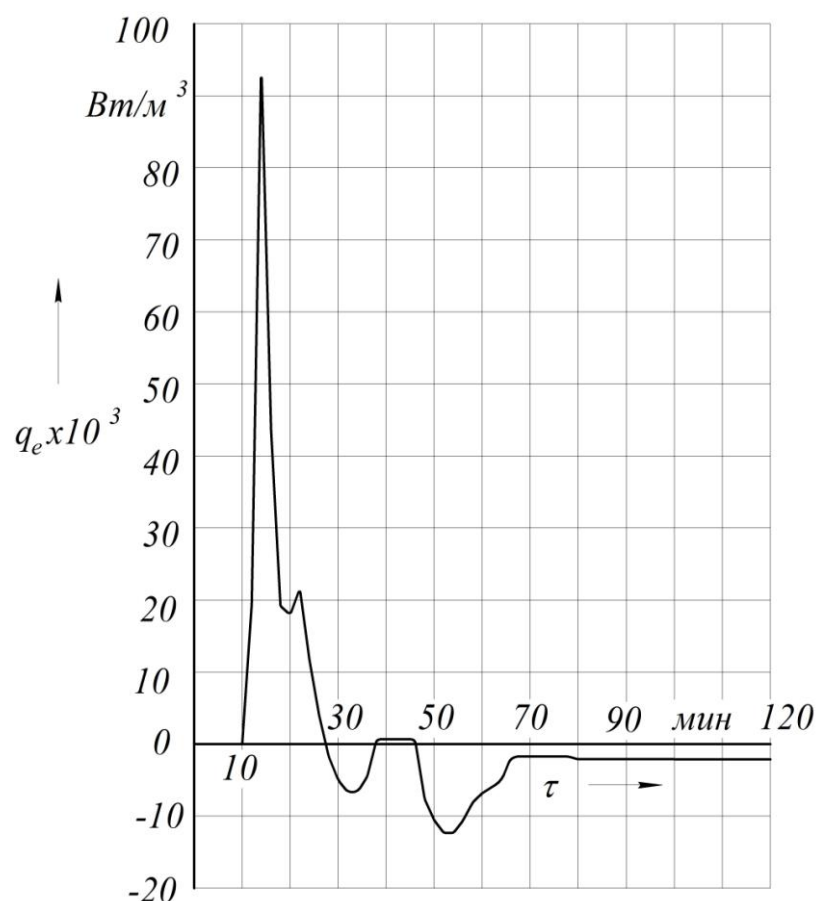


Рис. 2.13. Удельная мощность теплообразования (выше оси ox) или теплопоглощения (ниже оси ox) в стопке полуфабрикатов АИ за счет реакции полимеризации

Среднее значение мощности теплообразования в стопке полуфабрикатов АИ за счет реакции полимеризации определяли по рисунку 2.13 и задавали в про-

грамме как вторую тепловую нагрузку.

После установки опций и параметров решения задачи запускали решение созданной расчетной модели, результатом которого являлось нестационарное температурное поле в стопке полуфабрикатов АИ, теплоизоляторе и диатомитовом основании. Программный комплекс позволяет определить максимальный температурный градиент как в системе в целом, так и в отдельных ее компонентах в любой момент времени термообработки. Анализ моделей микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ, теплоизолированных различными материалами, показал, что наиболее эффективными теплоизоляторами среди отобранных являются вермикулит вспученный фракционированный ВВФ-2 ТУ 5712-091-00281915-2007 и войлок муллито-кремнеземистый МКРВ-200. Однако войлок – весьма не технологичный материал, вследствие чего придется тщательно укрывать каждую стопку полуфабрикатов. Поэтому для практического использования рекомендуем вермикулит вспученный. На рисунках 2.14 – 2.16 показаны распределения температур в стопках полуфабрикатов АИ соответственно без теплоизоляции, теплоизолированных вермикулитом и войлоком муллито-кремнеземистым, после двух часов воздействия микроволнового излучения по режимам, представленным на рисунке 2.13.

Расчеты по разработанным моделям показывают, что градиент температур для системы без теплоизоляции достигает 69 %. Анализ математической модели нагрева с термостатированием полуфабрикатов (2.67) показывает, что теплоизоляция полуфабрикатов позволяет уменьшить градиент температур в стопке полуфабрикатов в процессе бакелизации до 10 %. Применение теплоизоляции не только существенно снижает требуемую мощность источника микроволнового излучения, повышая при этом энергоэффективность процесса термообработки, но и сокращает длительность второго этапа нагрева, отличающегося наименьшей скоростью.

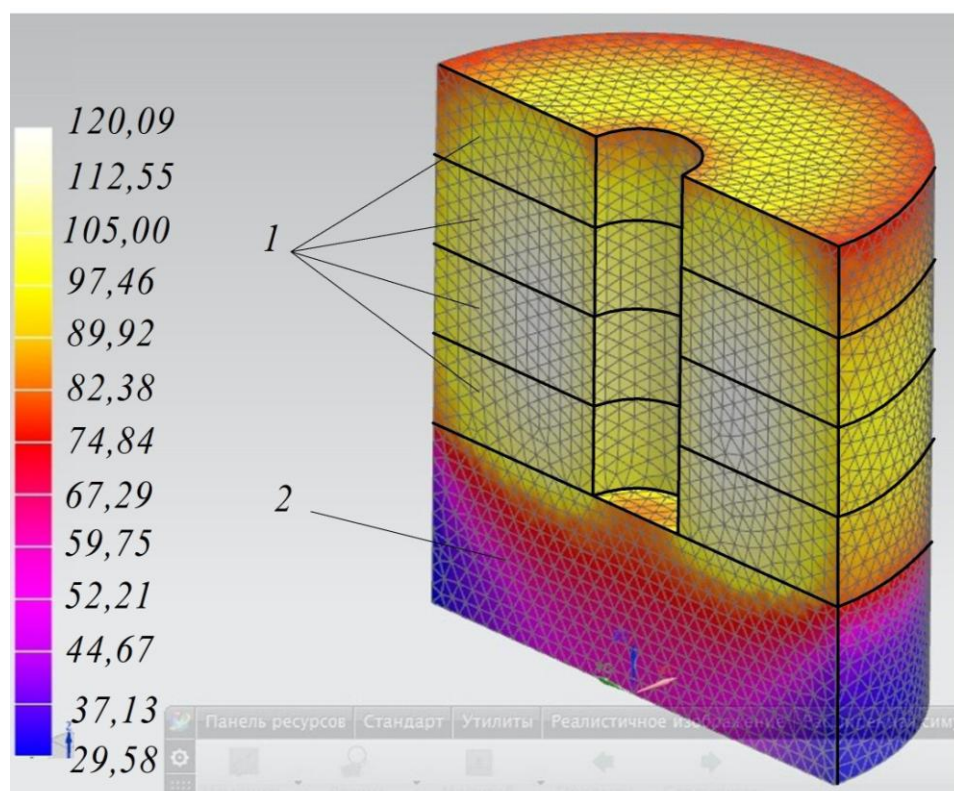


Рис. 2.14. Температурное распределение в стопке полуфабрикатов без теплоизоляции в процессе нагрева под воздействием микроволнового излучения:
1 – полуфабрикаты АИ, 2 – диатомитовое основание

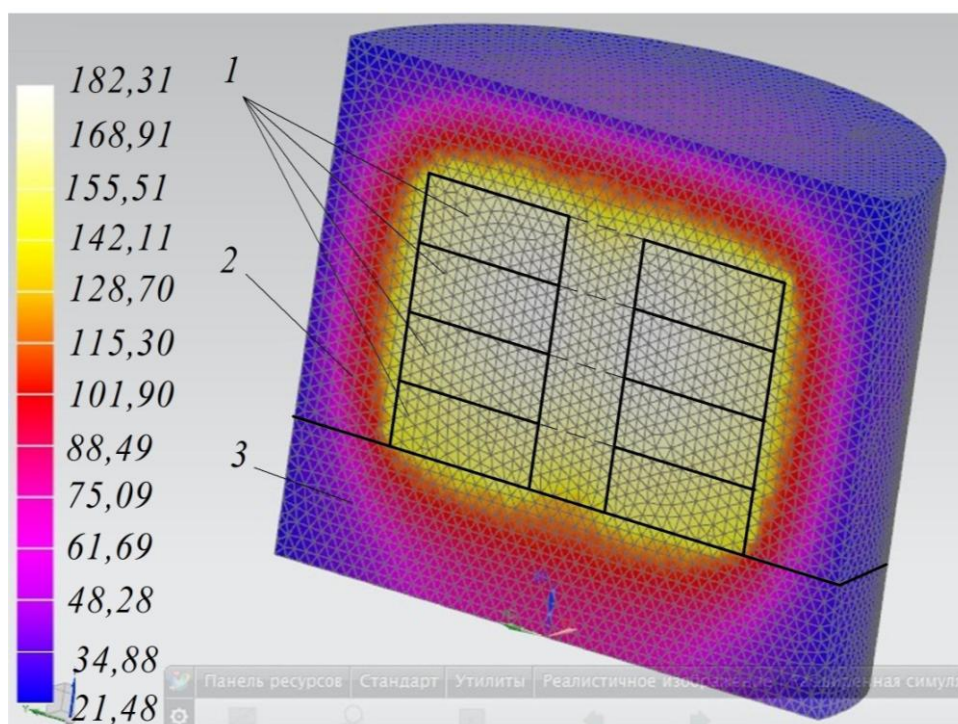


Рис. 2.15. Температурное распределение в стопке полуфабрикатов в процессе нагрева с применением теплоизоляции в виде вермикулита вспученного ВВФ-2 под воздействием микроволнового излучения: 1 – полуфабрикаты АИ, 2 – теплоизолятор, 3 – диатомитовое основание

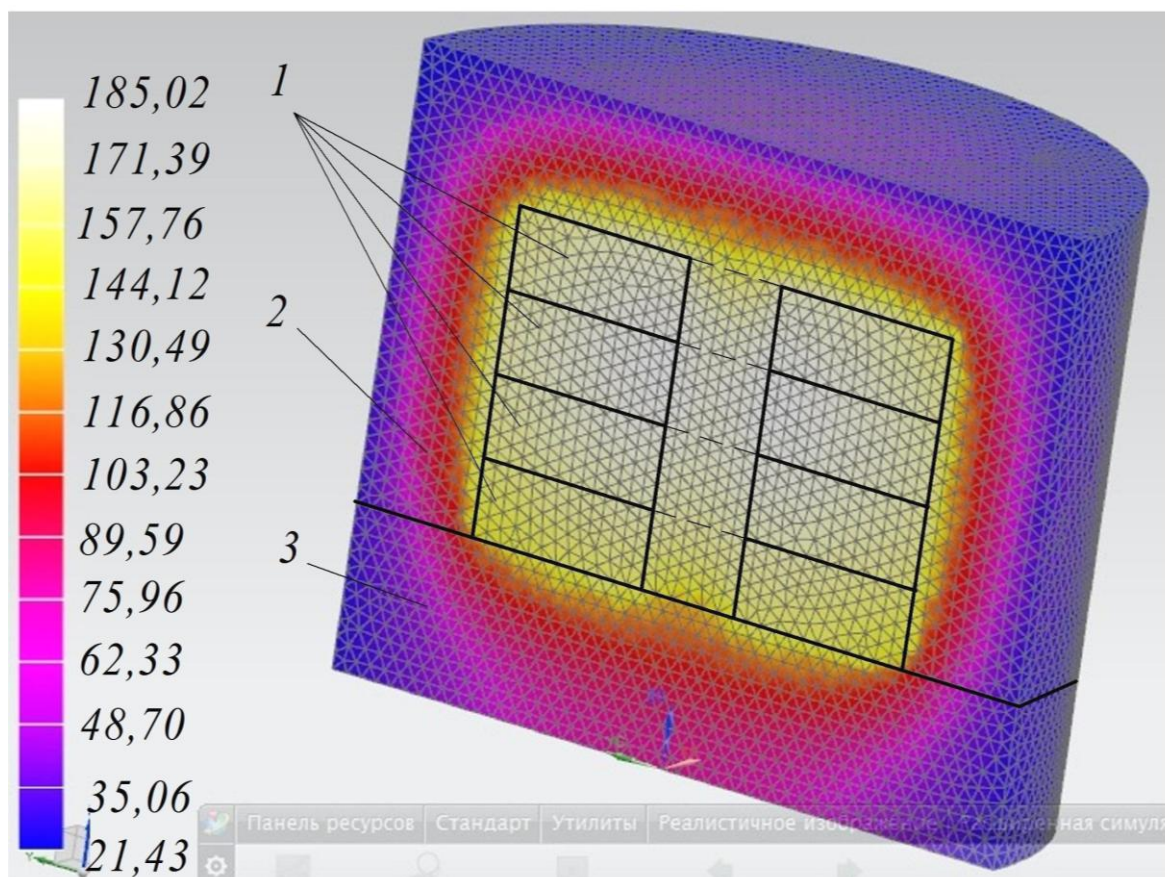


Рис. 2.16. Температурное распределение в стопке полуфабрикатов в процессе нагрева с применением теплоизоляции в виде войлока мулито-кремнеземистого МКРВ-200 под воздействием микроволнового излучения: 1 – полуфабрикаты АИ, 2 – теплоизолятор, 3 – диатомитовое основание

В итоге следует вывод, что благодаря использованию радиопрозрачной теплоизоляции можно существенно снизить градиент температур при микроволновом нагреве. Для оценки влияния теплоизоляции на температурный градиент была разработана математическая модель процесса микроволнового нагрева. Заданы начальные и граничные условия для рассматриваемого случая. Решение математической модели осуществлено численным методом с помощью программного продукта NX 7.5. Проанализированы нестационарные температурные поля компонентов моделируемой системы. Выявлено, что применение в качестве теплоизоляции вермикулита вспученного ВВФ-2 обеспечивает снижение градиента температур до 7 раз.

Построенная математическая модель (2.67) и разработанная методика численного моделирования нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке в микро-

волновом поле (см. п. 2.3.2) позволяют без проведения экспериментальных исследований прогнозировать эффект от использования того или иного вида радиопрозрачной теплоизоляции, отрабатывать режимы термообработки с корректировкой времени начала и окончания ее этапов и мощности СВЧ-излучения. Все это позволит минимизировать длительности технологических циклов термообработки полуфабрикатов АИ различных рецептур. В следующей главе предстоит оценить адекватность построенных математических моделей.

2.4. Выводы

На основе материалов проведенных аналитических исследований можно сделать следующие выводы:

1) Установлено, что доминирующее влияние на процесс деформации полуфабрикатов АИ при бакелизации оказывают пары воды. Однако, потеря воды, как отличного радиопоглощающего материала, влечет за собой снижение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов АИ и скорости их нагрева в СВЧ-поле. Наиболее эффективным сорбентом, способным связать пары воды при бакелизации АИ, по критерию «цена-качество» является сульфат магния.

2) Показано, что снижение объема термообрабатываемых одновременно полуфабрикатов АИ и их твердости, повышение пористости, применение в качестве компонентов формовочной смеси более радиопрозрачных материалов приводят к снижению нагрузки для микроволнового излучения, что может привести к снижению КПД установки и даже поломке оборудования или нанести вред оператору.

3) Получены математические зависимости, позволяющие моделировать изменение радиопоглощающих свойств полуфабриката и скорости его нагрева путем модификации радиопоглощающими наполнителями при совмещенном микроволновом нагреве и нагреве в разных СВЧ-камерах. На основе результатов расчетов, выполненных с использованием разработанного соискателем программного обеспечения, определено необходимое для модификации полуфабрикатов АИ количе-

ство радиопоглощающего наполнителя в зависимости от рецептуры формовочной смеси и производственных условий.

4) Установлено, что существенное влияние на изменение скорости микроволнового нагрева при неизменной нагрузке рабочей камеры СВЧ-установки оказывает высота полуфабриката (стопки полуфабрикатов). При увеличении высоты полуфабрикатов эффект от модификации радиопоглощающими наполнителями снижается и при достижении определенного значения высоты влияние радиопоглощающих наполнителей на скорость нагрева в микроволновом поле может полностью нивелироваться. Выявлено, что повышение скорости совместного микроволнового нагрева полуфабрикатов с разными радиопоглощающими свойствами вследствие модификации связки более существенно, чем при их термообработке в разных СВЧ-камерах.

5) Доказано, что благодаря использованию радиопрозрачной теплоизоляции можно существенно снизить градиент температур в стопке полуфабрикатов АИ при микроволновом нагреве. Для оценки влияния теплоизоляции на температурный градиент представлены математическая модель (2.67) процесса микроволнового нагрева и соответствующие начальные и граничные условия. Решение математической модели осуществлено численным методом с помощью программного продукта NX 7.5. Выявлено, что при применении в качестве теплоизоляции вермикулита вспученного ВВФ-2, градиент температур снижается до 7 раз по сравнению с нагревом без использования теплоизоляции.

6) Адекватность разработанных математических моделей и корректность выводов представленных в первых двух главах, доказана путем экспериментальных исследований влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей связки, а также термостатирования полуфабрикатов на качество и производительность изготовления АИ на бакелитовой связке (см. главы 3 – 5).

Глава 3. Экспериментальные исследования влияния термостатирования полуфабрикатов и специальных наполнителей связки абразивных инструментов на их качество и производительность процесса микроволновой бакелизации

3.1. Методика экспериментальных исследований влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей связки абразивных инструментов и термостатирования полуфабрикатов на производительность процесса микроволновой бакелизации

3.1.1. Критерии оценки влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей связки, а также термостатирования полуфабрикатов на производительность операции бакелизации

Настоящая методика разработана для оценки эффективности применения адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей связки, а также радиопрозрачной теплоизоляции при изготовлении АИ на бакелитовом связующем с целью ускорения процесса его микроволновой термообработки.

Для оценки влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей связки и термостатирования полуфабрикатов АИ на производительность операции микроволновой бакелизации использовали перечисленные ниже критерии:

1. Температуру в заданных информативных точках контроля T , °С.
2. Наличие дефектов формы и геометрии образцов.
3. Цвет поверхности образцов: светло-желтый цвет свидетельствует о неполной бакелизации полуфабрикатов АИ, темно-коричневый – об их перебакелизации.
4. Степень твердости полуфабрикатов АИ.
5. Исходную и остаточную массу полуфабрикатов. Убыль массы после термообработки определяли по следующей зависимости:

$$\Delta m = \frac{m_n - m_k}{m_n} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где m_n , m_k – соответственно масса полуфабриката до и после термообработки, г.

6. Время до полной полимеризации образцов τ , мин.

3.1.2. Параметры, контролируемые при исследовании. Методы и средства измерения

Температуру на открытых участках образцов, а также на поверхности теплоизоляции контролировали при помощи пирометра «Optris MS Plus» (табл. 3.1). Температуру в стопке полуфабрикатов АИ измеряли при помощи мультиметра «Mastech» МТ - 838 (диапазон измерения 20 ... 1000 °С, чувствительность 1 °С) с термопарой типа ХА.

3.1. Техническая характеристика пирометра Optris MS Plus

Параметры	Значение
Диапазон измерения	– 32 ... + 460 °С
Точность	$\pm 1\%$ или $\pm 1\text{ °С}$ в диапазоне 0 до 460 °С; $\pm 1\text{ °С} \pm 0,07\text{ °С/°С}$ от 0 до – 32 °С
Воспроизводимость	$\pm 0,5\%$ или $\pm 0,7\text{ °С}$ от 0 до 530 °С; $\pm 0,7\text{ °С} \pm 0,05\text{ °С/°С}$ от 0 до – 21 °С
Оптическое разрешение (D:S)	20:1
Температурное разрешение	0,1 °С
Время отклика (95 %)	300 мс
Температура работы	0 ... 50 °С
Диапазон спектра	8 – 14 μm
Коэффициент излучения	0,95

Размеры образцов до и после термообработки контролировали универсальными инструментами: штангенциркулем ШЦ-II-250-0,05 (ГОСТ 166, цена деления 0,05 мм, диапазон измерения 0...250 мм, погрешность измерения $\pm 0,025$ мм); микрометром МК 25 (ГОСТ 4381, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 0...25 мм, погрешность измерения $\pm 0,002$ мм). При возникновении ко-

робления полуфабрикатов во время термообработки фиксировали максимальные и минимальные значения величины высоты полуфабрикатов, диаметра посадочного отверстия и наружного диаметра.

Твердость термообработанных образцов контролировали при помощи прибора «Импульс», который фиксирует время прохождения звуковой волны сквозь образец. Зная высоту полуфабрикатов, определяли скорость звуковой волны в образце v по следующей зависимости:

$$v = h t^{-1}, \quad (3.2)$$

где h – высота полуфабриката АИ, м; t – время прохождения звуковой волны сквозь образец, с.

Разделив скорость звуковой волны в образце на 100 и округлив полученное значение до целого нечетного числа, получали звуковой индекс, с помощью которого по таблице соответствия (см. инструкцию по эксплуатации прибора) определяли степень твердости термообработанного полуфабриката АИ.

Исходную и остаточную массы полуфабрикатов контролировали при помощи весов модели «SJ - 12КСЕ» (наибольший предел взвешивания – 12000 г, наименьший предел взвешивания – 50 г, дискретность – 1 г, точность измерения – 0,5 г).

Время термообработки контролировали при помощи таймера, который встроен в микроволновую печь.

3.1.3. Условия, техника эксперимента и порядок проведения исследования

3.1.3.1. Образцы для проведения исследования

Для проведения экспериментального исследования изготовили девять партий полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке с различными наполнителями.

В качестве адсорбирующего наполнителя использовали сульфат магния безводный ($MgSO_4$) навесками, кратными 1,5 % от массы абразивного зерна. В каче-

стве радиопоглощающего наполнителя применяли графит литейный. Применение данных наполнителей в качестве адсорбирующих и радиопоглощающих добавок обусловлено результатами обзора-поиска и теоретическими исследованиями (см. главы 1 и 2).

Для изготовления контрольных образцов использовали формовочную смесь, рецептура которой описана в п. 2.1.3 с обоснованием ее выбора.

Наполнители перед применением дополнительно измельчали при помощи лабораторной шаровой мельницы МЛ - 1М и дезинтегратора ДЗГ - 250, а также высушивали в сушильном шкафе ES - 4610 (диапазон температур 10 ... 300 °С, неравномерность температуры по объему $\pm 1^\circ\text{C}$).

На первом этапе исследований, с помощью лабораторных весов ВК-3000 (предел взвешивания – 3000 г, точность – 0,1 г, класс точности – II) и шприца - дозатора приготавливали навески сырьевых материалов. Навески размещали в промежуточной таре. Затем приготавливали формовочную смесь. Для этого в быстроходный смеситель при вращающемся роторе вводили компоненты смеси и перемешивали до получения на каждой стадии гомогенной массы с допустимым образованием отдельных комков размерам не более 3 мм в следующей последовательности:

- абразивный материал (шлифзерно);
- смола-увлажнитель (БЖ-3 или Абразит 031);
- смола-связующее СФП-12;
- наполнитель.

Полученную смесь высыпали на сито устройства рассеивания и просеивали под собственной силой веса. Оставшиеся на сите отдельные комки принудительно протирали через сито, чем обеспечивали равномерное нанесение порошкообразных компонентов на поверхность протертых зерен абразива.

Холодную формовку полуфабрикатов абразивных кругов 150' 25' 32 проводили на гидропрессе ПБ - 6330 усилием 1000 кН. Облой и избыток порошкообразных компонентов на поверхности образцов удаляли шпателем и кистью.

После формования полуфабрикаты подвергали сушке на открытом воздухе в течение суток. Для обеспечения возможности проникновения термодпары к точкам замера температуры в отдельных полуфабрикатах были проделаны сквозные или глухие пазы с размерами 3×3 мм.

3.1.3.2. План экспериментального исследования влияния адсорбирующих наполнителей связки на производительность бакелизации

Для проведения экспериментального исследования использовали образцы, содержащие следующие наполнители в процентах от массы абразива: гипс – 1,5...4,5 %, сульфат магния – 1,5...6 %.

Рецептуры для изготовления полуфабрикатов ШК представлены в таблице 3.2. Ограничение вводимой массы сульфата магния шестью процентами установлено в связи с тем, что увеличение количества наполнителей ведет к некоторому снижению твердости АИ.

3.2. Рецептуры формовочных смесей для изготовления полуфабрикатов ШК

№ рецептуры	Масса компонентов формовочной смеси, г				
	Абразивное зерно 25A F80	Сульфат магния безводный	Гипс ГВВС-16	Увлажнитель Абразит-031	Связка СФП-012А3
1	1000	-	15	45	90
2		-	30		
3		-	45		
4		15	-		
5		30	-		
6		45	-		
7		60	-		

Микроволновый нагрев экспериментальных образцов проводили по групповой технологии, обрабатывая одновременно по 4 образца, уложенных стопкой, всю поверхность которой укрывали теплоизолирующим материалом (рис. 3.1), в микроволновой печи WD90N30ESP-G4 (объем 30 дм³, мощность 0,9 кВт, частота 2450 МГц). В качестве теплоизоляции применили муллит-кремнеземистую вату (войлок) МКРВ-130, прилегающую к поверхности полуфабрикатов. Для удержания

теплоизоляции на поверхности полуфабрикатов АИ стопку обвязывали асбестовым шнуром диаметром 2 мм.

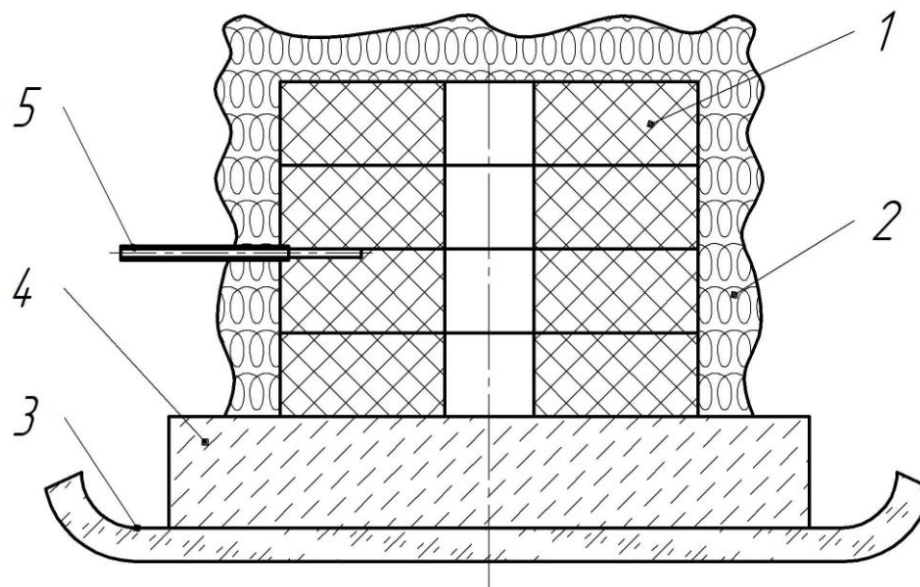


Рис. 3.1. Схема укладки полуфабрикатов АИ при микроволновом нагреве: 1 – полуфабрикаты АИ; 2 – муллитокремнеземистая вата; 3 – термостойкий стеклянный поддон; 4 – диатомит; 5 – фторопластовая трубка с внутренним диаметром 3 мм

Эффективность применения такой теплоизоляции обусловлена уменьшением конвективного теплообмена и значительным снижением тепловых потерь на излучение. Низкие кондуктивные потери за счет теплопередачи «полуфабрикат-теплоизолятор» объясняются незначительной площадью их контактирования.

Микроволновый нагрев проводили циклами «2 мин – излучение включено + 5 мин – излучение выключено». Используемая микроволновая печь резонаторного типа имеет определенную неравномерность распределения электромагнитного поля по объему камеры, в связи с этим паузы длительностью 5 мин позволяют стабилизировать температуру в стопке и обеспечить более равномерный нагрев. Температурой нагрева управляли, задавая изменение средней мощности излучения магнетрона из ряда 40, 50, 70, 80 и 100 %, что соответствует удельной мощности нагрева образцов – 22,8; 28,5; 40; 45,7; 57 Вт/кг, и длительность нагрева при этих средних мощностях. Во время пауз измеряли температуру в информативной точке, а также взвешивали стопки полуфабрикатов АИ вместе со стеклянным поддоном, диатомитовым основанием и теплоизоляцией. Перед проведением термообработки фиксировали начальную температуру и массу полуфабрикатов АИ.

На основании анализа полученных результатов определяли требования к проведению последующих экспериментов, как по рецептуре, так и по режимам термообработки.

Критериями сохранения качества получаемых экспериментальных кругов являлись:

- обеспечение задаваемых при формовке геометрических параметров (отсутствие вспучиваний и трещин) образцов АИ;
- сохранение твердости образцов на уровне контрольных образцов АИ;
- сохранение работоспособности экспериментальных кругов.

3.1.3.3. План экспериментального исследования влияния радиопоглощающих наполнителей связки на производительность изготовления АИ

Бакелизировали образцы, содержащие 1,5 % сульфата магния и 2...4 % графита литейного ГЛ-1.

Рецептуры формовочных смесей представлены в таблице 3.3. Образцы укладывали в стопку, которую теплоизолировали мулито-кремнеземистой ватой (войлоком) МКРВ-130, прилегающей к поверхности полуфабрикатов (см. рис. 3.1). Перед термообработкой, а также во время пауз в микроволновой термообработке, производили замеры температур в информативной точке.

3.3. Рецептуры формовочных смесей для изготовления полуфабрикатов ШК

№ рецептуры	Масса компонентов формовочной смеси, г				
	Абразивное зерно 25А F80	Сульфат магния безводный	Графит ГЛ-1	Увлажнитель Абразит-031	Связка СФП-012А3
8	1000	15	20	45	90
9	1000	15	40	45	90

Затем проводили микроволновую термообработку полуфабрикатов не содержащих радиопоглощающих наполнителей (рецептура № 4), совмещенную с термообработкой полуфабрикатов в состав которых ввели графит в количестве 2 %

от массы абразива (рецептура № 8). Во время пауз в термообработке микроволновым излучением производили замер температуры в двух информативных точках T1 и T2 (рис. 3.2).

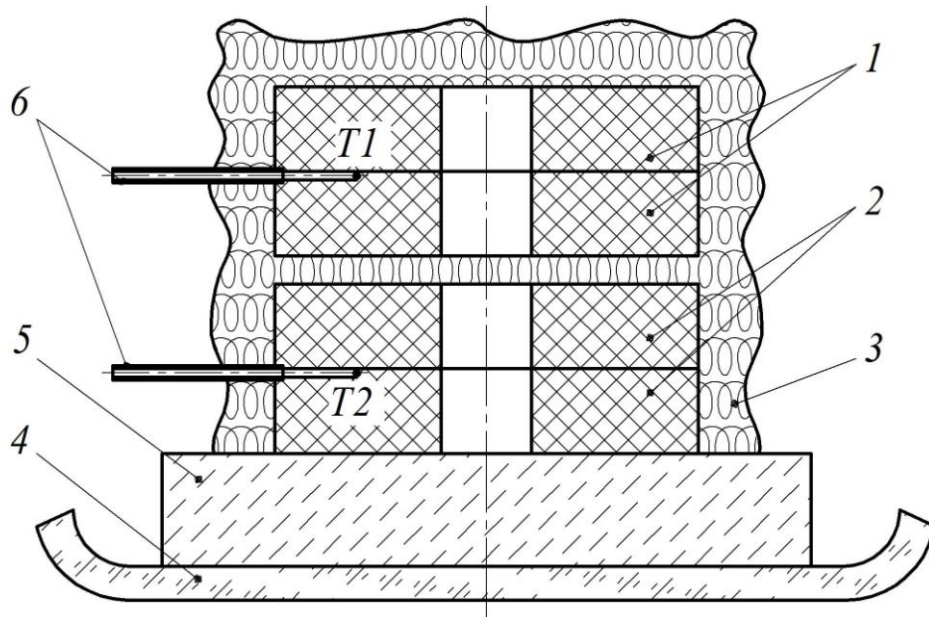


Рис. 3.2. Схема укладки полуфабрикатов АИ при микроволновом нагреве: 1, 2 – полуфабрикаты АИ, соответственно с радиопоглощающими наполнителями и без них; 3 – муллитокремнеземистая вата; 4 – термостойкий стеклянный поддон; 5 – диатомит; 6 – фторопластовые трубки с внутренним диаметром 3 мм

3.1.3.4. План экспериментального исследования влияния термостатирования полуфабрикатов АИ на производительность их термообработки при микроволновом нагреве

Для проведения экспериментального исследования изготовили полуфабрикаты АИ по методике, изложенной в подпункте 3.1.3.1. Бакелизацию осуществляли на отработанных в предыдущих экспериментах режимах, которые обеспечивают получение полуфабрикатов АИ без признаков деформаций и вспучивания.

На отрезном станке модели GS - 400 в образцах были проделаны пазы размером 3×3 мм. Микроволновый нагрев образцов проводили по групповой технологии, обрабатывая одновременно по 4 образца, уложенных стопкой (рис. 3.3). Образцы укладывали на диатомитовое основание 6, вокруг которого была зафиксирована стеклотекстолитовая оболочка 8. В полученные в результате укладки

стопки полуфабрикатов каналы установили фторопластовые трубки 7 с внутренним диаметром 3 мм, после чего всю систему засыпали вермикулитом 9 вспученным фракционированным марки ВВФ-2, либо укрывали муллито-кремнеземистой ватой МКРВ-130. Толщина слоя теплоизоляции в обоих случаях была одинаковой.

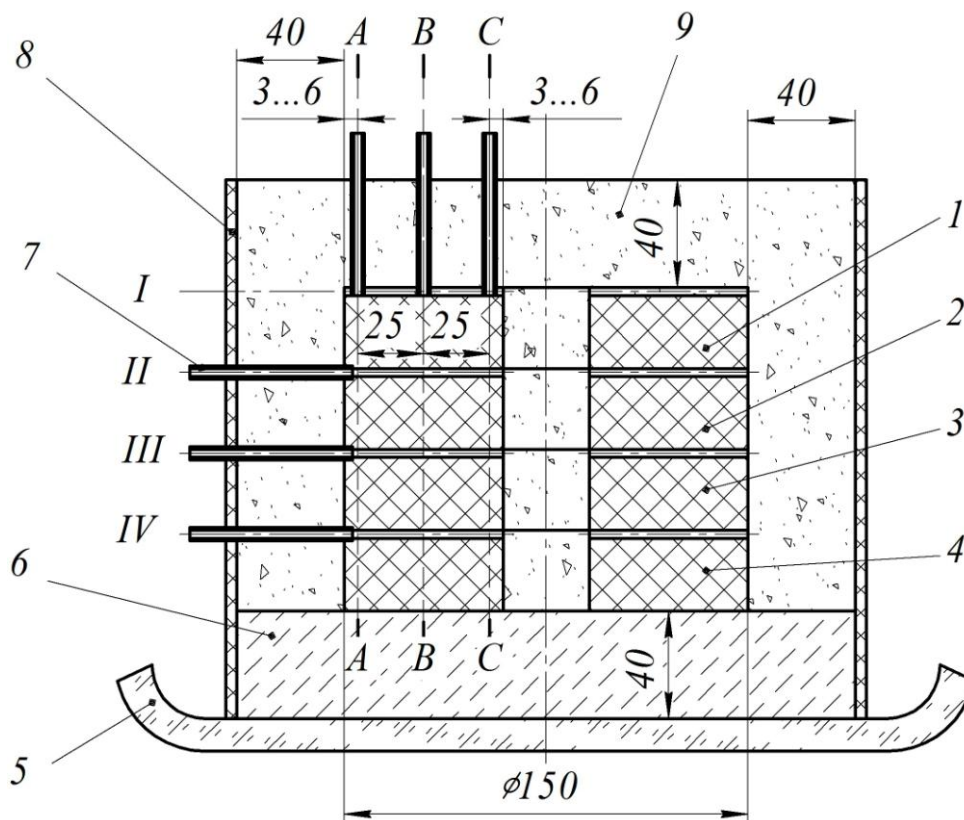


Рис. 3.3. Схема укладки полуфабрикатов АИ при микроволновом нагреве: 1 – 4 – полуфабрикаты АИ; 5 – термостойкий стеклянный поддон; 6 – диатомит; 7 – фторопластовая трубка с внутренним диаметром 3 мм; 8 – стеклотекстолитовая оболочка; 9 – вермикулит

Термообработку осуществляли в микроволновой печи объемом 30 дм³. В процессе нагрева с помощью термопары фиксировали температуру в различных сечениях (А – С) и на различных уровнях (I – IV) стопки полуфабрикатов АИ.

После этого проводили термообработку полуфабрикатов АИ в микроволновом поле без использования теплоизоляции (рис. 3.4). Режимы термообработки, рецептуру и массу стопки полуфабрикатов при этом не изменяли.

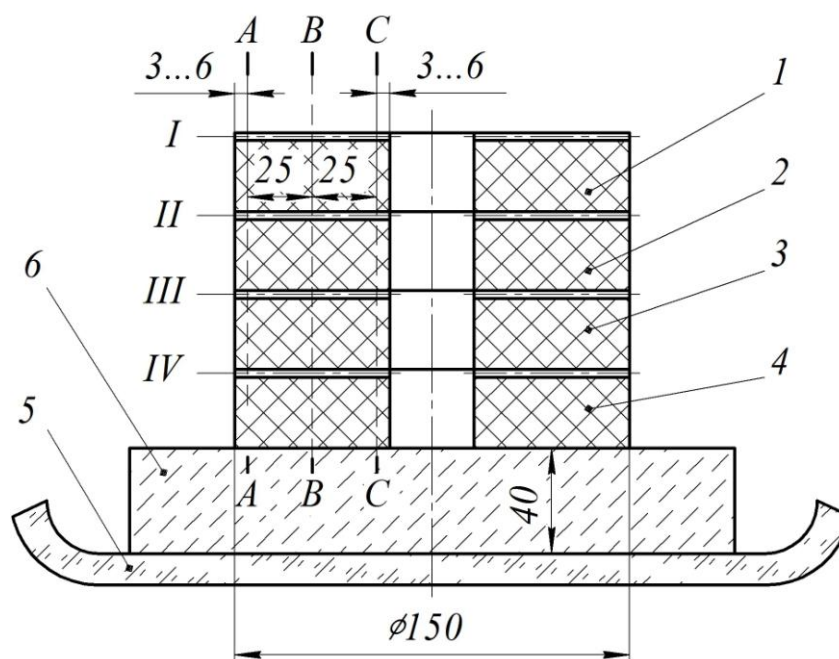


Рис. 3.4. Схема укладки полуфабрикатов АИ при микроволновом нагреве без использования теплоизоляции: 1 – 4 – полуфабрикаты АИ; 5 – термостойкий стеклянный поддон; 6 – диатомит

После термообработки фиксировали цвет полуфабрикатов, наличие или отсутствие деформаций, а также измеряли твердость каждого полуфабриката АИ из стопки в различных информативных точках (рис. 3.5) при помощи прибора «Импульс».

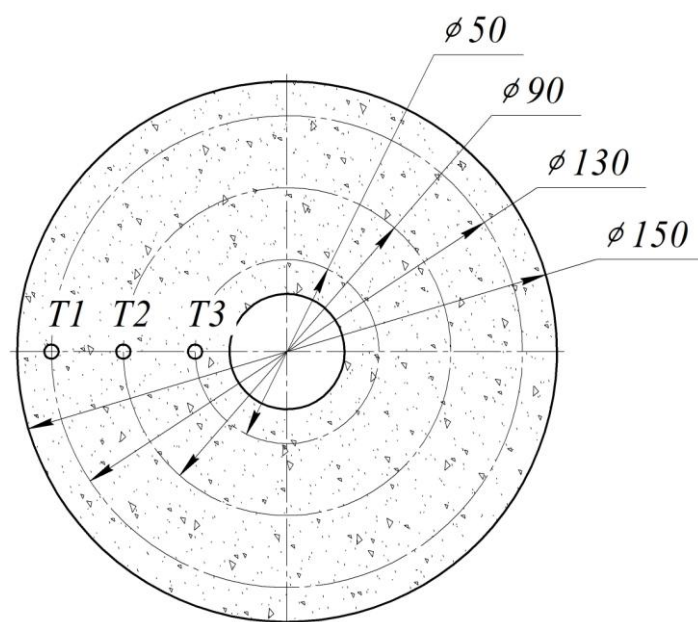


Рис. 3.5. Контрольные точки замеров твердости полуфабриката АИ

3.1.3.5. Многофакторный план исследования микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ с различными наполнителями в условиях теплоизоляции

Бакелизацию полуфабрикатов АИ производили на режимах, при которых скорость нагрева образцов была близка к критической: либо на 15 ... 30 % ниже, либо на 15 ... 30 % выше скорости нагрева в критическом диапазоне температур (80 – 120 °С), при которой происходит вспучивание образцов, изготовленных по стандартной рецептуре (№ 1, см. табл. 3.2).

Варьировали содержанием наполнителей C , мощностью микроволнового излучения P и массой загружаемой в микроволновую камеру стопки полуфабрикатов m .

Использовали полуфабрикаты АИ на бакелитовой связке с различными наполнителями (табл. 3.4), изготовленные по методике изложенной в подпункте 3.1.3.1.

3.4. Номенклатура полуфабрикатов АИ для проведения микроволновой термообработки в условиях теплоизоляции полуфабрикатов

Обозначение полуфабрикатов	Наполнитель		Содержание наполнителей, %		Типоразмер ШК
	№ 1 (основной)	№ 2			
			№ 1	№ 2	
П1	—	—	0	0	1 150' 25' 32
П2	Сульфат магния	—	2	0	
П3	Сульфат магния	—	4	0	
П4	Графит	Сульфат магния	2	2	
П5	Графит	Сульфат магния	4	2	

Материал теплоизоляции полуфабрикатов АИ выбирали исходя из результатов ранее проведенных опытов. В процессе исследований фиксировали время τ , необходимое для нагрева полуфабрикатов до температуры их полной бакелизации (200 °С), температуру T стопки полуфабрикатов после 60 мин нагрева, а также наличие или отсутствие деформаций. Температуру измеряли в одной информативной точке в середине стопки полуфабрикатов.

3.1.4. Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов

Провели полный факторный эксперимент (ПФЭ) 2^k . Число факторов “к” принимали равным трем (табл. 3.11).

3.5. Матрица планирования эксперимента 2^3 по исследованию зависимости времени термообработки τ и температуры T от содержания наполнителя C , мощности микроволнового излучения P и массы стопки полуфабрикатов m

Условия планирования	Факторы						
	$C, \%$		$P, \text{Вт}$		$m, \text{г}$		
	X_1		X_2		X_3		
Верхний уровень	4		190		5750		
Основной уровень	2		170		5175		
Нижний уровень	0		150		4600		
Номер опыта	Действительные значения			Кодированные значения			
	$C, \%$	$P, \text{Вт}$	$m, \text{г}$	X_0	X_1	X_2	X_3
1	0	150	4600	+	–	–	–
2	4	150	4600	+	+	–	–
3	0	190	4600	+	–	+	–
4	4	190	4600	+	+	+	–
5	0	150	5750	+	–	–	+
6	4	150	5750	+	+	–	+
7	0	190	5750	+	–	+	+
8	4	190	5750	+	+	+	+

Обработку результатов экспериментов и определение коэффициентов регрессии проводили для уровня значимости 0,95 по методике, изложенной в работе [75], на ПЭВМ IBM AMD – 1600.

При термообработке полуфабрикатов АИ с различными наполнителями в условиях теплоизоляции выполнили две группы экспериментов (табл. 3.6, 3.7), последовательность проведения которых определили по таблице случайных чисел [8].

3.6. Состав и количество опытов по исследованию зависимости времени термообработки τ и температуры T от содержания в полуфабрикате АИ сульфата магния C_s , мощности микроволнового излучения P и массы стопки полуфабрикатов m

Порядок реализации опытов (табл. 3.5)	Мощность микроволнового излучения P , Вт	Масса стопки полуфабрикатов АИ m , г	Применяемые полуфабрикаты АИ (табл. 3.4)
7	190	5750	П1
3	190	4600	П1
8	190	5750	П3
1	150	4600	П1
6	150	5750	П3
2	150	4600	П3
5	150	5750	П1
4	190	4600	П3

3.7. Состав и количество опытов по исследованию зависимости времени термообработки τ и температуры T от содержания в полуфабрикате графита C_s , мощности микроволнового излучения P и массы стопки полуфабрикатов m

Порядок реализации опытов (табл. 3.5)	Мощность микроволнового излучения P , Вт	Масса стопки полуфабрикатов АИ m , г	Применяемые полуфабрикаты АИ (табл. 3.4)
5	150	5750	П2
8	190	5750	П5
1	150	4600	П2
7	190	5750	П2
3	190	4600	П2
6	150	5750	П5
4	190	4600	П5
2	150	4600	П5

3.1.5. Обработка результатов исследований и их анализ

3.1.5.1. Расчет числа параллельных опытов

Число параллельных опытов в серии рассчитывали по методике [61, 75], приняв нормальный закон распределения случайной величины:

$$m_o = \frac{t_\beta^2 \cdot \sigma_{Y_i}^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.2)$$

где t_β – квантиль нормального распределения измеряемого параметра при доверительной вероятности β ($\beta = 0,95$, при этом $t_\beta = 1,96$); $\sigma_{Y_i}^2$ – дисперсия распределения измеряемого параметра; ε – заданная ошибка выборочной средней. При этом $\varepsilon = \alpha \cdot \bar{Y}$, где α – относительная ошибка среднего значения параметра. Приняли $\alpha = 0,15$ (при более точных измерениях $\alpha = 0,25$); $\bar{Y}$ – среднее значение параметра.

Величины $\bar{Y}$ и $\sigma_{Y_i}^2$ определяли по результатам предварительных экспериментов:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{п}}} Y_i}{n_{\text{п}}}, \quad (3.3)$$

где Y_i – текущее значение параметра при i -ом опыте; $n_{\text{п}}$ – количество опытов предварительного эксперимента.

$$\sigma_{Y_i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{п}}} (Y_i - \bar{Y})^2}{n_{\text{п}} - 1}. \quad (3.4)$$

Число параллельных опытов рассчитывали по результатам предварительных экспериментов для параметра T , как параметра, имеющего наибольший разброс значений при замерах (табл. 3.8).

3.1.5.2. Построение математической модели процесса

Исходную математическую модель ПФЭ 2^3 представили в виде

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{1,2} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{1,3} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{2,3} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{1,2,3} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (3.5)$$

Коэффициенты регрессии определяли по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{V=1}^N X_{i,V} \cdot \bar{Y}_V}{N}, \quad (3.6)$$

где $X_{i,V}$ – номер фактора (в кодовых обозначениях).

После нахождения величин коэффициентов регрессии и составлении уравнения, решали вопрос о статистической значимости найденных величин.

3.8. Расчет необходимого числа параллельных опытов m_o при исследовании зависимости температуры T после 60 мин нагрева от мощности микроволнового излучения P и массы стопки полуфабрикатов m

№ опыта	Параметр T , °C				Расчет числа параллельных опытов
	m , г				
	5750		4600		
	P , Вт				
	150	190	150	190	
1	78	95	99	124	1) $t_{\beta}^2 = 3,842$; $\bar{Y} = 76,8$; $\varepsilon = 11,5$; $\sigma_{Y_i}^2 = 22,95$; $m_o = 0,67$; 2) $\bar{Y} = 95,1$; $\sigma_{Y_i}^2 = 30,36$; $m_o = 0,57$; 3) $\bar{Y} = 90,6$; $\sigma_{Y_i}^2 = 50,78$; $m_o = 1,06$; 4) $\bar{Y} = 114,9$; $\sigma_{Y_i}^2 = 81,11$; $m_o = 1,05$. Принимаем число параллельных опытов в серии $m_o = 2$.
2	81	99	96	126	
3	73	100	98	109	
4	72	89	83	112	
5	71	88	91	125	
6	72	101	83	104	
7	83	91	82	107	
8	82	91	97	106	
9	79	102	86	121	

3.1.5.3. Обработка результатов эксперимента

Определение коэффициентов регрессии и построение математической модели производили на ЭВМ при помощи программы «Эксперимент 2в3». Для запуска расчета в данной программе необходимо заполнить журнал планирования эксперимента и ввести результаты экспериментального исследования. В процессе расчета программа определяет значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента t . Для каждого коэффициента вычисляется значение критерия t_i и сравнивается с табличным значением t_k . Статистически незначимые коэффициен-

ты отбрасываются без пересчета остальных. Также программный продукт позволяет проверить однородность дисперсий по критерию Кохрена G . Табличное значение критерия Кохрена при этом находится при уровне значимости $q = 5 \%$. В случае если проверка даст отрицательный результат, то необходимо будет увеличить число параллельных опытов. На последнем этапе программа определяет расчетное F и табличное F_k значения критерия Фишера, после сравнения которых, делает вывод об адекватности модели. При этом табличное значение критерия Фишера F_k находится при уровне значимости $q_{ад} = 5 \%$.

3.1.5.6. Метрологическая оценка

При проведении экспериментальных исследований для оценки достоверности результатов измерения и выявления промахов (аномальных результатов) опытные данные подвергали предварительной обработке (все значения умножали на 100, затем уменьшали на 100 и ранжировали) и рассчитывали статистический критерий [75]:

$$Q_9 = \frac{Y_m^* - Y_{m-1}}{Y_m - Y_1}, \quad (3.7)$$

где Y_m^* – аномальное значение результатов измерения; Y_{m-1} – значение результата, соседнего с Y_m^* в вариационном ряду; $(Y_m - Y_1)$ – размах выборки (разность между значениями крайних членов вариационного ряда).

Если экспериментальное значение Q_9 превышало табличное Q_T (табл. 4, [75]) для конкретного значения доверительной вероятности P , то результат Y_m^* считали аномальным (промахом).

Метрологическую оценку проводили, используя методику, изложенную в [75].

Абсолютные погрешности измерений ΔY_i определяли, суммируя квадратично систематические и случайные погрешности измерения:

$$\Delta Y_i = \pm \sqrt{t_\gamma^2 \cdot \sigma_{Y_i} + \Delta Y_{ic}^2}, \quad (3.8)$$

где ΔY_{ic} – систематическая погрешность измерения; $t_\gamma^2 \cdot \sigma_{Y_i}$ – случайная погрешность измерения; t_γ – коэффициент риска, определяемый доверительной вероятностью γ и числом измерений n ; σ_{Y_i} – средняя квадратическая погрешность измерения:

$$\sigma_{Y_i} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{(n-1)}}. \quad (3.9)$$

Относительная погрешность измерения:

$$\delta_{Y_i} = \pm \frac{\Delta Y_i}{\bar{Y}}. \quad (3.10)$$

Абсолютные погрешности измерения критериев, являющихся результатами косвенных измерений, определяли по формуле:

$$\Delta x = \sum_j \frac{dx}{dY_j} \cdot \Delta Y_j. \quad (3.11)$$

3.2. Результаты экспериментального исследования

3.2.1. Экспериментальное исследование влияния адсорбирующих наполнителей связки на производительность бакелизации по воздействию микроволнового излучения

Для оценки адекватности математических моделей и правильности сделанных выводов (см. главу 2) в соответствии с методикой, представленной в параграфе 3.1, провели однофакторные экспериментальные исследования влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей, а также теплоизоляции полуфабрикатов на производительность бакелизации в микроволновом поле. На первом этапе исследований осуществляли бакелизацию образцов, содержащих адсорбирующие наполнители. Режим термообработки включал в себя 18 циклов нагрева: 3 цикла нагрева с мощностью микроволнового излучения 100 %, затем 10 циклов с

мощностью 50 % и 5 циклов с мощностью 100 %. После каждого цикла микроволнового нагрева следовала пауза в течение 5 мин при отсутствии микроволнового излучения.

Результаты замера температуры и убыли массы в процессе микроволнового нагрева полуфабрикатов приведены в таблицах 3.9, 3.10. Начальная температура образцов – 23 °С.

3.9. Результаты замера температуры в процессе микроволнового нагрева стопки полуфабрикатов АИ

№ рецептуры (по табл. 3.2)	Номер цикла микроволнового нагрева				
	3	6	9	13	18
	Температура стопки полуфабрикатов, °С				
1	91	99	114	134	197
2	92	99	115	134	196
3	91	98	115	135	197
4	92	102	118	140	202
5	92	103	118	141	203
6	93	103	119	142	200
7	93	104	120	143	204

3.10. Результаты замера потери массы в процессе микроволнового нагрева стопки полуфабрикатов АИ

№ рецеп- туры (по табл. 3.2)	Номер цикла микроволнового нагрева										
	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18
	Убыль массы Δm , %										
1	0	0	0,073	0,144	0,264	0,409	0,671	0,768	0,978	1,065	1,134
2	0	0	0,097	0,168	0,265	0,368	0,505	0,723	0,855	1,029	1,095
3	0	0	0,069	0,138	0,252	0,349	0,485	0,710	0,843	1,004	1,025
4	0	0	0,037	0,066	0,144	0,203	0,240	0,409	0,474	0,585	1,026
5	0	0	0,049	0,088	0,112	0,163	0,303	0,302	0,409	0,624	0,887
6	0	0	0,31	0,59	0,098	0,159	0,238	0,289	0,383	0,514	0,802
7	0	0	0,39	0,65	0,101	0,151	0,226	0,275	0,364	0,481	0,757

После проведения термообработки полуфабрикаты АИ были осмотрены в поисках трещин и деформаций, измерены их геометрические параметры и измерена

твердость (табл. 3.11). Все образцы имели коричневый цвет, что свидетельствовало о завершении процесса бакелизации связки.

Согласно результатам исследования (см. табл.3.9) средняя скорость нагрева полуфабрикатов за первые три цикла (нагрев - пауза при $P_{y\partial} = 57$ Вт/кг) составила 3,3 °С/мин (нагрев до 92 °С), за 4 – 6 циклы (при $P_{y\partial} = 28,5$ Вт/кг) – 0,4 °С/мин (нагрев до 101 °С), за 7 – 9 циклы (при $P_{y\partial} = 28,5$ Вт/кг) – 0,8 °С/мин (нагрев до 117 °С), за 10 – 13 циклы (при $P_{y\partial} = 28,5$ Вт/кг) – 0,8 °С/мин при (нагрев до 138 °С до отверждения полуфабрикатов), за 14 – 18 циклы (при $P_{y\partial} = 57$ Вт/кг) составила 1,8 °С/мин (нагрев до 200 °С до полной бакелизации полуфабрикатов).

3.11. Результаты осмотра и измерения полуфабрикатов после термообработки

№ рецептуры (по табл. 3.2)	Наличие деформаций	Наличие трещин	Макс. диаметр посадочного отверстия, мм	Мин. диаметр посадочного отверстия, мм	Скорость звуковой волны / твердость
1	на торце п/ф	трещины на посадочном отверстии	32,9	32,8	4221 / V
2	на торце п/ф	нет	32,7	32,6	4147 / V
3	на торце п/ф	нет	32,7	32,5	3914 / S - T
4	нет	нет	32,6	32,5	4216 / V
5	нет	нет	32,6	32,5	4167 / V
6	нет	нет	32,6	32,5	3965 / S - T
7	нет	нет	32,6	32,5	3817 / S - T

Установлено, что деформация при бакелизации не возникла только у образцов с наполнителем из сульфата магния. Наибольшую деформацию и разрушения имели образцы с минимальным содержанием гипса. Относительная убыль массы стопки полуфабрикатов Δm после полного цикла термообработки для полуфабрикатов с различными наполнителями отличалась незначительно (см. табл. 3.10). При этом у полуфабрикатов с наполнителем из сульфата магния (рецептуры № 4 – 7) на конечном этапе термообработки скорость потери массы существенно больше, чем у полуфабрикатов с гипсом (рецептуры № 1 – 3). Кроме этого, было выявлено, что при достижении температур 170...200 °С, с поверхности полуфабри-

катов с сульфатом магния происходит обильное паровыделение. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что применение сульфата магния в качестве наполнителя способствует сдвигу во времени этапа выделения паров воды. В критическом диапазоне температур сульфат магния связывает пары воды с образованием кристаллогидрата, а на конечном этапе термообработки начинается его разложение с отделением молекул воды, при этом обильное паровыделение уже не приводит к деформации полуфабриката, так как он уже отвердел и получил достаточную прочность. Также выявлено, что полуфабрикаты с сульфатом магния на определенных этапах термообработки имеют более высокую скорость микроволнового нагрева, чем полуфабрикаты с гипсом. Это объясняется тем, что связывая пары воды, которая является отличным радиопоглощающим материалом, сульфат магния повышает радиопоглощающие свойства полуфабрикатов, что способствует повышению скорости микроволнового нагрева. По мере увеличения процентного содержания наполнителей твердость термообработанных образцов уменьшается, в связи с чем, рекомендовано ограничить содержание сульфата магния в полуфабрикате значением 1,5 % от массы абразивного материала, т.е. заменить наполнитель гипс в рецептуре, представленной в п. 2.1, на такое же количество сульфата магния.

3.2.2. Экспериментальное исследование влияния радиопоглощающих наполнителей связки на производительность бакелизации по воздействию микроволнового излучения

На втором этапе экспериментальных исследований, в соответствии с методикой, приведенной в параграфе 3.1 последовательно осуществляли бакелизацию с микроволновым нагревом стопок полуфабрикатов АИ одной рецептуры. Образцы были уложены в стопку, которую теплоизолировали муллитом-кремнеземистой ватой (войлоком) МКРВ-130 (см. рис. 3.1). Рецептуры для изготовления полуфабрикатов шлифовальных кругов представлены в таблицах 3.2, 3.3. В ходе предварительных исследований было выявлено, что полуфабрикаты с наполнителем из

графита имеют более высокую скорость нагрева в микроволновом поле. В связи с этим, с целью снижения вероятности возникновения деформаций на поверхностях полуфабрикатов, мощность микроволнового излучения при назначении режимов термообработки была снижена на 20 % по сравнению с предыдущими экспериментами. При этом количество циклов осталось неизменным: 3 цикла нагрева с мощностью микроволнового излучения 80 %, затем 10 циклов с мощностью 40 % и 5 циклов с мощностью 80 %. Результаты замера температуры в процессе микроволнового нагрева полуфабрикатов приведены в таблице 3.12. Начальная температура полуфабрикатов – 22 °С.

3.12. Результаты замера температуры в процессе микроволнового нагрева стопки полуфабрикатов АИ

№ рецеп- туры (по табл. 3.2, 3.3)	Номер цикла микроволнового нагрева					
	3	6	9	12	15	18
	Температура стопки / расчетное значение (по программе RPT3), °С					
4	73 / -	82 / -	94 / -	108 / -	132 / -	159 / -
8	89 / 91	109 / 103	124 / 118	140 / 135	169 / 165	202 / 199
9	95 / 86	111 / 97	126 / 111	145 / 127	173 / 156	210 / 188

Установлено, что введение в формовочную смесь графита позволяет снизить удельную мощность микроволнового излучения в среднем на 20 % при сохранении скорости нагрева. При этом увеличение содержания радиопоглощающего наполнителя с 2 до 4 % дает незначительный эффект. Расчет по программе RPT3, (см. главу 2), показал, что при введении в формовочную смесь двух процентов графита скорость микроволнового нагрева при рассматриваемых условиях должна увеличиться в 1,25 раза, при введении четырех процентов графита в 1,18 раза. Максимальное расхождение результатов расчета и экспериментальных значений температуры составляет 14,4 % (табл. 3.12, 6-ой цикл термообработки). Полуфабрикаты с содержанием 4 % графита слегка деформировались (табл. 3.13), так как скорость их нагрева, была максимальной и оказалась критической для полуфабрикатов данной рецептуры. Полуфабрикаты без радиопоглощающих наполните-

лей имели светловатый цвет, что свидетельствовало о незавершенности процесса бакелизации связки. При увеличении содержания радиопоглощающих наполнителей отмечено снижение твердости термообработанных полуфабрикатов АИ (см. табл. 3.13). В результате рекомендуется ограничить содержание графита в полуфабрикате двумя процентами от массы абразива.

3.13. Результаты осмотра и измерения полуфабрикатов после термообработки

№ рецептуры (по табл. 3.2, 3.3)	Наличие деформаций	Наличие трещин	Макс. диаметр посадочного отверстия, мм	Мин. диаметр посадочного отверстия, мм	Скорость звуковой волны / твердость
4	нет	нет	32,7	32,6	4199 / V
8	нет	нет	32,8	32,7	4178 / V
9	на торце п/ф	нет	32,6	32,5	4108 / V

На третьем этапе исследований осуществляли совмещенную бакелизацию с микроволновым нагревом полуфабрикатов, не содержащих радиопоглощающих наполнителей (рецептура № 4 по табл. 3.2), с полуфабрикатами, в состав которых введен графит в количестве 2 % от массы абразива (рецептура № 8 по табл. 3.3). Режим термообработки по сравнению с предыдущим экспериментом не изменялся. Схема укладки полуфабрикатов представлена на рисунке 3.2. Результаты замера температуры в процессе микроволнового нагрева образцов приведены в табл. 3.14, начальная температура полуфабрикатов – 23 °С.

3.14. Результаты замера температуры в процессе микроволнового нагрева стопки полуфабрикатов АИ

Контрольная точка замера (см. рис. 3.10)	Номер цикла микроволнового нагрева					
	3	6	9	12	15	18
	Температура в контрольных точках / расчетное значение (по программе RPT1), °С					
T1	130 / 147	139 / 161	153 / 181	169 / 202	198 / 239	230 / 284
T2	61 / -	67 / -	75 / -	84 / -	99 / -	118 / -

Анализ результатов исследования показывает, что расхождение теоретических и экспериментальных значений температур полуфабрикатов с радиопоглощающими наполнителями возрастает с 13 % (на первых этапах термообработки) до 23 % (при достижении температуры 230 °С). Это объясняется тем, что при увеличении температуры, несмотря на наличие теплоизоляции, увеличиваются тепловые потери, связанные с тепловым излучением, которое не учитывается в программе RPT1. Кроме этого, полуфабрикаты с графитом, нагреваясь быстрее, раньше теряют молекулы воды, тем самым у них раньше снижаются радиопоглощающие свойства. В связи с этим, скорость нагрева полуфабрикатов с графитом при высоких температурах оказалась значительно ниже расчетной. Однако, при использовании представленных в главе 2 зависимостей для выравнивания радиопоглощающих свойств полуфабрикатов с различными характеристиками (абразивный материал, твердость, пористость и др.), модифицированные полуфабрикаты и полуфабрикаты без радиопоглощающих наполнителей будут в процессе термообработки иметь одинаковую скорость нагрева, и указанные выше факторы будут нивелированы.

3.2.3. Экспериментальное исследование влияния термостатирования полуфабрикатов абразивных инструментов на бакелитовой связке на качество и производительность их термообработки при микроволновом нагреве

Для проведения экспериментального исследования были изготовлены образцы полуфабрикатов АИ по методике, изложенной в п. 3.1.1. Бакелизацию с использованием микроволнового нагрева осуществляли на отработанных в предыдущих экспериментах режимах, которые обеспечивают получение полуфабрикатов АИ без признаков деформаций и вспучивания. Термообработку проводили при неизменных режимах как без использования теплоизоляции (табл. 3.15), так и с ее использованием в виде мулито-кремнеземистой ваты МКРВ-130 (табл. 3.16) и вер-

микулита вспученного фракционированного марки ВВФ-2 (табл. 3.17). Схемы укладки полуфабрикатов представлены на рисунках 3.3, 3.4.

3.15. Распределение температур в стопке полуфабрикатов после термообработки с микроволновым нагревом без теплоизоляции

№ горизонтального сечения (по рис. 3.12)	Обозначение вертикального сечения (по рис. 3.12)		
	А - А	В - В	С - С
	Значения температуры T : в числителе – экспериментальные, в знаменателе – расчетные, °С		
I	70 / 75	90 / 88	87 / 85
II	83 / 87	112 / 111	104 / 101
III	88 / 91	117 / 120	112 / 106
IV	88 / 90	115 / 119	110 / 105

3.16. Распределение температур в стопке после полуфабрикатов после термообработки с микроволновым нагревом с теплоизоляцией мулито-кремнеземистой ватой

№ горизонтального сечения (по рис. 3.11)	Обозначение вертикального сечения (по рис. 3.11)		
	А - А	В - В	С - С
	Значения температуры T : в числителе – экспериментальные, в знаменателе – расчетные, °С		
I	184 / 179	186 / 181	186 / 180
II	185 / 183	190 / 185	188 / 184
III	182 / 183	185 / 184	184 / 183
IV	179 / 180	181 / 182	178 / 182

Выявлено, что применение радиопрозрачной теплоизоляции полуфабрикатов позволяет повысить скорость их микроволнового нагрева, существенно снизить мощность источника микроволнового излучения и снизить градиент температур по сечению стопки с 70 % до 6 ... 7 %. В свою очередь это позволяет уменьшить длительность операции бакелизации. Расхождение значений температур по сечениям стопок, определенных экспериментально и рассчитанных с помощью программного продукта NX 7.5 по математической модели (см. главу 2), не превыша-

ет 7,2 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели и методики численного моделирования. Вермикулит вспученный и муллит-кремнеземистая вата как радиопрозрачные теплоизоляторы показали практически одинаковую эффективность, однако муллит-кремнеземистая вата не технологична, так как необходимо тщательно укрывать каждую стопку с полуфабрикатами, в связи с чем для применения рекомендуется вермикулит вспученный.

3.17. Распределение температур в стопке полуфабрикатов после термообработки с микроволновым нагревом с использованием теплоизоляции вермикулитом вспученным

№ горизонтального сечения (по рис. 3.11)	Обозначение вертикального сечения (по рис. 3.11)		
	А - А	В - В	С - С
	Значения температуры T : в числителе – экспериментальные, в знаменателе – расчетные, °С		
I	180 / 177	182 / 178	181 / 178
II	182 / 180	186 / 182	185 / 181
III	179 / 180	186 / 181	180 / 181
IV	175 / 178	177 / 179	176 / 180

Для оценки влияния использования радиопрозрачной теплоизоляции на разброс твердости по поверхности полуфабрикатов в радиальном направлении, для сравнения были термообработаны полуфабрикаты АИ в микроволновом поле без использования теплоизоляции. Режимы термообработки были подобраны на основании численного моделирования процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов в программе NX 7.5. При этом подобранные режимы обеспечивали осуществление полной бакелизации связки (нагрев до 200 °С). Затем, в определенных информативных точках (рис. 3.5) производили замер скорости распространения звуковой волны в полуфабрикатах, термообработанных в микроволновом поле с использованием радиопрозрачной теплоизоляции (вермикулит вспученный) и без нее. Замеры производили в каждом полуфабрикate стопки в различных информативных точках (табл. 3.18).

Результаты исследований показывают, что применение радиопрозрачной теп-

лоизоляции позволяет в целом незначительно повысить твердость полуфабрикатов АИ и сократить разброс значений скоростей распространения звуковой волны по сечению стопки с 4,7 % до 1,5 %, что свидетельствует об увеличении однородности микроструктуры бакелизованных полуфабрикатов как по высоте стопки, так и по радиусу образцов.

3.18. Распределение твердости полуфабрикатов АИ по объему стопки

Схема укладки	№ полуфабриката (см. рис. 3.3, 3.4)	№ информативной точки (см. рис. 3.5)		
		T1	T2	T3
		Скорость звука в образце, м/с		
Без теплоизоляции (см. рис. 3.4)	1	4014	4120	4156
	2	4067	4092	4170
	3	4049	4072	4108
	4	3984	4012	4050
С теплоизоляцией (рис. 3.3)	1	4203	4221	4215
	2	4240	4237	4227
	3	4259	4248	4219
	4	4195	4199	4207

3.2.4. Многофакторное исследование процесса микроволновой термообработки полуфабрикатов абразивных инструментов с различными наполнителями в условиях теплоизоляции

С целью определения комплексного влияния параметров термообработки и количества вводимых наполнителей, в соответствии с методикой (см. параграф 3.1), проведено многофакторное исследование процесса термообработки с микроволновым нагревом полуфабрикатов АИ в условиях теплоизоляции. В качестве радиопрозрачного теплоизолирующего материала, на основании результатов проведенных исследований, использовали вермикулит вспученный. В качестве наполнителей применяли графит литейный и сульфат магния безводный, содержанием которых варьировали в диапазоне от 0 до 4 %. Термообработывали стопки полуфабрикатов АИ, состоящие из четырех и пяти полуфабрикатов, массой соот-

ветственно 4600 и 5750 г. Средней мощностью микроволнового излучения варьировали от 150 до 190 Вт. В ходе экспериментов фиксировали время τ , необходимое для нагрева полуфабрикатов до температуры полной бакелизации полуфабрикатов АИ (200 °С), температуру T , стопки полуфабрикатов через 60 мин нагрева, а также наличие или отсутствие их деформаций. Результаты экспериментального исследования представлены в таблице 3.19.

3.19. Экспериментальные значения длительности цикла τ и температуры T микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ

Применяемые полуфабрикаты АИ (табл. 3.10)	Средняя мощность микроволнового излучения P , Вт	Масса стопки полуфабрикатов АИ m , г	Длительность цикла термообработки τ , мин	Температура нагрева T , °С
П1	150	4600	146	91
	190	4600	128*	115*
П2	150	4600	142	93
	190	4600	125	117
П3	150	4600	142	93
	190	4600	125	119
П5	150	4600	121	123
	190	4600	96*	154*
П1	150	5750	184	77
	190	5750	149	92
П2	150	5750	181	79
	190	5750	132	97
П3	150	5750	177	81
	190	5750	135	99
П5	150	5750	135	100
	190	5750	121	127
* - наличие деформаций на полуфабрикатах АИ				

Каждый опыт дублировали ($m_0 = 2$, п. 3.1.5.1), после чего находили средние значения времени и температуры, которые округляли до целого числа и заносили в таблицу.

По результатам многофакторного экспериментального исследования термообработки полуфабрикатов с различными наполнителями микроволновым нагревом с помощью программного продукта «Эксперимент 2в3» получены

регрессионные зависимости времени, необходимого для нагрева полуфабрикатов до температуры полной бакелизации ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$) τ и температуры стопки полуфабрикатов через 60 мин нагрева T от содержания C в полуфабрикате АИ наполнителя, мощности микроволнового излучения P и массы стопки полуфабрикатов m (прил. 3.1). Уравнения регрессии для расчета τ и T при микроволновой термообработке полуфабрикатов АИ с наполнителем из сульфата магния имеют следующий вид:

$$T = 58,61 - 0,23 \cdot C_{см} + 0,48 \cdot P - 0,00017 \cdot m - 0,00005 \cdot P \cdot m; \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \tau = 107,08 - 10,95 \cdot C_{см} - 0,16 \cdot P + 0,018 \cdot m + 0,101 \cdot C_{см} \cdot P + \\ + 0,003 \cdot C_{см} \cdot m - 0,00003 \cdot C_{см} \cdot P \cdot m. \end{aligned} \quad (3.13)$$

При термообработке полуфабрикатов АИ с наполнителем из графита:

$$T = 86,39 + 4,28 \cdot C_z + 0,44 \cdot P - 0,0048 \cdot m; \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \tau = 99,91 + 14,59 \cdot C_z - 0,07 \cdot P + 0,2 \cdot m - 0,113 \cdot C_z \cdot P - \\ - 0,00006 \cdot P \cdot m + 0,00003 \cdot C_z \cdot P \cdot m. \end{aligned} \quad (3.15)$$

При проведении опытов № 2 и № 8 (см. табл. 3.19) были обнаружены деформации полуфабрикатов, в связи с чем, было рекомендовано при проведении бакелизации полуфабрикатов, не содержащих наполнителей, а также с комплексным наполнителем из сульфата магния и графита (с содержанием более 2 %), ограничить среднюю удельную мощность микроволнового излучения $P_{уд}$ значением 33 Вт/кг (при средней мощности 150 Вт и загрузке 4,6 кг деформаций не обнаружено). Полученные регрессионные зависимости позволяют прогнозировать скорость нагрева при определенных режимах микроволновой термообработки, массе загружаемой садки и рецептурах формовочных смесей, а также определять удельную мощность микроволнового излучения необходимую для обеспечения процесса бакелизации без возникновения дефектов в полуфабрикатах при минимальных затратах времени.

3.3. Исследование влияния наполнителей связки на структуру абразивных инструментов бакелизированных в микроволновом поле

3.3.1. Методика исследования влияния различных наполнителей на структуру абразивных инструментов

Проводили сравнительный микроструктурный анализ характера включений микрочастиц различных наполнителей в состав органического связующего в экспериментальных кругах, полученных в условиях формирования их основной структурной пористости в процессе микроволновой бакелизации при одинаковом массовом соотношении абразивного зерна и связующего.

В качестве критериев анализа структуры использовали наличие на исследуемом образце пор, их количество и размер, равномерность распределения наполнителей и форма их проявления на шлифе.

Для проведения экспериментов использовали лабораторную шлифмашинку, компрессор СО-7А, стереоскопический микроскоп MST-131 (табл. 3.20), отрезной станок модели GS-400, цифровой фотоаппарат с суперзумом (матрица 14,48 megapixel (1/2.3"), 21-кратное оптическое увеличение), специальные приспособления для закрепления п/ф АИ на отрезном станке, специальное приспособление для проведения фотосъемки через объектив микроскопа с помощью цифрового фотоаппарата, приспособление для светодиодного освещения исследуемого под микроскопом образца, алмазный отрезной круг (АОК фирмы "Winter" D251 C23 B7 335 (AC6250/200)) типоразмера 400×30×1,8 мм, алмазный плоский 2-х сторонний диск ДАСПД-20.

3.20. Техническая характеристика микроскопа MST-131

Параметры	Значение
Диапазон увеличения	с окуляром 6,3X – от 4X до 25X с окуляром 25X – от 16X до 100X
Поле зрения	максимальное – 44 мм (при увеличении 4X) минимальное – 2 мм (при увеличении 100X)
Габаритные размеры	380 × 280 × 270 мм

Микроструктурный анализ прошедших микроволновую бакелизацию опытных и контрольных образцов проводили с помощью указанного микроскопа с увеличением до 100X следующим образом:

- от исследуемого круга на отрезном станке модели GS-400 алмазным кругом отрезали сегмент с длиной хорды 80 мм (рис. 3.6, а);
- на плоскости среза сегмента с помощью лабораторной шлифмашинки алмазным плоским двухсторонним диском ДАСПД-20 формировали контрольные плоскости площадью 15...20 мм² (рис. 3.6, б);
- струей очищенного сжатого воздуха (0,5 МПа) удаляли частицы пыли после шлифования;
- протирали контролируемые поверхности спиртом этиловым ректифицированным (ГОСТ Р 51652-2000);
- на микроскопе исследовали поверхности шлифов контрольного и экспериментального образцов;
- проводили фотосъемку наблюдаемой структуры через объектив микроскопа;
- анализировали структуру экспериментальных абразивных кругов с различными наполнителями.

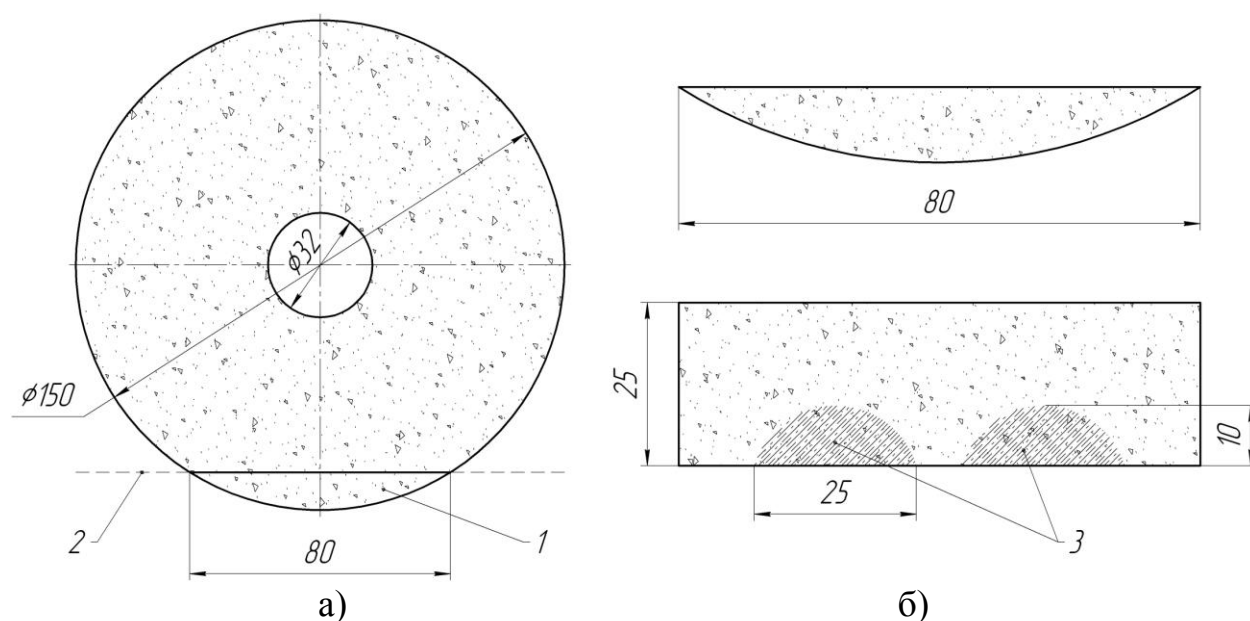


Рис. 3.6. Подготовка образцов для проведения анализа структуры АИ: а – шлифовальный круг; б – увеличенное изображение сегмента; 1 – отрезаемый сегмент; 2 – линия разреза; 3 – области, подвергающиеся шлифованию

3.3.2. Экспериментальное исследование влияния различных наполнителей на структуру абразивных инструментов

В соответствии с вышеизложенной методикой провели сравнительный микроструктурный анализ группы образцов с адсорбирующими наполнителями, изготовленных по рецептурам № 1, 4, 6, (см. табл. 3.2) и образца содержащего адсорбирующие и радиопоглощающие наполнители, изготовленного по рецептуре № 8 (см. табл. 3.3).

Фотосъемку проводили при увеличении 40X и 100X с боковым освещением разной интенсивности в двух спектрах подсветки – с помощью лампы накаливания (штатной подсветки микроскопа) и с использованием светодиода, дающего спектр освещения, смещенный в область коротких волн.

Фотографии шлифов представлены на рисунках 3.7 и 3.8.

Анализ изображений шлифов АИ с адсорбирующими добавками без графита (рис. 3.7 и 3.8 а, в) показал, что на шлифе АИ, изготовленного с добавлением только гипса в количестве 1,5 %, поры практически отсутствуют (рис. 3.7 а, в), а при введении такого же количества сульфата магния появляется небольшое количество пор (рис. 3.7 б, г).

При увеличении содержания сульфата магния до 4,5 % по отношению к массе абразивного зерна происходит резкое увеличение количества пор (рис. 3.8 а, в). Гипс в отсутствии графита отчетливо проявляется на шлифе в виде отдельных вкраплений и конгломератов белого цвета (рис. 3.7 а, в), а сульфат магния в виде мутной и неравномерной пленки белого цвета (рис. 3.7 б, г; 3.8 а, в). Судя по изображениям шлифов АИ, содержащих адсорбирующие (сульфат магния) и радиопоглощающие (графит) наполнители (рис. 3.8 б, г), можно сделать вывод о том, что количество пор (черных участков и «точек» на изображениях) сопоставимо с количеством пор в шлифовальном круге, содержащем только сульфат магния (рецептура № 4, рис. 3.7 б, г).

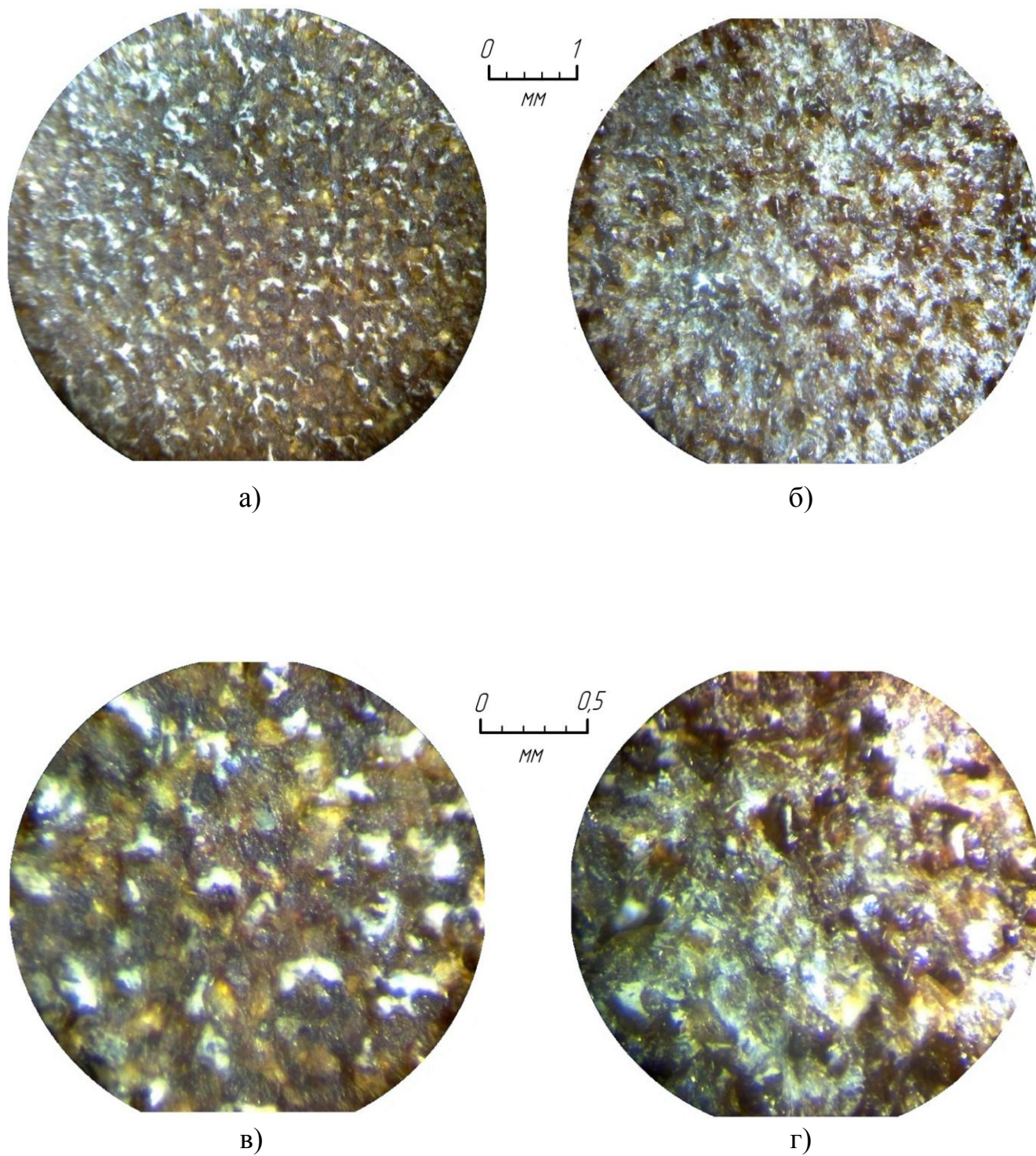


Рис. 3.7. Фотографии шлифов АИ на бакелитовой связке, изготовленных по рецептуре № 1 (см. табл. 3.2) (а – 40X; в – 100X) и по рецептуре № 4 (см. табл. 3.2): (б – 40X; г – 100X)

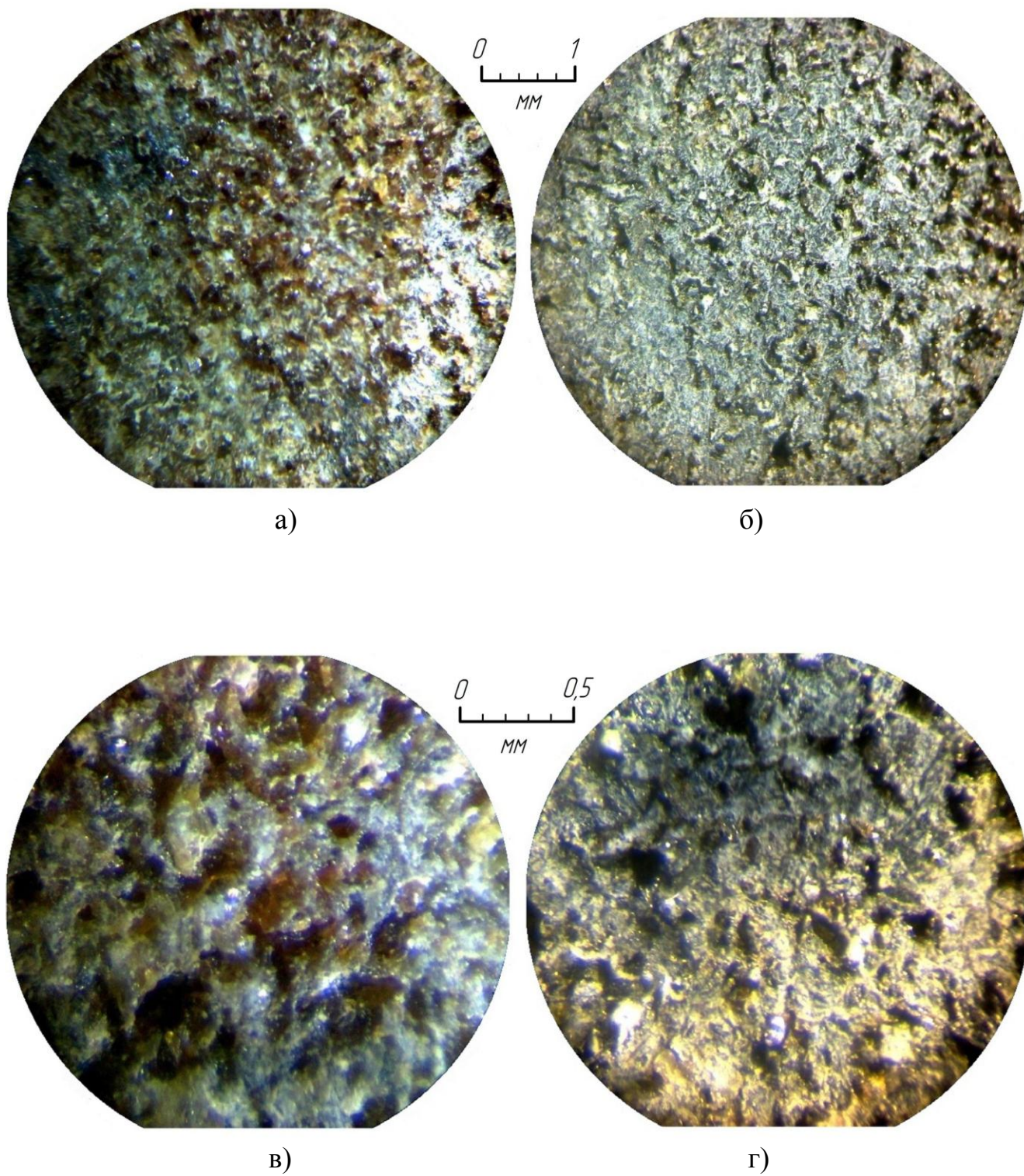


Рис. 3.8. Фотографии шлифов АИ на бакелитовой связке, изготовленных по рецептуре № 6 (см. табл. 3.2): (а – 40X; в – 100X) и по рецептуре № 8 (см. табл. 3.3): (б – 40X; г – 100X)

Благодаря способности графита легко «отслаивать» тончайшие слои своей кристаллической решетки и «замазывать» контактирующий с ним материал, этот наполнитель на фотографиях практически не заметен, однако при увеличении количества сульфата магния до 4,5 % по отношению к массе абразивного зерна, он всё же проявляется.

Таким образом, выявлено, что при комплексном использовании адсорбирующего (сульфат магния) и радиопоглощающего (графит) наполнителей, графит «обволакивает» все компоненты формовочной смеси и при обработке шлифа спиртом частично защищает от растворения образованный в процессе термообработки кристаллогидрат сульфата магния. Незначительное уменьшение количества пор в этом случае можно объяснить уменьшением процентного содержания связки и незначительным увеличением плотности полуфабриката АИ в связи с увеличением массы формовочной смеси, засыпаемой в пресс-форму. При увеличении содержания сульфата магния в формовочной смеси возрастает число пор, что можно объяснить растворением образованного кристаллогидрата магния при обработке шлифа спиртом и образованием на его месте дополнительных пор. Очевидно, что чем больше на поверхности АИ кристаллогидрата, тем больше образуется новых пор после воздействия на шлиф спирта.

3.4. Выводы

На основе результатов проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Замена наполнителя в виде гипса на сульфат магния позволяет повысить скорость микроволнового нагрева полуфабрикатов на бакелитовой связке, минимизируя вероятность возникновения дефектов. Это объясняется тем, что сульфат магния в качестве наполнителя способствует сдвигу во времени этапа выделения паров воды. В критическом диапазоне температур сульфат магния связывает пары воды с образованием кристаллогидрата, а на конечном этапе термообработки начинается его разложение с отделением молекул воды, при этом обильное паровы-

деление уже не приводит к деформации полуфабриката, так как он уже отвердел и приобрел достаточную прочность. Кроме этого связывание паров воды уменьшает изменение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов в процессе микроволнового нагрева.

2. Введение в формовочную смесь наполнителя – графита позволяет снизить удельную мощность микроволнового излучения в среднем на 20 % при сохранении скорости нагрева. При этом увеличение содержания радиопоглощающего наполнителя с 2 до 4 % дает незначительный эффект. Максимальное расхождение результатов расчетов (по программе RPT3) и экспериментальных значений температуры составляет 14,4 %. Соответственно рекомендуется ограничить содержание графита в полуфабрикате двумя процентами от массы абразива.

3. При одновременной микроволновой термообработке полуфабрикатов с различными радиопоглощающими свойствами расхождение теоретических и экспериментальных значений температур нагрева полуфабрикатов с радиопоглощающими наполнителями возрастает с 13 % на первых этапах термообработки до 23 % при достижении температуры 230 °С. Это объясняется тем, что при возрастании температуры, несмотря на наличие теплоизоляции, увеличиваются тепловые потери, связанные с тепловым излучением, которое не учитывается в программе RPT1. Кроме этого, полуфабрикаты, содержащие графит, нагреваясь быстрее, раньше теряют молекулы воды, тем самым у них раньше снижаются радиопоглощающие свойства.

4. Применение радиопрозрачной теплоизоляции нагреваемых полуфабрикатов позволяет существенно снизить мощность источника микроволнового излучения и градиент температур по сечению стопки с 70 % до 6 ... 7 %, что позволяет снизить длительность процесса термообработки и повысить качество АИ. Расхождение значений температур по сечению стопки полуфабрикатов, определенных экспериментальным путем, и значений, определенных при помощи программного продукта NX 7.5 по математической модели, разработанной в главе 2, не превышает 7,2 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели и методики численного моделирования. На основании результатов исследования в каче-

стве материала теплоизоляции рекомендован вермикулит вспученный.

5. Разработаны регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать скорость нагрева при определенных режимах микроволновой термообработки, массе загружаемой садки и рецептурах формовочных смесей, а также определять удельную мощность микроволнового излучения, необходимую для обеспечения процесса бакелизации без возникновения дефектов в полуфабрикатах, при минимальных затратах времени.

6. Введение в формовочную смесь комплексного наполнителя из сульфата магния (1,5 % от массы абразива) и графита (2 % от массы абразива) приводит к незначительному снижению количества пор. При этом графит «обволакивает» все компоненты формовочной смеси, что затрудняет анализ распределения кристаллогидрата по поверхности шлифа.

Таким образом, в ходе проведения экспериментальных исследований в данной главе подтверждена адекватность разработанных во второй главе математических зависимостей, даны рекомендации по использованию наполнителей, позволяющих повысить энергоэффективность процесса термообработки полуфабрикатов АИ и сократить его длительность, а также по использованию радиопрозрачной теплоизоляции. В ходе дальнейших исследований предстоит оценить влияние предложенных мер на работоспособность АИ (глава 4).

Глава 4. Исследование работоспособности абразивных инструментов, содержащих специальные наполнители бакелитовой связки

4.1. Методика экспериментальных исследований работоспособности абразивных инструментов на бакелитовой связке при плоском шлифовании

4.1.1. Критерии оценки работоспособности шлифовальных кругов на бакелитовой связке, содержащих специальные наполнители

Настоящая методика разработана для оценки влияния адсорбирующих и радиопоглощающих наполнителей на работоспособность АИ на бакелитовом связующем, термообработанных в микроволновом поле в условиях радиопрозрачной теплоизоляции.

Использовали перечисленные ниже критерии:

1. Шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемая (по ГОСТ 25142) следующими параметрами:

- среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм;
- высота неровностей профиля по десяти точкам Rz , мкм;
- наибольшая высота неровностей профиля $Rmax$, мкм.

2. Объем материала, снятого с заготовки (образца) W_m , мм³:

$$W_m = a \cdot b \cdot z_{пф} \quad (4.1)$$

где a , b – размеры шлифуемой поверхности заготовки, мм; $z_{пф}$ – фактический припуск (линейный съем металла), снятый с заготовки:

$$z_{пф} = h_3^д - h_3^п, \quad (4.2)$$

где $h_3^д$, $h_3^п$ – высота заготовки соответственно до и после шлифования, мм.

3. Режущая способность шлифовального круга Q_m , мм³/(мин · мм):

$$Q_m = \frac{W_m}{t_m \cdot H_k}, \quad (4.3)$$

где t_m – машинное время, мин; H_k – высота ШК, мм.

4. Объем рабочего слоя ШК, израсходованного за период снятия припуска W_a , мм³.

5. Коэффициент шлифования по объему $K_{ш}$ (по ГОСТ 21445):

$$K_{ш} = W_m W_a^{-1}. \quad (4.4)$$

6. Коэффициент шлифования по составляющим силам шлифования K_p (по ГОСТ 21445):

$$K_p = P_z P_y^{-1}. \quad (4.5)$$

7. Удельная энергия шлифования, для шлифования периферией круга $U_{ш}$, Н/(мм·мин):

$$U_{ш} = \frac{P_z V_k}{V_{ст} L_{ш} t_m}, \quad (4.6)$$

где P_z – касательная составляющие силы шлифования, Н; V_k – окружная скорость шлифовального круга, м/с; $V_{ст}$ – скорость стола, м/с; $L_{ш}$ – ширина заготовки, мм.

8. Средняя контактная температура шлифования T_k , °С.

4.1.2. Параметры, контролируемые при исследованиях. Методы и средства измерения

Размеры образцов до и после обработки контролировали универсальными инструментами: штангенциркулем ШЦ-II-250-0,05 (ГОСТ 166, цена деления 0,05 мм, диапазон измерения 0...250 мм, погрешность измерения $\pm 0,025$ мм); микрометром МК 25 (ГОСТ 4381, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 0...25 мм, погрешность измерения $\pm 0,002$ мм).

Высоту ШК контролировали штангенциркулем ШЦ-II-250-0,05 (ГОСТ 166).

Размерный износ ШК измеряли с помощью индикаторной головки 1МИГ (ГОСТ 9696, цена деления 0,001 мм, диапазон измерения 0...1 мм, допустимая погрешность измерения $\pm 0,0025$ мм), закрепленной на магнитной стойке, установленной на столе шлифовального станка.

Для определения размерного износа режущего выступа с помощью индикатора измеряли размер уступа на круге. Размерный износ круга измеряли через определенные интервалы времени через каждый миллиметр по высоте круга и в трех сечениях в окружном направлении при шлифовании периферией круга.

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности Ra и другие параметры шероховатости измеряли на профилометре модели 170622 производства московского инструментального завода "Калибр", тип II, степень точности 2 по ГОСТ 19300. Профилометр модели 170622 предназначен для измерения в цеховых условиях шероховатости поверхности изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию.

Сравнительные технологические испытания ШК выполняли на плоскошлифовальном станке 3E710 и на экспериментальной установке, смонтированной на базе плоскошлифовального станка мод. 3E711ВФ2 (рис. 4.1), точность и жесткость которых соответствовали паспортным данным.

Перед проведением экспериментальных исследований станки проверяли на соответствие нормам точности и вибрации по ГОСТ 273.

Экспериментальная установка (см. рис. 4.1) оснащена системой подачи СОЖ поливом в зону шлифования и очистки ее от шлифовального шлама с помощью магнитного сепаратора и бака-отстойника.

Перед началом испытаний станки должны находиться в работоспособном состоянии. Для этого ШК приводили во вращение на рабочей скорости не менее чем за 20 минут до начала испытаний с целью выбора зазоров в технологической системе и разогрева масла в гидравлической системе станка.

Для измерения составляющих сил и средней контактной температуры создано автоматизированное рабочее место (АРМ) (рис. 4.2), которое позволяет проводить настройку сценариев эксперимента, осуществлять хранение и поиск нужного сценария в базе данных, проводить сквозную калибровку измерительных каналов, измерения в реальном масштабе времени с одновременной архивацией и визуализацией экспериментальных данных, просматривать и анализировать результаты.



Рис. 4.1. Общий вид экспериментальной установки на базе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ2: 1 – плоскошлифовальный станок мод. 3Е711ВФ2; 2 – шлифовальный круг; 3 – заготовка (полуискусственная термопара); 4 – универсальный динамометр УДМ – 100



Рис. 4.2. Автоматизированное рабочее место для измерения составляющих сил шлифования: 1 – восьмиканальный измерительный усилитель; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – монитор; 4 – клавиатура; 5 – мышь; 6 – системный блок персонального компьютера; 7 – интерфейсный кабель

АРМ включает полуискусственную термопару для измерения средней контактной температуры (рис. 4.3), закрепленную в универсальном динамометре УДМ - 100 для измерения составляющих сил. УДМ устанавливают на столе плоскошлифовального станка 3Е711ВФ2 (см. рис. 4.1). Термопара и УДМ подключены с помощью кабеля интерфейсного к восьмиканальному измерительному усилителю, соединенному с помощью интерфейсного кабеля с восьмиканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который непосредственно подключается к персональному компьютеру, удовлетворяющему требованиям операционной системы Windows XP и оснащенный программным пакетом «ACTest – Lite».

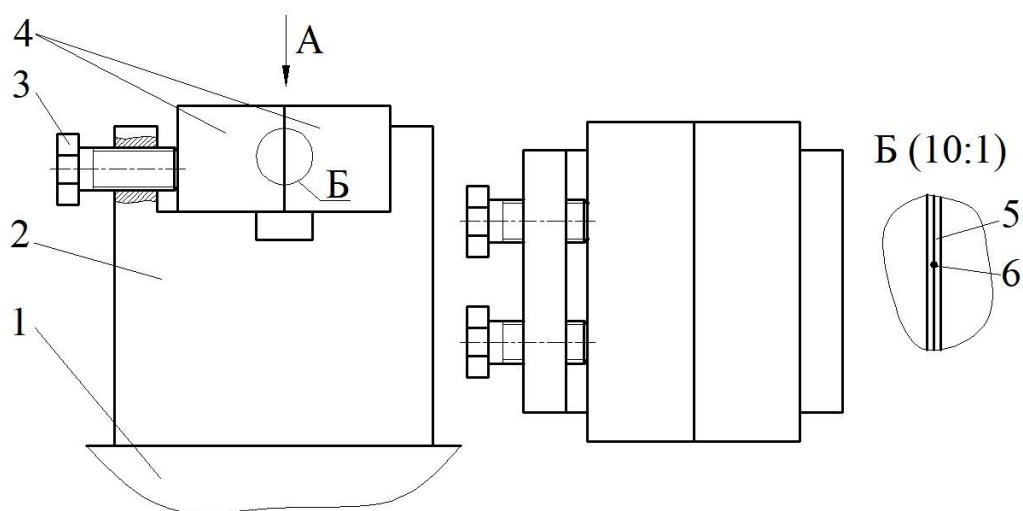


Рис. 4.3. Схема закладки термоэлектрода в заготовку при шлифовании: 1 – УДМ - 100; 2 – оправка; 3 – болт М5 × 30; 4 – заготовки (термопара); 5 – слюда толщиной 0,1 мм; 6 – термоэлектрод

Подключение динамометра и термопары к усилителю выполнено по полумостовой схеме. Достройка полумоста до моста выполнена с помощью дополнительных резисторов, которые с целью минимизации синфазных помех размещены рядом с основными резисторами и имеют сопротивление, равное сопротивлению основных резисторов. В качестве резисторов использованы прецизионные резисторы с малым температурным коэффициентом сопротивления типа С2 – 29В, С2 – 14 или ПТМН.

С целью повышения точности измерений и исключения лишней информации в комплексе предусмотрено включение регистрации сигналов только с

используемых измерительных каналов. Для расширения возможностей измерительного комплекса в усилителе предусмотрены измерительные каналы с различным частотным диапазоном. Для усиления медленно изменяющихся сигналов предусмотрено использование каналов 0, 1, 2, для усиления более «быстрых» сигналов – каналов 3, 4, 5, 6, 7. При работе системы частоту дискретизации каналов выбирают вдвое большей частоты входного сигнала работающего канала. Коэффициент усиления системы устанавливают путем поднастройки регулировочными резисторами, а также программной установкой. Калибровка системы выполняется путем подачи эталонного воздействия на первичный преобразователь резисторами поднастройки коэффициента усиления. Тарировку динамометрического устройства осуществляли статическим нагружением через определенные интервалы (рис. 4.4). Термопару тарировали следующим образом: спай, полученный после прохода ШК в зоне контакта заготовки и термоэлектрода, подвергали ступенчатому нагреву и последующему ступенчатому охлаждению (рис. 4.5). Температурой спаи варьировали в диапазоне от 50 до 300 °С.

Работа с комплексом предусматривает следующие этапы: включали устройства, входящие в состав системы, выжидали 30 минут для прогрева усилителя. Резисторами подстройки нуля усилителя устанавливали нулевые (или другие – в пределах диапазона входного сигнала) значения на выходе усилителя. При невозможности установки «нуля» канала проверяли исправность цепей датчика и соединительного кабеля «датчик-усилитель», а также точное равенство плеч измерительного моста.

Начальный разбаланс моста более 1 мВ нежелателен, его устраняли при необходимости подбором элементов моста. Затем устанавливали коэффициент усиления системы путем подстройки регулировочными резисторами, выведенными на переднюю панель усилителя, а также программной установкой коэффициента усиления для устройства сбора данных. При необходимости выполняли калибровку системы путем подачи эталонного воздействия на первичный преобразователь. Резисторами подстройки коэффициента усиления устанавливали пропор-

циональное выходное напряжение. После этого запускали программу «ACTest – Lite» и, следуя пунктам данного программного пакета, приступали к исследованию составляющих сил шлифования.

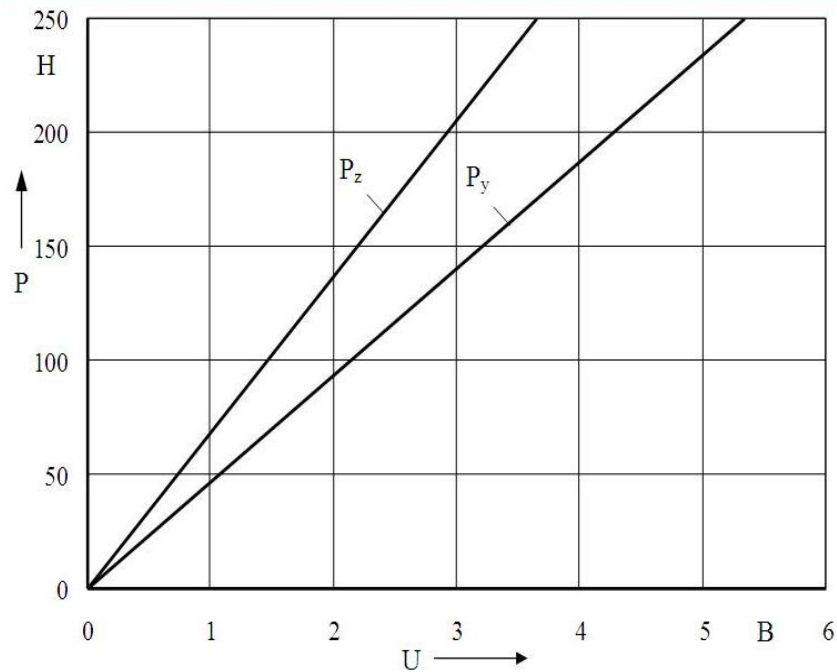


Рис. 4.4. Тарировочный график динамометрического устройства для измерения составляющих сил P_z и P_y шлифования на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711ВФ2

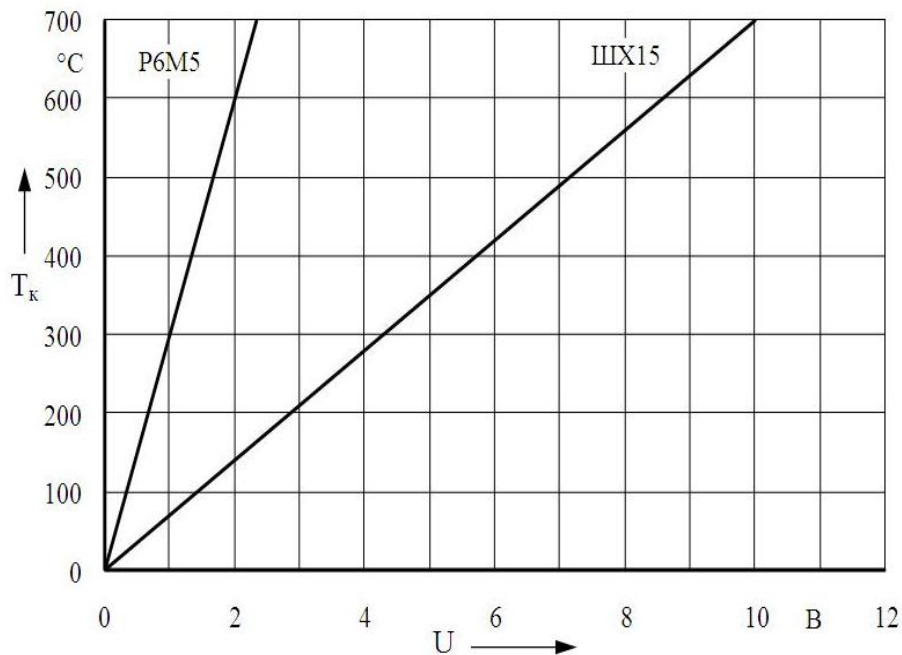


Рис. 4.5. Тарировочный график термопары для средней контактной температуры (T_k) шлифования на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711ВФ2

4.1.3. Условия, техника эксперимента и порядок проведения исследований

4.1.3.1. Номенклатура и требования к шлифовальным кругам

Для проведения эксперимента в качестве АИ применяли шлифовальные круги (ШК) на бакелитовой связке, изготовленные по методике описанной в п. 3.1.3.1., с различным содержанием наполнителей, полуфабрикаты которых термообработаны в сверхвысокочастотном поле в условиях термостатирования (табл. 4.1).

4.1. Номенклатура ШК для проведения исследований технологической эффективности плоского шлифования

Обозначение	Типоразмер	Характеристика	Содержание гипса, %	Содержание сульфата магния, %	Содержание графита, %
К1	1 150' 25' 32	25A F80 M 5 B	2	0	0
К2			0	2	0
К3			0	0	2
К4	1 300' 40' 76	14A F36 M 5 B	0	1,5	0
К5			0	1,5	2
К6			0	1,5	4

ШК проверяли на соответствие их основных геометрических параметров требованиям ГОСТ 2424. Величина дисбаланса не превышала значений, определенных ГОСТ 3060 и ГОСТ 19534. Твердость и механическая прочность кругов соответствовали требованиям ГОСТ 12.3.028.

Перед испытаниями ШК проверяли на соответствие их основных геометрических параметров требованиям ГОСТ 2424. Величина допускаемого дисбаланса не превышала значений, определяемых ГОСТ 3060 и ГОСТ 19534. Твердость и механическая прочность кругов соответствовали требованиям ГОСТ 12.3.028: твердость контролировали акустическим методом с помощью приборов «Звук - 203М» и «Импульс», механическую прочность кругов определяли на

стенде «СИП - 800». Перед установкой на испытательный стенд все круги проверяли на наличие сколов и трещин. В процессе сравнительных испытаний проводили статическую балансировку ШК на стенде.

4.1.3.2. Образцы для проведения исследований

Эксперименты проводили на образцах (рис. 4.6) из сталей и сплавов, наиболее широко применяемых в промышленности в качестве конструкционных и инструментальных материалов для изготовления деталей и инструментов различного назначения (табл. 4.2 и 4.3).

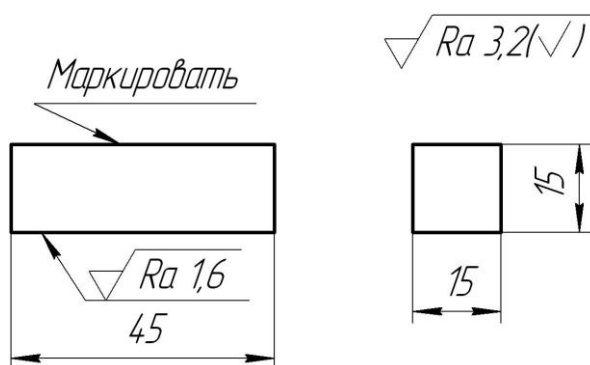


Рис. 4.6. Заготовки из сталей Р6М5 и ШХ15 для шлифования периферией круга

4.2. Химический состав материалов образцов для проведения экспериментальных исследований

Материал заготовки		Химический состав, %										
Обозначение	Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Mo	W	V
M1	Р6М5	от 0,80 до 0,88	до 0,40	до 0,03	от 3,80 до 4,40	до 0,30	до 0,02	—	—	от 5,00 до 5,50	от 5,50 до 5,65	от 1,70 до 2,10
M2	ШХ15	от 0,95 до 1,05	от 0,17 до 0,37	от 0,20 до 0,40	от 1,30 до 1,65	до 0,30	—	до 0,02	до 0,03	—	—	—

Заготовки для проведения испытаний изготавливали из одной партии материалов, которые соответствовали требованиям стандартов по химическому

составу и физико-механическим свойствам (см. табл. 4.2 и 4.3). Рассеивание твердости заготовок не превышало $\pm 3,5$ %. Перед началом каждой серии опытов партию заготовок вышлифовывали в один размер с допуском по 7 качеству и шероховатостью по параметру $Ra \leq 1,6$ мкм. Отклонение шероховатости поверхности в партии заготовок не превышало 8 ... 10 %.

4.3. Режимы термообработки заготовок

Материал заготовки		Режим термообработки	Твердость, HRC
Обозначение	Марка стали		
M1	P6M5	Закалка в масле (1210 ... 1230) °C с подогревом до 1000 °C, охлаждение в масле до (300 ... 450) °C, на воздухе до 20 °C, трехкратный отпуск (560 ... 570) °C	63 ... 65
M2	ШХ15	Закалка в масле (835 ... 855 °C), отпуск (200 ... 300 °C)	58 ... 62

4.1.3.3. Смазочно-охлаждающие технологические средства и техника их применения

При проведении сравнительных испытаний ШК использовали 1 %-ный водный раствор кальцинированной соды (ТУ-2381-038-00209645-2000).

В процессе испытаний обеспечивали минимальный разброс свойств СОЖ, периодически контролировали ее концентрацию и чистоту.

СОЖ подавали поливом в зону шлифования свободно падающей струей через клиновой насадок с расходом 5 ... 8 дм³/мин.

4.1.3.4. Режимы шлифования и правки

По результатам предварительных экспериментов исследование производили со скоростью шлифовального круга 35 м/с.

В ходе исследований варьировали продольной подачей V_{cm} в пределах от 5 до 15 м/мин, врезной подачей $S_{вр}$ – от 0,03 до 0,05 мм/дв.ход, содержанием графита ε

– от 0 до 4 %. С заготовки сошлифовывали припуск $t = 0,15$ мм.

При исследовании износа и стойкости ШК плоское шлифование периферией круга осуществляли до появления на поверхности заготовок следов прижогов или коробления.

Режимы шлифования выбирали в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [13] с учетом материала шлифуемых заготовок, прогнозируемой шероховатости шлифуемой поверхности, срока службы станка, жесткости технологической системы, состава и способа подачи СОЖ.

Круги правили методом обтачивания, используя в качестве правящего инструмента алмазный карандаш 3908-0083 С2 (ГОСТ 607), с непрерывной подачей СОЖ поливом свободно падающей струей с расходом $5 \dots 8$ дм³/мин по режиму:

- 3 рабочих хода с подачей $S_{\text{п}} = 0,03$ мм/дв.ход;
- 3 прохода без подачи алмазного карандаша;
- скорость продольной подачи алмазного карандаша $S_{\text{пр}} = 0,2 \pm 0,05$ м/мин.

Поперечную подачу $S_{\text{п}}$ и подачу на врезание $S_{\text{вр}}$ контролировали по лимбам станка.

4.1.4. Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов

Провели полный факторный эксперимент (ПФЭ) 2^k . Число факторов “к” принимали равным трем (см. табл. 4.4).

Обработку результатов экспериментов и определение коэффициентов регрессии проводили для уровня значимости 0,95 по методике, изложенной в работе [75].

Обработку результатов экспериментов выполняли по РДМУ 109-77 [61] на ПЭВМ IBM AMD – 1600.

При проведении исследований работоспособности шлифовальных кругов на бакелитовой связке с наполнителями из углеродсодержащих материалов,

выполнили группу экспериментов (табл. 4.5), последовательность проведения которых определили по таблице случайных чисел [8].

4.4. Матрица планирования эксперимента 2^3 по исследованию зависимости параметров W_m , W_a , $K_{ш}$, Ra , Rz , R_{max} , P_z , P_y , K_p и T_k от содержания наполнителей C , врезной подачи $S_{вр}$ и скорости стола $V_{ст}$

Условия планирования		Факторы					
		C		$S_{вр}$		V_{cm}	
		%		м/мин		м/мин	
		X_1		X_2		X_3	
Верхний уровень		4		0,05		15	
Основной уровень		2		0,04		10	
Нижний уровень		0		0,03		5	
Номер опыта	Действительные значения				Кодированные значения		
	C , %	$S_{вр}$, м/мин	V_{cm} , м/мин	X_0	X_1	X_2	X_3
1	0	0,03	5	+	—	—	—
2	4	0,03	5	+	+	—	—
3	0	0,05	5	+	—	+	—
4	4	0,05	5	+	+	+	—
5	0	0,03	15	+	—	—	+
6	4	0,03	15	+	+	—	+
7	0	0,05	15	+	—	+	+
8	4	0,05	15	+	+	+	+

4.5. Состав и количество опытов по исследованию зависимости параметров W_m , W_a , $K_{ш}$, Ra , Rz , R_{max} , P_z , P_y , K_p и T_k от содержания наполнителей C , врезной подачи $S_{вр}$ и скорости стола $V_{ст}$ при шлифовании на заготовках из материалов Р6М5 и ШХ15

Порядок реализации опытов (табл. 4.4)	Скорость движения стола станка, $V_{ст}$, м/мин	Врезная подача $S_{вр}$, мм/ход	Применяемые ШК (табл. 4.1)
8	15	0,05	К6
4	5	0,05	К6
3	5	0,05	К4
6	15	0,03	К6
7	15	0,05	К4
1	5	0,03	К4
5	15	0,03	К4
2	5	0,03	К6

4.1.5. Обработка результатов исследований и их анализ

Обработку результатов исследований проводили по методике изложенной в п. 3.1.5. Число параллельных опытов рассчитывали по результатам предварительных экспериментов для параметра T_k , как параметра, имеющего наибольший разброс значений при замерах. Приняли число параллельных опытов в серии $m = 3$.

Исходную математическую модель ПФЭ 2^3 представили в виде:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{1,2} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{1,3} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{2,3} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{1,2,3} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (4.7)$$

Коэффициенты регрессии определяем по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{V=1}^N X_{i,V} \cdot \overline{Y_V}}{N}, \quad (4.8)$$

где $X_{i,V}$ – номер фактора (в кодовых обозначениях).

4.2. Экспериментальное исследование работоспособности абразивных инструментов на бакелитовой связке

4.2.1. Исследование влияния наполнителей связки на износостойкость абразивных инструментов и шероховатость обработанной поверхности

4.2.1.1. Однофакторное исследование

На первом этапе экспериментов, для оценки влияния отдельных наполнителей на работоспособность АИ на бакелитовой связке провели ряд однофакторных исследований. Для этого изготовили три партии ШК типоразмера 1 150' 25' 32 и характеристики 25А F80 М 5 В с наполнителями из гипса, сульфата магния и графита, которые были обозначены соответственно как К1, К2, К3 (см. табл. 4.1). На плоскошлифовальном станке 3Е710 шлифовали образцы из стали 40Х. В ходе экспериментов фиксировали размерный износ ШК ΔR_k и величину снимаемого

припуска $z_{\text{п}}$. Затем определяли объемный расход абразивного материала $W_{\text{а}}$, объем снятого с заготовки материала $W_{\text{м}}$, а также коэффициент шлифования $K_{\text{ш}}$. (табл. 4.6, рис. 4.7).

4.6. Результаты исследования влияния наполнителей на износостойкость АИ

Применяемые ШК (код по табл. 4.1)	$S_{\text{вр}}$, мм/ход	$V_{\text{ст}}$, м/мин	$W_{\text{м}}$, мм ³	$W_{\text{а}}$, мм ³	$K_{\text{ш}}$
К1	0,01	5	181,7	118,8	1,53
	0,02	5	176,6	127,1	1,39
	0,03	5	174,4	147,8	1,18
	0,04	5	168,4	157,4	1,07
	0,01	8,5	174,6	123,0	1,42
	0,01	12	167,5	123,2	1,36
	0,01	15,5	166,7	137,8	1,21
К2	0,01	5	182,5	118,5	1,54
	0,02	5	176,4	128,8	1,37
	0,03	5	174,2	146,4	1,19
	0,04	5	168,2	142,5	1,18
	0,01	8,5	174,2	116,1	1,5
	0,01	12	169,4	125,5	1,35
	0,01	15,5	168,7	135,0	1,25
К3	0,01	5	182,4	117,7	1,55
	0,02	5	174,9	118,2	1,48
	0,03	5	172,8	145,8	1,185
	0,04	5	168,4	149,7	1,125
	0,01	8,5	174,7	118,8	1,47
	0,01	12	169,7	129,5	1,31
	0,01	15,5	166,9	141,4	1,18

Как видно из графиков, показанных на рисунке 4.7, гипс (кривая 1), сульфат магния (кривая 2) и графит (кривая 3) оказывают практически одинаковое влияние на коэффициент шлифования $K_{\text{ш}}$ во всем диапазоне варьирования врезной подачи $S_{\text{вр}}$ и скоростью стола $V_{\text{ст}}$.

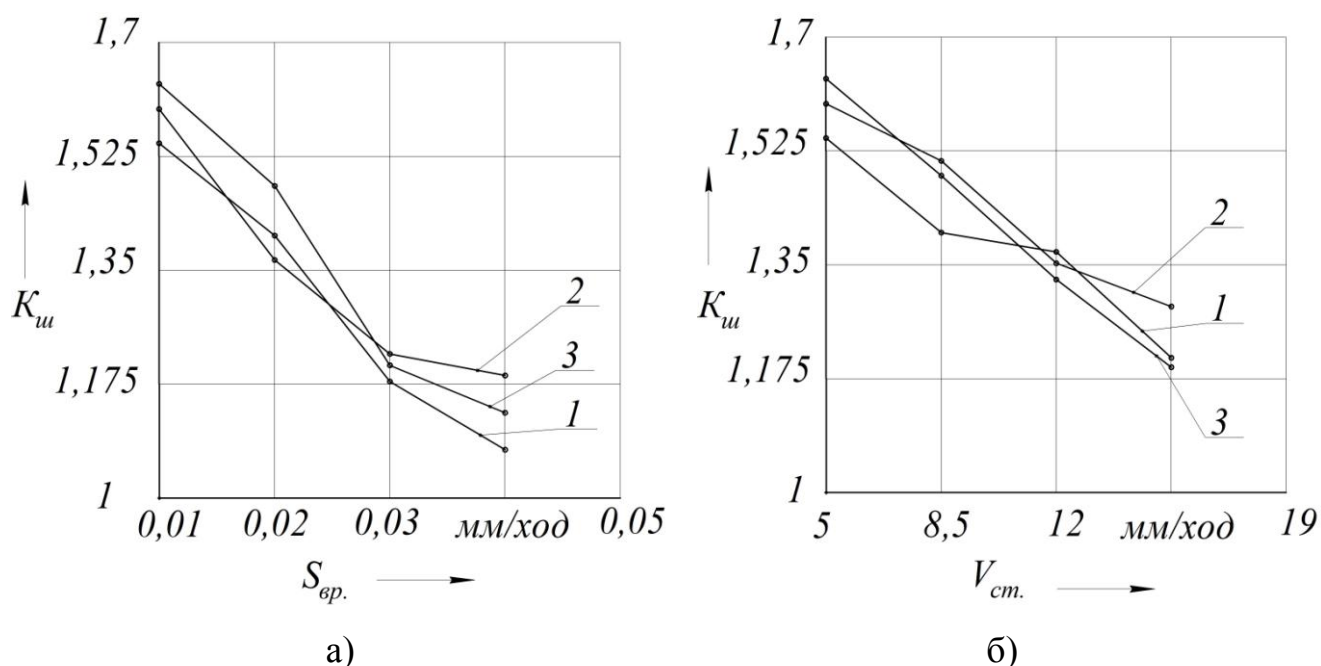


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента шлифования $K_{ш}$ от врезной подачи $S_{вр}$ (а) и скорости стола $V_{ст}$ (б): 1, 2, 3 – шлифовальные круги соответственно К1, К2 и К3 (см. табл. 4.2)

В ходе экспериментального исследования влияния наполнителей связки ШК на шероховатость шлифованной поверхности фиксировали среднее арифметическое отклонение профиля Ra , высоту неровностей профиля по десяти точкам Rz и наибольшую высоту неровностей профиля $Rmax$ (см. табл. 4.7, рис. 4.8).

4.7. Результаты исследования влияния наполнителей ШК на шероховатость обработанной поверхности

Применяемые ШК (код по табл. 4.1)	$S_{вр.}$, мм/ход	Ra , мкм	Rz , мкм	$Rmax$, мкм
2	3	4	5	6
К1	0,01	0,187	0,855	1,122
	0,02	0,273	1,491	1,529
	0,03	0,326	1,758	1,923
	0,04	0,437	2,208	2,445
К2	0,01	0,191	0,967	1,198
	0,02	0,305	1,505	1,545
	0,03	0,356	1,838	1,923
	0,04	0,414	2,234	2,476
К3	0,01	0,147	0,735	0,945
	0,02	0,212	1,194	1,329
	0,03	0,226	1,374	1,623
	0,04	0,327	1,751	1,833

Как следует из рисунка 4.8 введение в связку ШК гипса (кривая 1) и сульфата магния (кривая 2) оказывает практически одинаковое влияние на параметры шероховатости Ra и Rz на всем диапазоне варьирования врезной подачей $S_{вр}$. Однако, введение в формовочную смесь в том же количестве графита (кривая 3) позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности (Ra) до 36 %. Таким образом, доминирующее влияние на работоспособность АИ оказывает именно графит. В связи с этим, предпримем многофакторное исследование влияния содержания наполнителя на параметры работоспособности АИ, в котором в качестве адсорбирующего наполнителя присутствует сульфат магния (1,5 % по массе абразива), а содержание графита варьируется от 0 до 4 %.

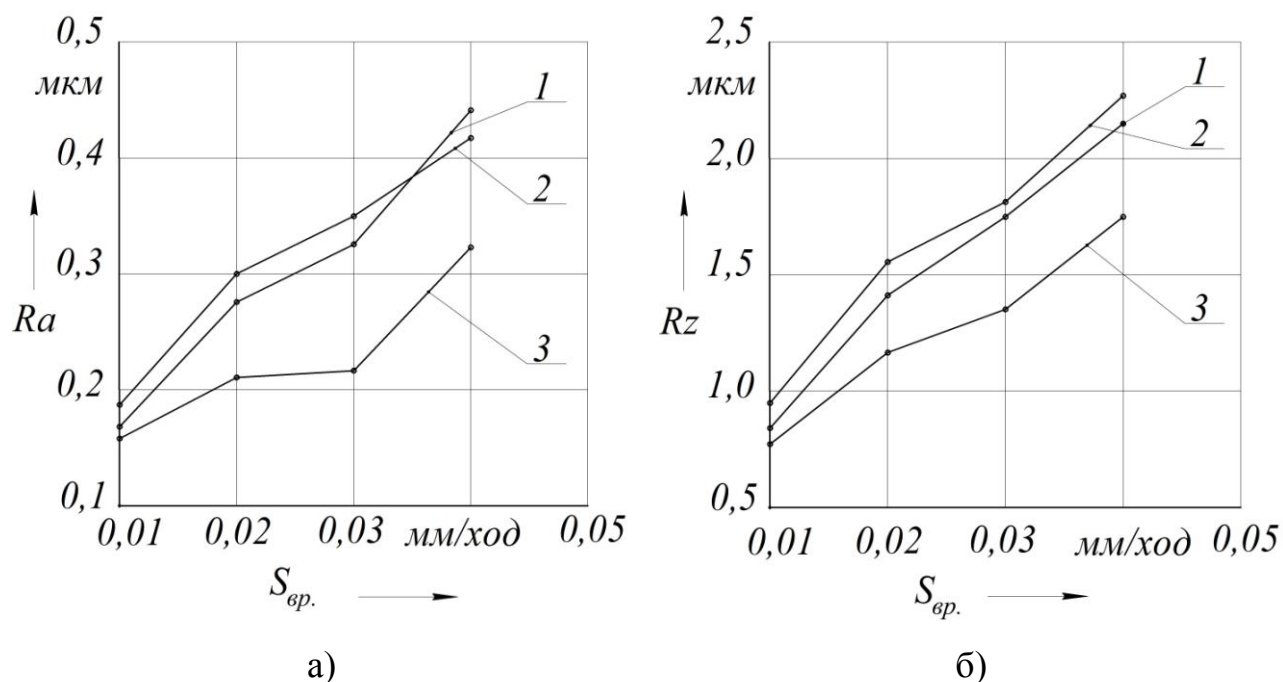


Рис. 4.8. Зависимость параметров шероховатости Ra (а) и Rz (б) от врезной подачи $S_{вр}$: 1, 2, 3 – шлифовальные круги соответственно К1, К2 и К3 (см. табл. 4.1)

4.2.1.2. Многофакторное исследование износостойкости шлифовальных кругов

В соответствии с методикой экспериментальных исследований (параграф 4.1) проведены исследования износостойкости ШК с наполнителями бакелитовой связки из сульфата магния и графита, полуфабрикаты которых были термообработаны в микроволновом поле. Содержанием графита в связке варьировали в диа-

пазоне от 0 до 4 %, шлифовали образцы из сталей Р6М5 и ШХ15. Фиксировали размерный износ ШК ΔR_K и величину снимаемого припуска z_n . Затем определяли объемный расход абразивного материала W_a и объем снятого с заготовки материала W_m , а также рассчитывали коэффициент шлифования $K_{ш}$. Экспериментальные значения указанных параметров представлены в таблице 4.8 и на рисунке 4.9.

4.8. Экспериментальные значения параметров W_m , W_a и $K_{ш}$ при плоском шлифовании

Применяемые ШК (код по табл. 4.1)	$S_{вр}$, мм/ход	$V_{ст}$, м/мин	Материал заготовки	W_m , мм ³	W_a , мм ³	$K_{ш}$
К4	0,03	5	Р6М5	182,3	133,1	1,36
	0,05	5	Р6М5	175,5	145,3	1,21
	0,03	15	Р6М5	175,5	139,7	1,26
	0,05	15	Р6М5	168,8	149,2	1,13
К6	0,03	5	Р6М5	182,3	134,5	1,36
	0,05	5	Р6М5	175,5	148,9	1,18
	0,03	15	Р6М5	175,5	143,5	1,22
	0,05	15	Р6М5	168,8	154,8	1,09
К4	0,03	5	ШХ15	195,3	107,2	1,82
	0,05	5	ШХ15	189	118,1	1,6
	0,03	15	ШХ15	182,3	111,6	1,63
	0,05	15	ШХ15	182,3	121,2	1,5
К6	0,03	5	ШХ15	195,3	115,7	1,69
	0,05	5	ШХ15	189	123,7	1,53
	0,03	15	ШХ15	189	119,9	1,58
	0,05	15	ШХ15	182,3	129,8	1,4

По результатам многофакторного исследования ШК 1 300' 40' 76 14А F36 М 5 В с содержанием графита 0 и 4 % на ЭВМ по программе «Эксперимент 2в3» получили регрессионные зависимости коэффициента шлифования $K_{ш}$ от содержания графита $C_{гр}$, врезной подачи $S_{вр}$ и скорости стола $V_{ст}$ для заготовок из сталей ШХ15 и Р6М5 (прил. 4.1). Уравнение регрессии для расчета $K_{ш}$ при шлифовании заготовок из стали ШХ15 имеет следующий вид:

$$K_{ш} = 2,32 - 0,09 \cdot C_{гр} - 13,42 \cdot S_{вр} - 0,03 \cdot V_{ст} - 0,15 \cdot C_{гр} \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}; \quad (4.9)$$

при шлифовании заготовок из стали Р6М5

$$K_{ш} = 1,66 - 8,08 \cdot S_{вр} - 0,01 \cdot V_{ст}. \quad (4.10)$$

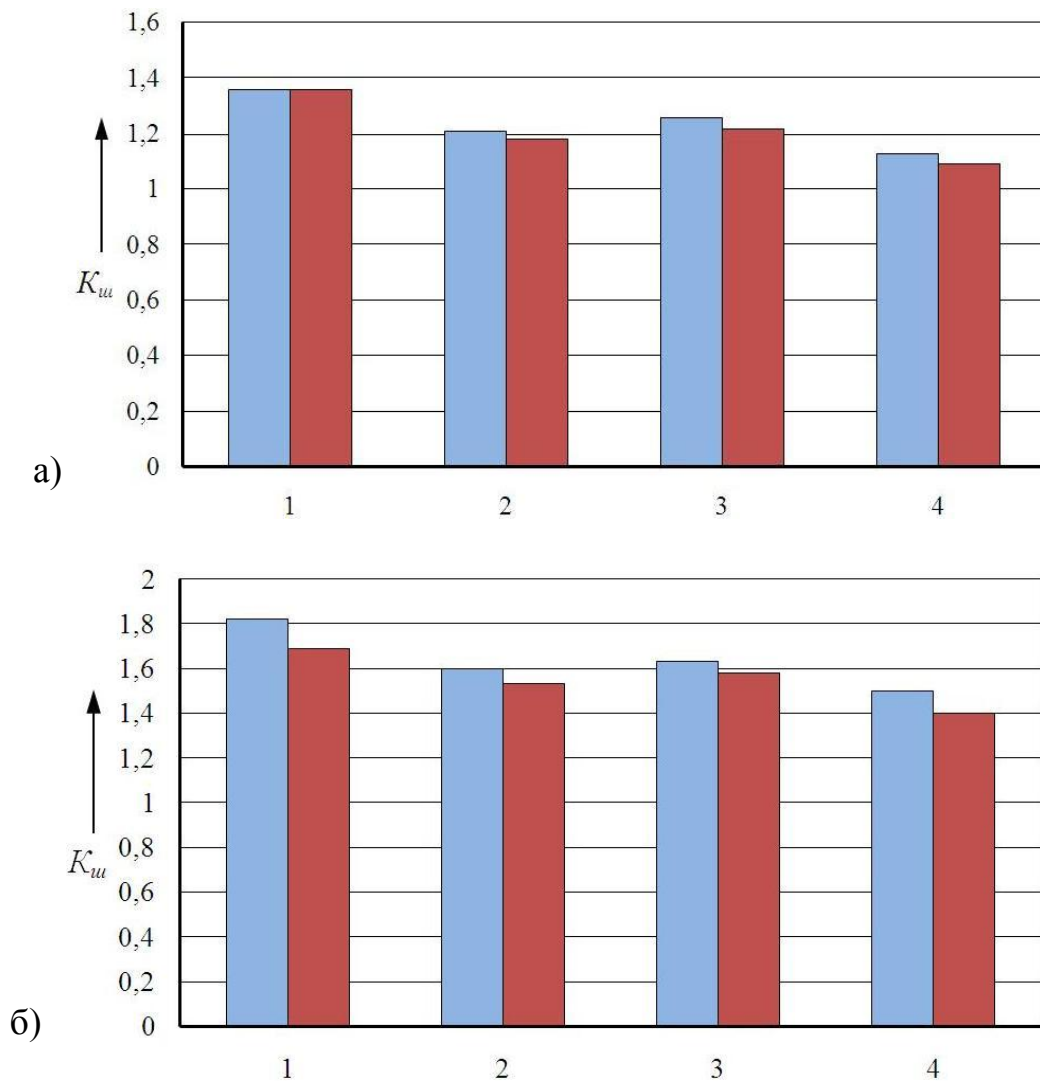


Рис. 4.9. Значения коэффициента шлифования $K_{ш}$ при плоском шлифовании заготовок из стали Р6М5 (а) и стали ШХ15 (б): $V_k = 35$ м/с, припуск на обработку $z = 0,15$ мм: 1 – подача на врезание $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, скорость стола $V_{ст} = 5$ м/мин; 2 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 3 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; 4 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; ■ – ШК К4 (см. табл. 4.1); ■ – ШК К6 (см. табл. 4.1)

Разработанные регрессионные зависимости в программном продукте «Эксперимент 2в3» прошли проверку на адекватность по критерию Фишера. Кроме этого провели экспериментальное исследование при соответствии контролируемых переменных (C , $V_{ст}$, $S_{вр}$) основному уровню матрицы планирования эксперимента (см. табл. 4.4). Для этого исследовали износостойкость ШК, содержащего 2 % графита (ШК К5 по табл. 4.1), при врезной подаче $S_{вр} = 0,04$ мм/ход и скорости

стола $V_{ст} = 10$ м/мин. При этом, расхождение экспериментальных и расчетных данных $K_{ш}$ и не превышало 18 %.

По данным уравнений регрессии (4.9), (4.10) были построены графики зависимости коэффициента шлифования $K_{ш}$ от содержания графита $C_{гр}$ в ШК и подачи на врезание $S_{вр}$ для заготовок из стали ШХ15 (рис. 4.10, а), а также зависимости коэффициента шлифования $K_{ш}$ от скорости стола $V_{ст}$ и подачи на врезание $S_{вр}$ для заготовок из стали Р6М5 (рис. 4.10, б).

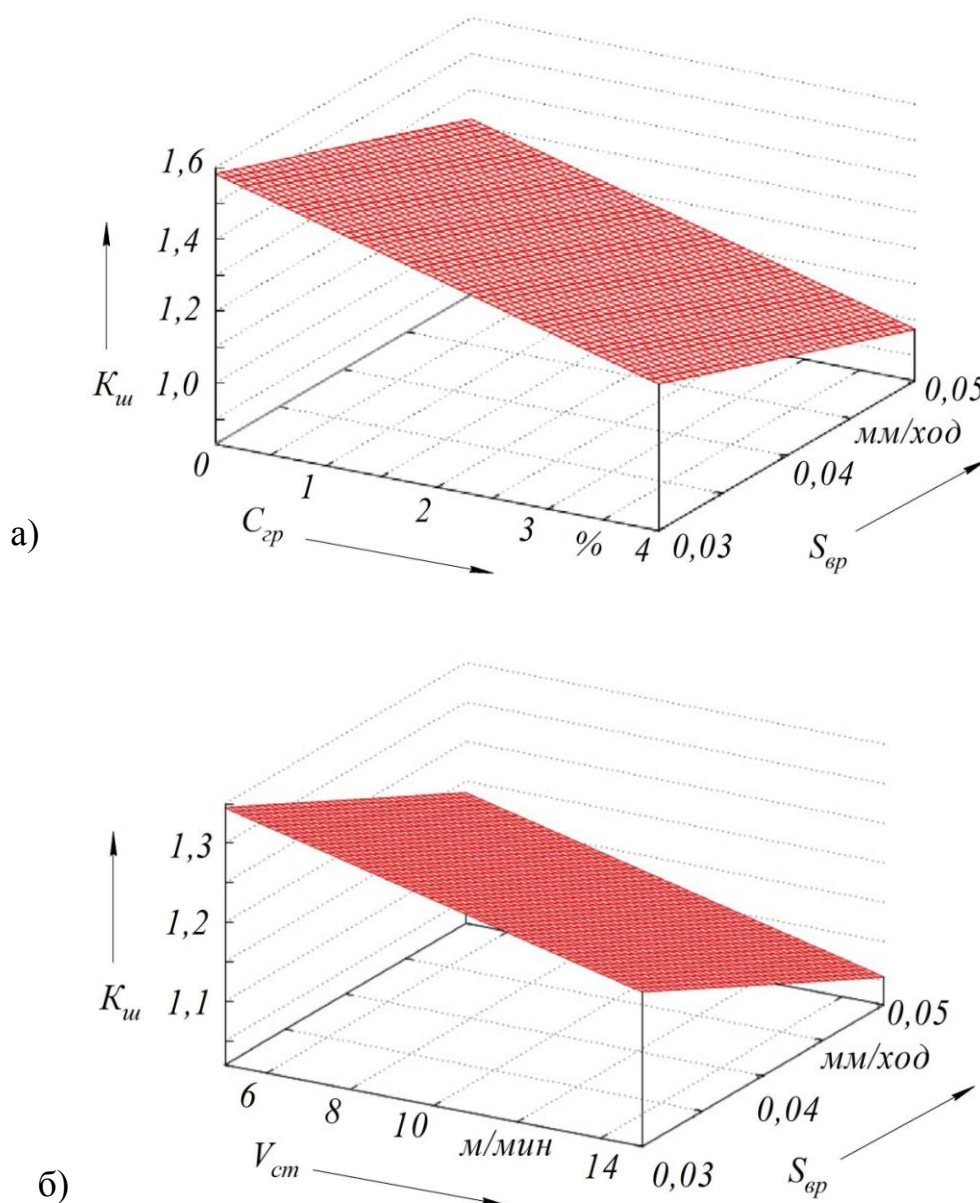


Рис. 4.10. Графики зависимости коэффициента шлифования $K_{ш}$ от содержания графита $C_{гр}$ в шлифовальном круге и подачи на врезание $S_{вр}$ для заготовок из стали ШХ15 (а) и зависимость коэффициента шлифования $K_{ш}$ от скорости стола $V_{ст}$ и подачи на врезание $S_{вр}$ для заготовок из стали Р6М5 (б): $V_k = 35$ м/с, припуск на обработку $z = 0,15$ мм

Как следует из рисунков 4.9 (экспериментальные данные) и 4.10 (регрессионные зависимости), при обработке заготовок из стали ШХ15 коэффициент шлифования уменьшается с одинаковым градиентом при любой скорости стола с увеличением содержания графита в ШК. Зафиксировано уменьшение коэффициента шлифования $K_{ш}$ примерно на 7 % при увеличении скорости стола с 5 до 15 м/мин. С увеличением подачи на врезание с 0,03 до 0,05 мм/ход коэффициент шлифования уменьшается примерно на 20 %. При шлифовании заготовок из стали Р6М5 содержание графита в ШК практически не сказывается на коэффициенте шлифования, а с увеличением скорости стола с 5 до 15 м/мин коэффициент шлифования уменьшается на 9 %. При увеличении подачи на врезание с 0,03 до 0,05 мм/ход коэффициент шлифования уменьшается на 15 %. Таким образом, установлено, что введение графита в формовочную смесь до 2 % от массы абразива не оказывает существенного влияния на коэффициент шлифования в исследуемом диапазоне значений элементов режимов резания.

4.2.1.3. Многофакторное исследование качества обработанных поверхностей заготовок

Проведено многофакторное исследование качества обработанных поверхностей заготовок при плоском шлифовании кругами на бакелитовой связке с наполнителями из сульфата магния и графита, полуфабрикаты которых термообработаны в микроволновом поле. В ходе экспериментов фиксировали среднее арифметическое отклонение профиля обработанных заготовок Ra , высоту неровностей профиля по десяти точкам Rz и наибольшую высоту неровностей профиля R_{max} . Экспериментальные значения представлены в таблице 4.9 и на рисунке 4.11.

Регрессионные зависимости среднего арифметического отклонения профиля Ra от содержания графита $C_{гр}$, врезной подачи $S_{вр}$ и скорости стола $V_{ст}$ для сталей ШХ15 и Р6М5 получены с помощью программного продукта «Эксперимент 2в3» (прил. 4.2). Уравнение регрессии для расчета Ra при шлифовании заготовок из стали ШХ15 имеет следующий вид:

$$Ra = 0,169 + 0,38 \cdot S_{\text{вр}} - 0,005 \cdot V_{\text{ст}} + 0,29 \cdot S_{\text{вр}} \cdot V_{\text{ст}} ; \quad (4.11)$$

при шлифовании заготовок из стали Р6М5

$$Ra = 0,139 - 0,008 \cdot C_{\text{гр}} + 0,125 \cdot S_{\text{вр}} - 0,003 \cdot V_{\text{ст}} + 0,128 \cdot S_{\text{вр}} \cdot V_{\text{ст}}. \quad (4.12)$$

4.9. Экспериментальные значения параметров шероховатости Ra , Rz и $Rmax$ при многофакторном исследовании

Применяемые ШК (код по табл. 4.1)	$S_{\text{вр}}$, мм/ход	$V_{\text{ст}}$, м/мин	Материал заготовки	Ra , мкм	Rz , мкм	$Rmax$, мкм
К4	0,03	5	Р6М5	0,147	0,735	1,045
	0,05	5	Р6М5	0,162	0,998	1,329
	0,03	15	Р6М5	0,156	0,838	1,123
	0,05	15	Р6М5	0,197	1,108	1,433
К6	0,03	5	Р6М5	0,119	0,677	0,823
	0,05	5	Р6М5	0,141	0,797	1,026
	0,03	15	Р6М5	0,136	0,802	1,029
	0,05	15	Р6М5	0,196	1,141	1,498
К4	0,03	5	ШХ15	0,198	1,487	1,911
	0,05	5	ШХ15	0,234	1,548	2,208
	0,03	15	ШХ15	0,232	1,647	2,007
	0,05	15	ШХ15	0,325	2,225	2,938
К6	0,03	5	ШХ15	0,202	1,511	1,987
	0,05	5	ШХ15	0,228	1,508	2,191
	0,03	15	ШХ15	0,239	1,657	2,091
	0,05	15	ШХ15	0,326	2,229	2,947

Все регрессионные модели, как и в предыдущем случае, прошли проверку на адекватность по критерию Фишера. Также проведено экспериментальное исследование при соответствии контролируемых переменных (C , $V_{\text{ст}}$, $S_{\text{вр}}$) основному уровню матрицы планирования эксперимента (см. табл. 4.4) для заготовок из сталей ШХ15 и Р6М5. Расхождение экспериментальных значений параметра шероховатости Ra и значений полученных расчетным путем (по уравнениям регрессии) не превышало 15 %.

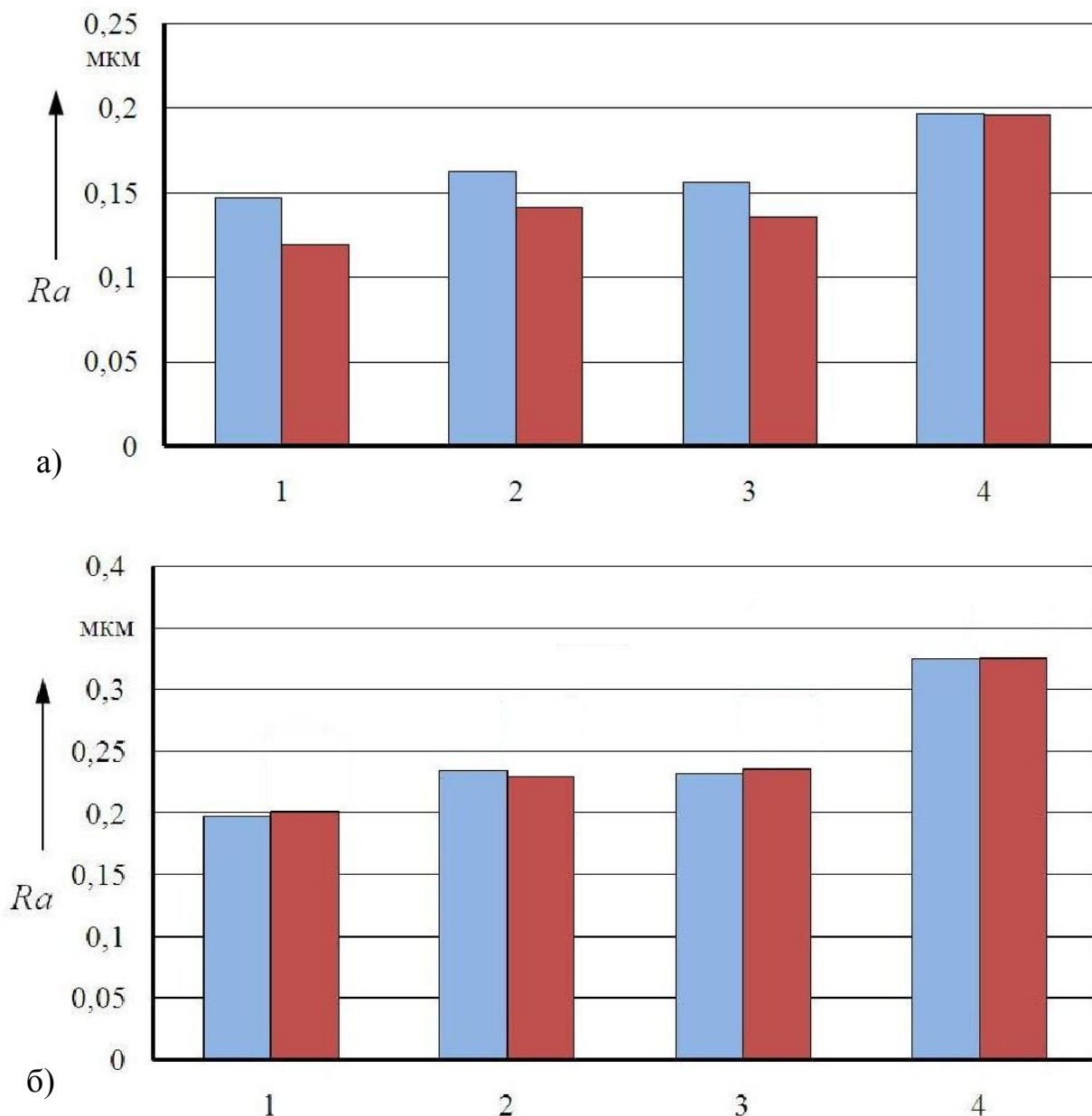


Рис. 4.11. Значения среднего арифметического отклонения профиля Ra при плоском шлифовании заготовок из стали Р6М5 (а) и стали ШХ15 (б): $V_k = 35$ м/с, припуск на обработку $z = 0,15$ мм. 1 – подача на врезание $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, скорость стола $V_{ст} = 5$ м/мин; 2 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 3 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; 4 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; ■ – ШК К4 (см. табл. 4.1); ■ – ШК К6 (см. табл. 4.1)

На основании уравнений регрессии (4.11) и (4.12) были построены графики этих зависимостей среднего арифметического отклонения профиля Ra от содержания графита $C_{гр}$ в шлифовальном круге и подачи на врезание $S_{вр}$ для стали Р6М5 (рис. 4.16, а) и стали ШХ15 (рис. 4.16, б).

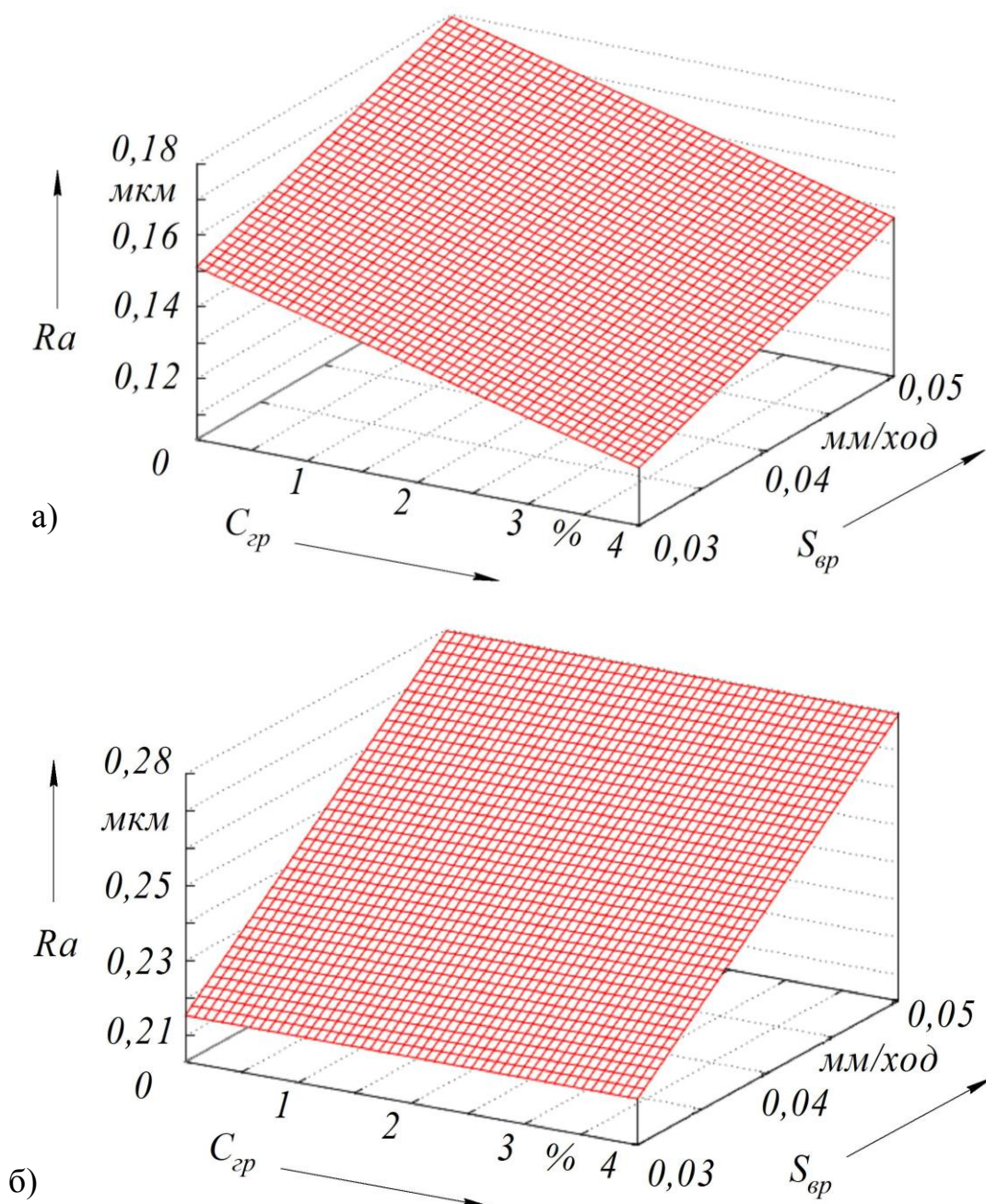


Рис. 4.12. Графики зависимостей среднего арифметического отклонения профиля Ra от содержания графита $C_{гр}$ в шлифовальном круге и подачи на врезание $S_{вр}$ для стали P6M5 (а) и для стали ШХ15 (б): скорость стола $V_{ст} = 10$ м/мин; $V_k = 35$ м/с, припуск на обработку $z = 0,15$ мм

Как видно из рисунков 4.11 (экспериментальные данные) и 4.12 (регрессионные зависимости), при шлифовании заготовок из стали ШХ15 значение среднего арифметического отклонения профиля Ra практически не изменяется при увеличении содержания графита в ШК. На графиках видно, что с увеличением скорости стола с 5 до 15 м/мин значение параметра шероховатости поверхности обработанных заготовок Ra увеличивается на 39 %, а при увеличении подачи на врезание с

0,03 до 0,05 мм/ход – увеличивается на 40 %. При шлифовании заготовок из стали Р6М5 значение среднего арифметического отклонения профиля Ra уменьшается с одинаковым градиентом при любой скорости стола и подачи на врезание при увеличении содержания графита в шлифовальном круге. На графиках видно, что с увеличением скорости стола с 5 до 15 м/мин Ra увеличивается на 21 %, а при увеличении подачи на врезание с 0,03 до 0,05 мм/ход – Ra увеличивается на 26 %. При увеличении содержания графита в шлифовальном круге до 4 % шероховатость поверхности уменьшается примерно на 31 %. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов (например Р6М5) введение графита в формовочную смесь способствует снижению значений высотных параметров шероховатости в исследуемом диапазоне параметров режимов резания.

4.2.2. Многофакторное исследование производительности и теплосилонапряженности плоского шлифования кругами со специальными наполнителями

С целью выявления влияния таких наполнителей связки как сульфат магния и графит на производительность и теплонапряженность плоского шлифования в соответствии с методикой экспериментальных исследований (параграф 4.1) было проведено многофакторное исследование. В ходе экспериментов фиксировали радиальную составляющую силы P_y , касательную составляющую силы P_z и среднюю контактную температуру T_k . Затем определяли коэффициент шлифования по составляющим силы шлифования как отношение касательной P_z к радиальной P_y . Экспериментальные значения указанных параметров представлены в таблице 4.10 и на рисунках 4.13 – 4.15.

Значения исследуемых параметров послужили исходными данными для расчета в программе «Эксперимент 2в3» по результатам которого были получены регрессионные зависимости радиальной составляющей силы P_y , касательной составляющей силы P_z и средней контактной температуры T_k от содержания

графита C_{sp} , врезной подачи $S_{вр}$ и скорости стола $V_{ст}$ для заготовок из сталей ШХ15 и Р6М5 (прил. 4.3). Уравнения регрессии для расчета P_y , P_z и T_k при шлифовании заготовок из стали ШХ15 имеют следующий вид:

$$P_y = 9,5 - 1,1 \cdot C_{гр} + 166,67 \cdot S_{вр} + 0,53 \cdot V_{ст}; \quad (4.13)$$

$$P_z = 8,5 - 1,19 \cdot C_{гр} + 83,33 \cdot S_{вр} + 0,3 \cdot V_{ст}; \quad (4.14)$$

$$T_k = 79,5 + 0,25 \cdot C_{гр} + 1550 \cdot S_{вр} + 4,37 \cdot V_{ст} - 75 \cdot C_{гр} \cdot S_{вр} + 0,1 \cdot C_{гр}; \quad (4.15)$$

при шлифовании заготовок из стали Р6М5

$$P_y = 37,08 - 5,17 \cdot C_{гр} + 391,67 \cdot S_{вр} + 2,05 \cdot V_{ст} + 25 \cdot C_{гр} \cdot S_{вр} + 0,39 \cdot C_{гр} \cdot V_{ст} + 48,33 \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}; \quad (4.16)$$

$$P_z = 26 - 2,56 \cdot C_{гр} + 300 \cdot S_{вр} + 1,13 \cdot V_{ст}; \quad (4.17)$$

$$T_k = 521,92 - 10,56 \cdot C_{гр} - 508,33 \cdot S_{вр} - 3,78 \cdot V_{ст} + 0,09 \cdot C_{гр} \cdot V_{ст} + 241,67 \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}. \quad (4.18)$$

В процессе расчета в программе модели проверялись на адекватность по критерию Фишера и однородность дисперсий.

4.10. Экспериментальные значения параметров теплосилонапряженности P_y , P_z , K_p и T_k при плоском шлифовании

Применяемые ШК (код по табл. 4.1)	$S_{вр}$, мм/ход	$V_{ст}$, м/мин	Материал заготовки	P_y , Н	P_z , Н	K_p	T_k , °C
К4	0,03	5	Р6М5	66	42	0,64	524
			ШХ15	19	13	0,68	158
	0,05	5	Р6М5	79	48	0,61	538
			ШХ15	23	15	0,64	196
	0,03	15	Р6М5	101	55	0,55	559
			ШХ15	27	17	0,62	223
	0,05	15	Р6М5	124	63	0,51	621
			ШХ15	33	20	0,6	275
К6	0,03	5	Р6М5	49	32	0,65	487
			ШХ15	12	8	0,67	142
	0,05	5	Р6М5	60	37	0,62	502
			ШХ15	16	10	0,63	167
	0,03	15	Р6М5	86	49	0,57	527
			ШХ15	18	11	0,6	190
	0,05	15	Р6М5	98	54	0,55	591
			ШХ15	25	14	0,57	215

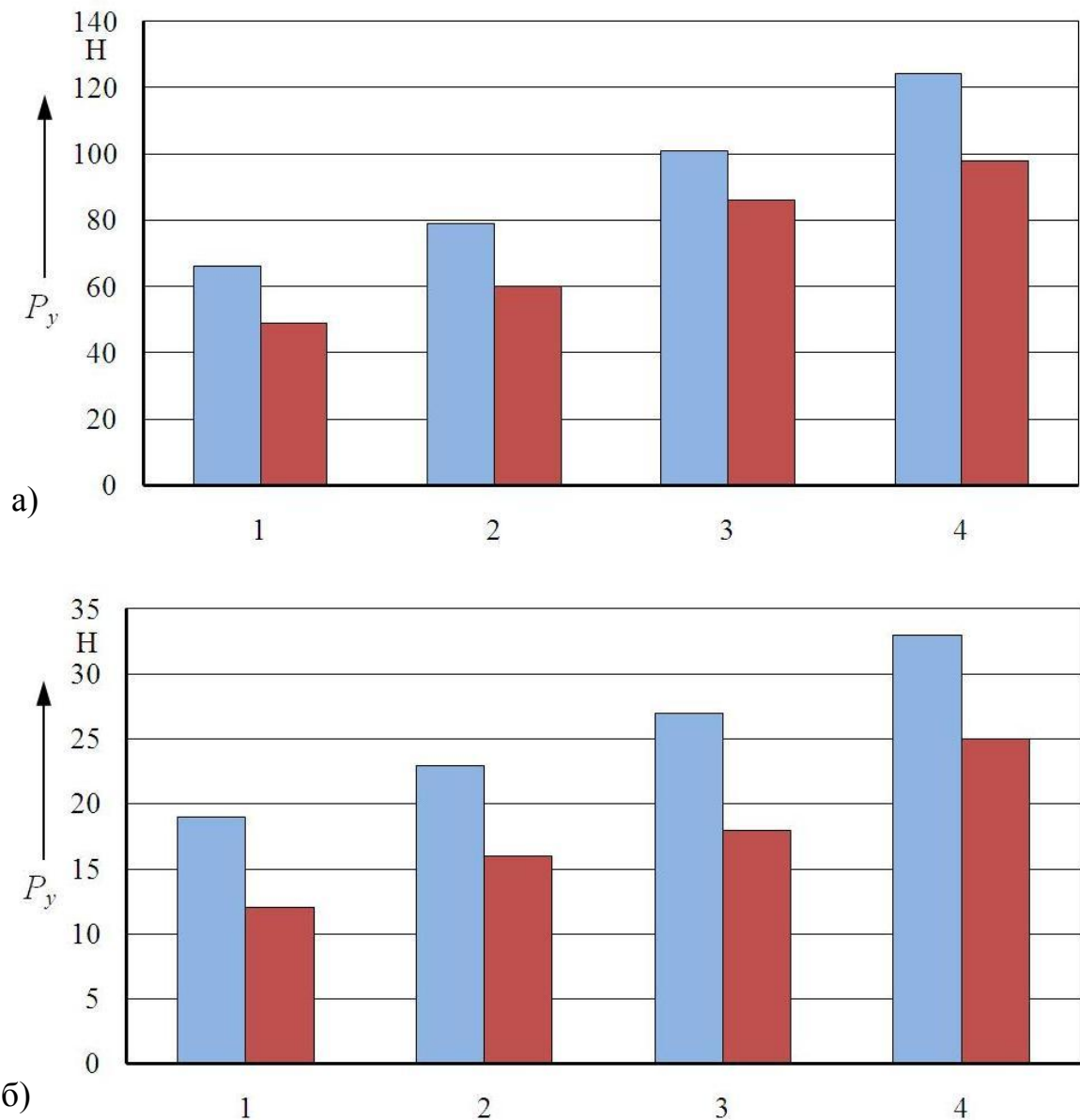


Рис. 4.13. Значения радиальной составляющей силы P_y при плоском шлифовании заготовок из стали P6M5 (а) и стали ШХ15 (б): $V_k = 35$ м/с, $z = 0,15$ мм. 1 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 2 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 3 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; 4 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; ■ – ШК К4 (см. табл. 4.1); ■ – ШК К6 (см. табл. 4.1)

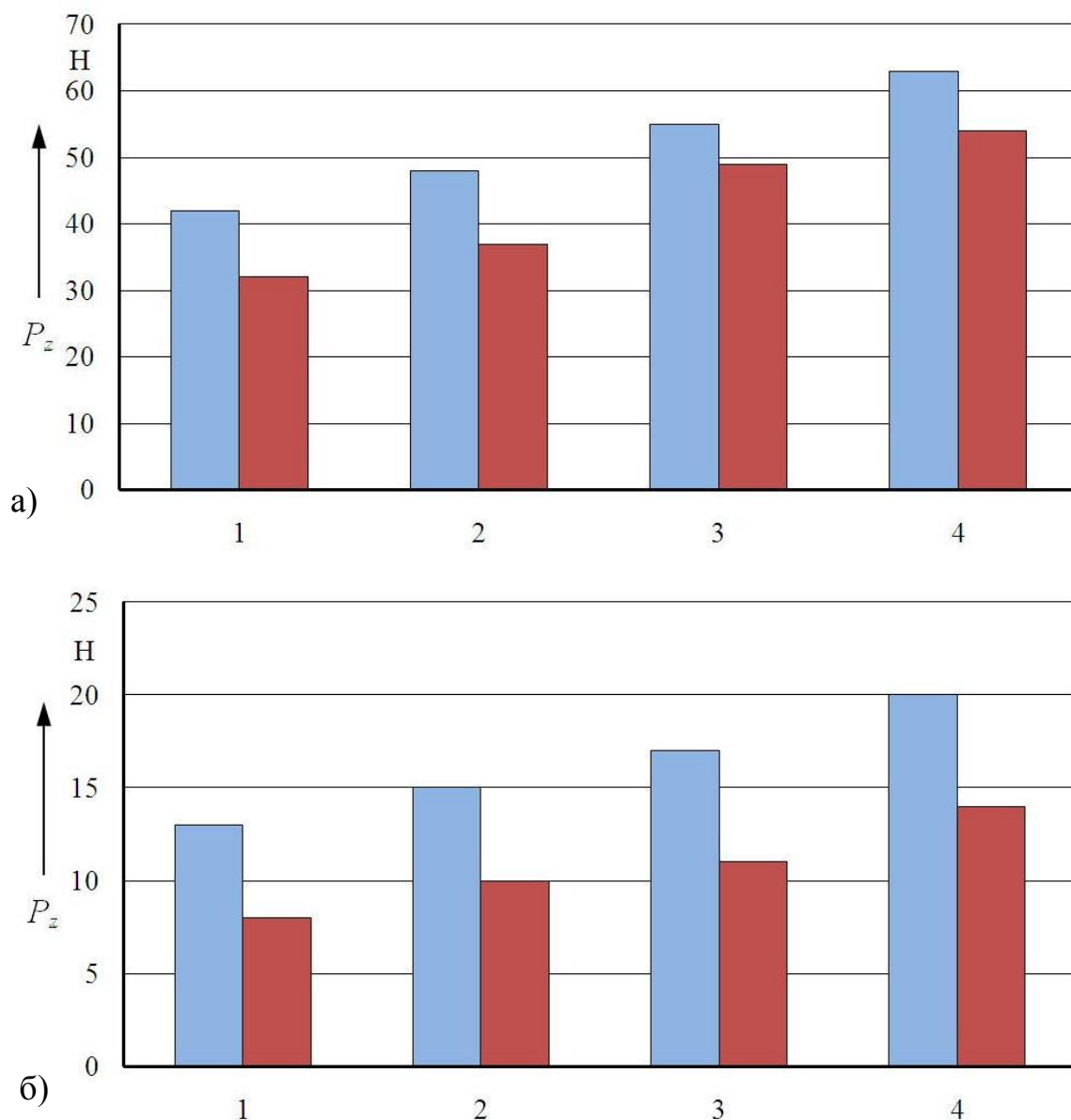


Рис. 4.14. Значения касательной составляющей силы P_z при плоском шлифовании заготовок из стали Р6М5 (а) и стали ШХ15 (б): $V_k = 35$ м/с, $z = 0,15$ мм. 1 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 2 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 3 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; 4 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; ■ – ШК К4 (см. табл. 4.1); ■ – ШК К6 (см. табл. 4.1)

Проведено экспериментальное исследование влияния наполнителей на тепло-силонапряженность процесса шлифования при соответствии контролируемых переменных (C , $V_{ст}$, $S_{вр}$) основному уровню матрицы планирования эксперимента (см. табл. 4.4) для заготовок из сталей ШХ15 и Р6М5. Расхождение экспериментальных значений параметров теплосилонапряженности и значений полученных расчетным путем (по уравнениям регрессии) не превышало 21 % (для средней контактной температуры T_k).

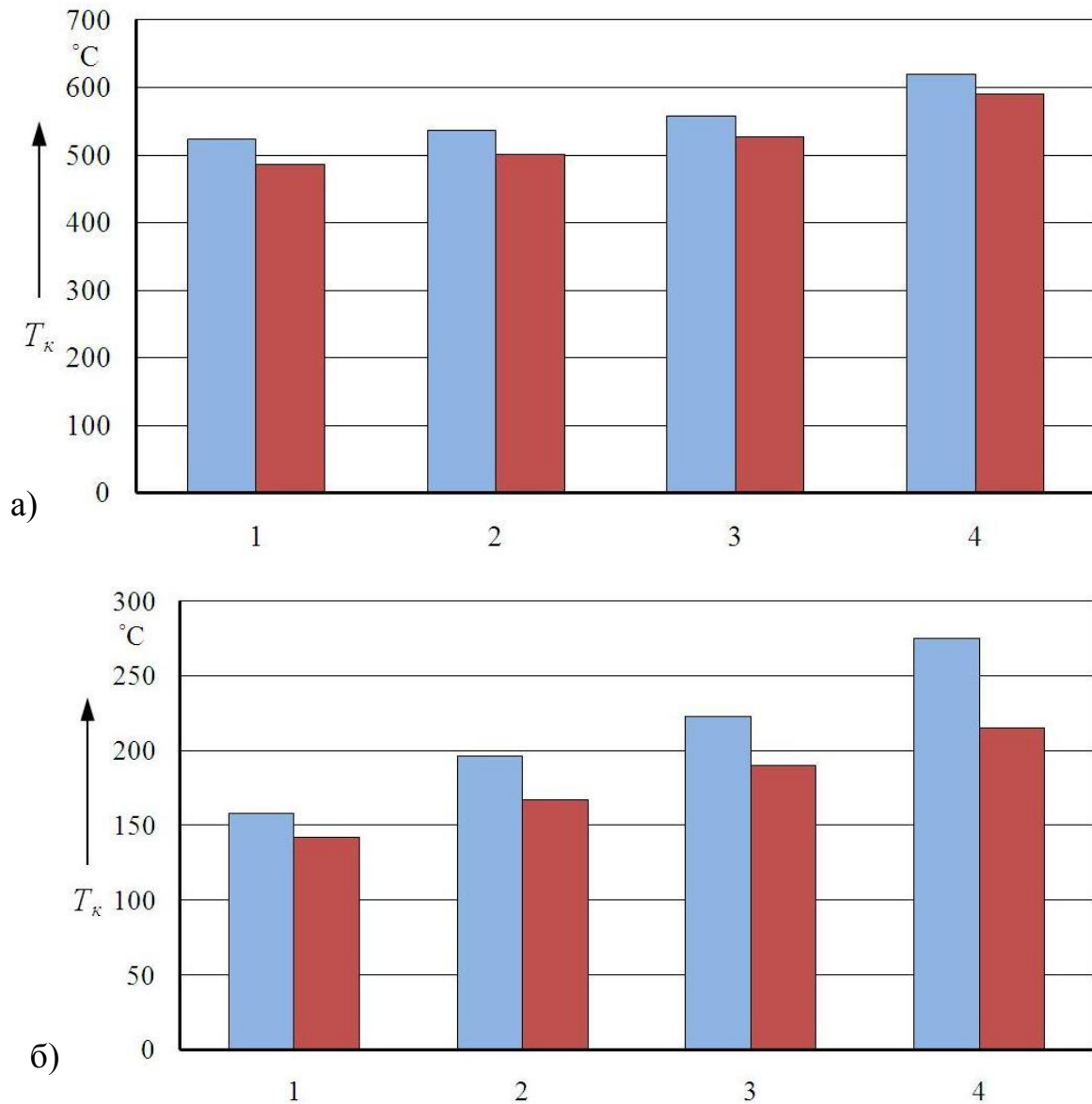


Рис. 4.15. Значения средней контактной температуры T_k при плоском шлифовании заготовок из стали Р6М5 (а) и стали ШХ15 (б): $V_k = 35$ м/с, $z = 0,15$ мм. 1 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 2 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 5$ м/мин; 3 – $S_{вр} = 0,03$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; 4 – $S_{вр} = 0,05$ мм/ход, $V_{ст} = 15$ м/мин; ■ – ШК К4 (см. табл. 4.1); ■ – ШК К6 (см. табл. 4.1)

На основании уравнений регрессии (4.14) – (4.19) были построены графики зависимости касательной составляющей силы P_z и средней контактной температуры T_k от содержания графита $C_{гр}$ в шлифовальном круге и подачи на врезание $S_{вр}$ (рис. 4.20 – 4.21).

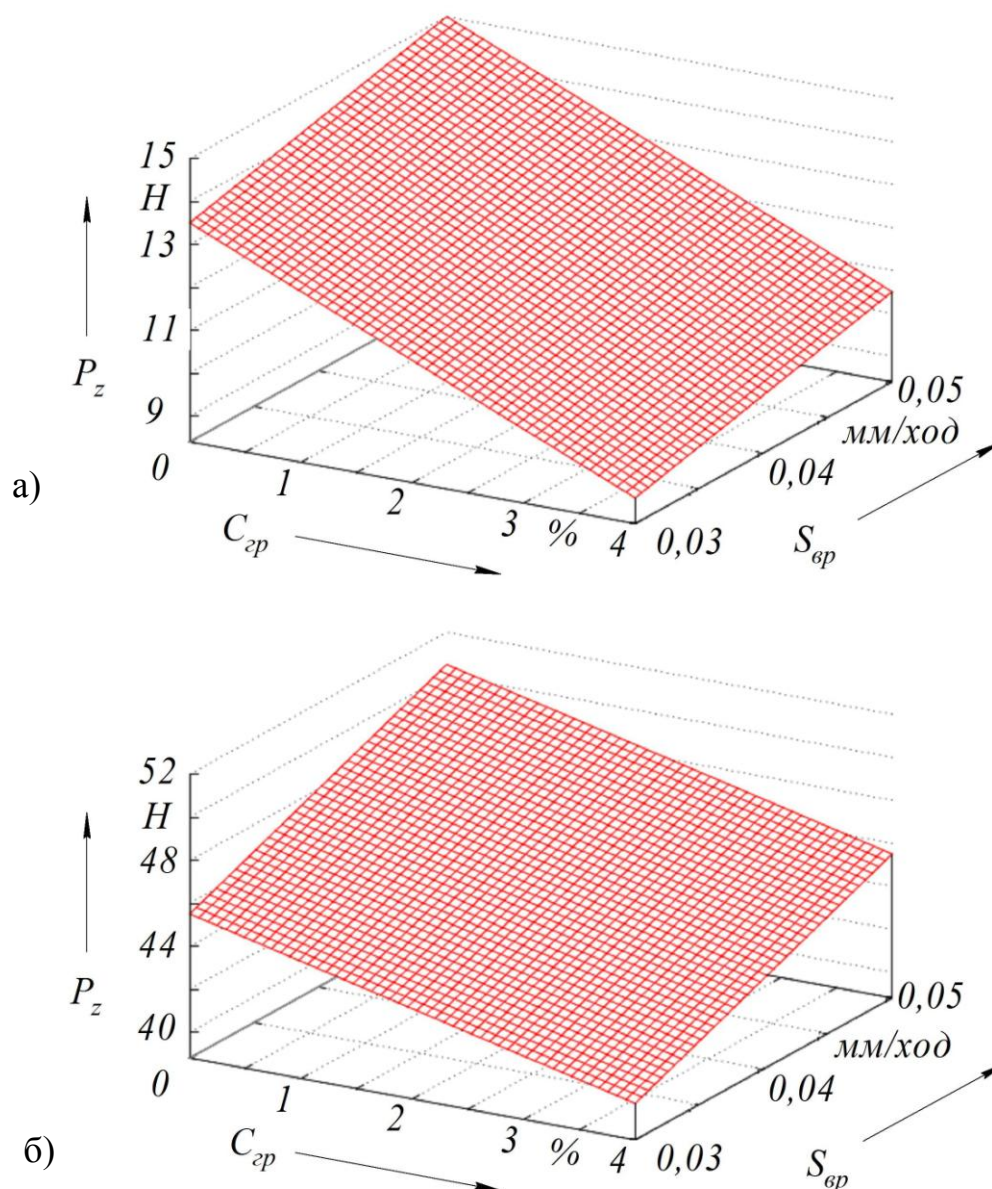


Рис. 4.16. Графики зависимостей касательной составляющей силы P_z от содержания графита C_{gp} в шлифовальном круге и подачи на врезание S_{br} для стали ШХ15 (а) и стали Р6М5 (б): $V_k = 35$ м/с, $V_{ст} = 10$ м/мин, $z = 0,15$ мм

Как видно из рисунков 4.14 (экспериментальные данные) и 4.16 (регрессионные зависимости), при шлифовании заготовок из стали ШХ15 значение касательной составляющей силы P_z увеличивается с одинаковым градиентом при любой скорости стола и подачи на врезание при увеличении содержания графита в шлифовальном круге. На графиках видно, что с увеличением скорости стола с 5 до 15 м/мин касательная составляющая силы P_z увеличивается на 18 %, а при увеличении подачи на врезание с 0,03 до 0,05 мм/ход – увеличивается на 9 %. При увеличении содержания графита в шлифовальном круге до 4 % P_z уменьшается при-

мерно на 57 %. При шлифовании заготовок из стали Р6М5 значение касательной составляющей силы P_z уменьшается с одинаковым градиентом при любой подачи на врезание при увеличении содержания графита в шлифовальном круге. На графике видно, что при увеличении подачи на врезание с 0,03 до 0,05 мм/ход P_z увеличивается на 10 %. При увеличении содержания графита в шлифовальном круге до 4 % P_z уменьшается примерно на 4 %. Таким образом можно сделать вывод о том, что введение графита способствует снижению сил шлифования для рассматриваемых материалов и режимов резания.

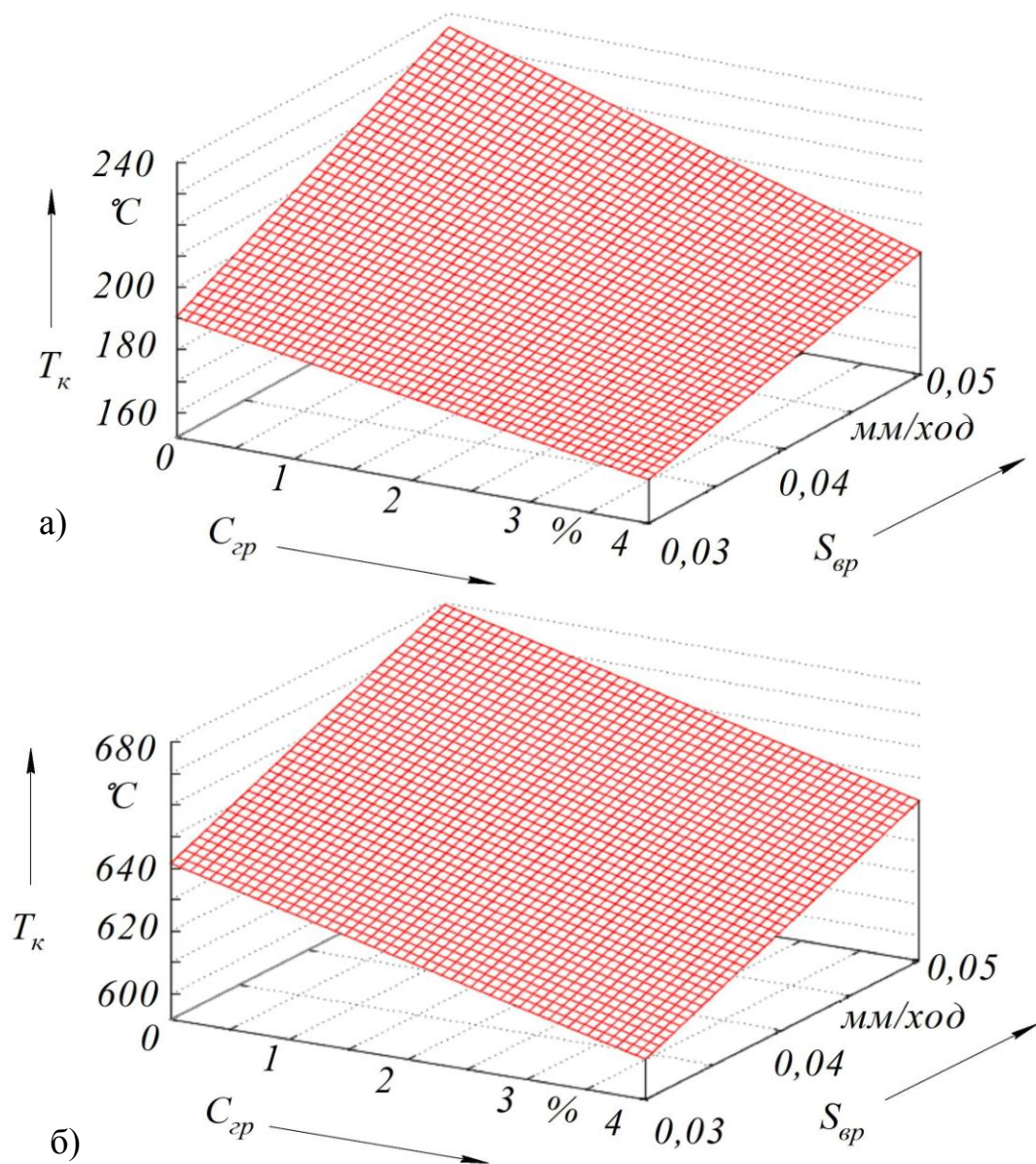


Рис. 4.17. Графики зависимостей средней контактной температуры T_k от содержания графита $C_{гр}$ в шлифовальном круге и подачи на врезание $S_{вр}$ для стали ШХ15 (а) и стали Р6М5 (б): $V_k = 35$ м/с, $V_{ст} = 10$ м/мин, $z = 0,15$ мм

Как видно из рисунков 4.15 (экспериментальные данные) и 4.17 (регрессионные зависимости), при шлифовании заготовок из стали ШХ15 градиент уменьшения средней контактной температуры T_k при увеличении содержания графита увеличивается пропорционально значению скорости стола. На графиках видно, что при отсутствии графита в шлифовальном круге с увеличением скорости стола с 5 до 15 м/мин средняя контактная температура T_k увеличивается на 40 %. При отсутствии графита в шлифовальном круге с увеличением подачи на врезание с 0,03 до 0,05 мм/ход средняя контактная температура T_k увеличивается на 23 %. При увеличении содержания графита до 4 %, при подаче на врезание $S_{вр} = 0,06$ мм/ход средняя контактная температура T_k уменьшается примерно на 32 %. При шлифовании заготовок из стали Р6М5 значение средней контактной температуры T_k уменьшается с одинаковым градиентом при любой скорости стола и подачи на врезание при увеличении содержания графита в шлифовальном круге. На графиках видно, что с увеличением скорости стола с 5 до 15 м/мин T_k увеличивается на 15 %, а при увеличении подачи на врезание с 0,03 до 0,05 мм/ход – соответственно на 11 %. При увеличении содержания графита в шлифовальном круге до 4 % температура уменьшается примерно на 8 %.

Таким образом, по результатам исследований можно сделать вывод о том, что при обработке заготовок из стали Р6М5 размерный износ шлифовального круга больше, чем при обработке заготовок из стали ШХ15 независимо от содержания в нем графита, что объясняется различием групп обрабатываемости данных сталей. Установлено, что при увеличении содержания графита до 4 % коэффициент шлифования уменьшается не более чем на 3,7 % при обработке заготовок из стали Р6М5 и не более чем на 7,5 % при обработке заготовок из стали ШХ15. При увеличении содержания графита до 4 % значение среднего арифметического отклонения профиля шлифованных поверхностей уменьшается не более чем на 23,5 % при обработке заготовок из стали Р6М5, а при обработке заготовок из стали ШХ15 практически не изменяется. Технология изготовления, в частности наличие наполнителя из графита, практически не влияет на коэффициент шлифования по составляющим силы шлифования, однако установлено, что при увеличении со-

держания графита до 4 %, касательная и радиальная составляющие силы шлифования уменьшаются примерно на 35 %. Средняя контактная температура, при увеличении содержания графита до 4 %, уменьшается в среднем на 7 % при шлифовании заготовок из стали Р6М5 и на 17 % при обработке заготовок из стали ШХ15.

4.3. Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При обработке заготовок из стали Р6М5 размерный износ шлифовального круга больше, чем при обработке заготовок из стали ШХ15 независимо от содержания в нем графита, что объясняется различием групп обрабатываемости данных сталей. Установлено, что при увеличении содержания графита до 4 % коэффициент шлифования уменьшается не более чем на 3,7 % при обработке заготовок из стали Р6М5 и не более чем на 7,5 % при обработке заготовок из стали ШХ15.

2. При увеличении содержания графита до 4 % значение среднего арифметического отклонения профиля шлифованных поверхностей уменьшается не более чем на 23,5 % при обработке заготовок из стали Р6М5, а при обработке заготовок из стали ШХ15 практически не изменяется.

3. Технология изготовления, в частности наличие наполнителя из графита, практически не влияет на коэффициент шлифования по составляющим силы шлифования, однако установлено, что при увеличении содержания графита до 4 %, касательная и радиальная составляющие силы шлифования уменьшаются примерно на 35 %. Средняя контактная температура, при увеличении содержания графита до 4 %, уменьшается в среднем на 7 % при шлифовании заготовок из стали Р6М5 и на 17 % при обработке заготовок из стали ШХ15.

4. Таким образом доказано, что предложенные методы по совершенствованию технологии изготовления АИ на бакелитовой связке не ухудшают, а по ряду показателей улучшают параметры работоспособности. В следующей главе предстоит оценить экономическую эффективность от внедрения новой технологии, провести

опытно-промышленные испытания АИ, изготовленного по модернизированной технологии, а также разработать рекомендации по проектированию микроволновой технологии изготовления АИ на бакелитовой связке.

Глава 5. Технико-экономическая эффективность и использование результатов исследований в промышленности

5.1. Разработка оборудования для микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ

На основании результатов, представленных в предыдущих главах, исследований технологической эффективности нового способа теплоизоляции полуфабрикатов АИ при их микроволновом нагреве (патент РФ № 2545939) модернизировали опытно-промышленную СВЧ - установку УМБ1Э [6]. Эта установка была оснащена устройством для засыпки, удаления и хранения сыпучего теплоизолирующего материала – вермикулита вспученного фракционированного ВВФ-2 (ТУ 5712-091-00281915-2007) и радиопрозрачным коробом для размещения полуфабрикатов АИ (рис. 5.1).

Устройство для размещения теплоизолирующего материала устанавливается сверху на корпус СВЧ - печи УМБ1Э с помощью специального крепления. Патрубок для забора воздуха 7 соединяется трубопроводом 4 с вентилятором 6, предназначенным для обдува магнетронов.

Перед началом микроволновой термообработки, полуфабрикаты АИ, уложенные в радиопрозрачный короб 2, установленный на рабочую тележку 1, засыпают теплоизоляционным материалом – вермикулитом вспученным. Для этого, при выключенном вентиляторе 6, поворачивают патрубок для подачи и забора теплоизолирующего материала 11 по часовой стрелке до совпадения отверстий во внутреннем патрубке 10 и в емкости-накопителе 9. При этом вермикулит под действием силы тяжести поступает в патрубок 11 и через трубопровод 3 направляется в радиопрозрачный короб 2. Для прекращения подачи вермикулита патрубок 11 возвращают в первоначальное положение.

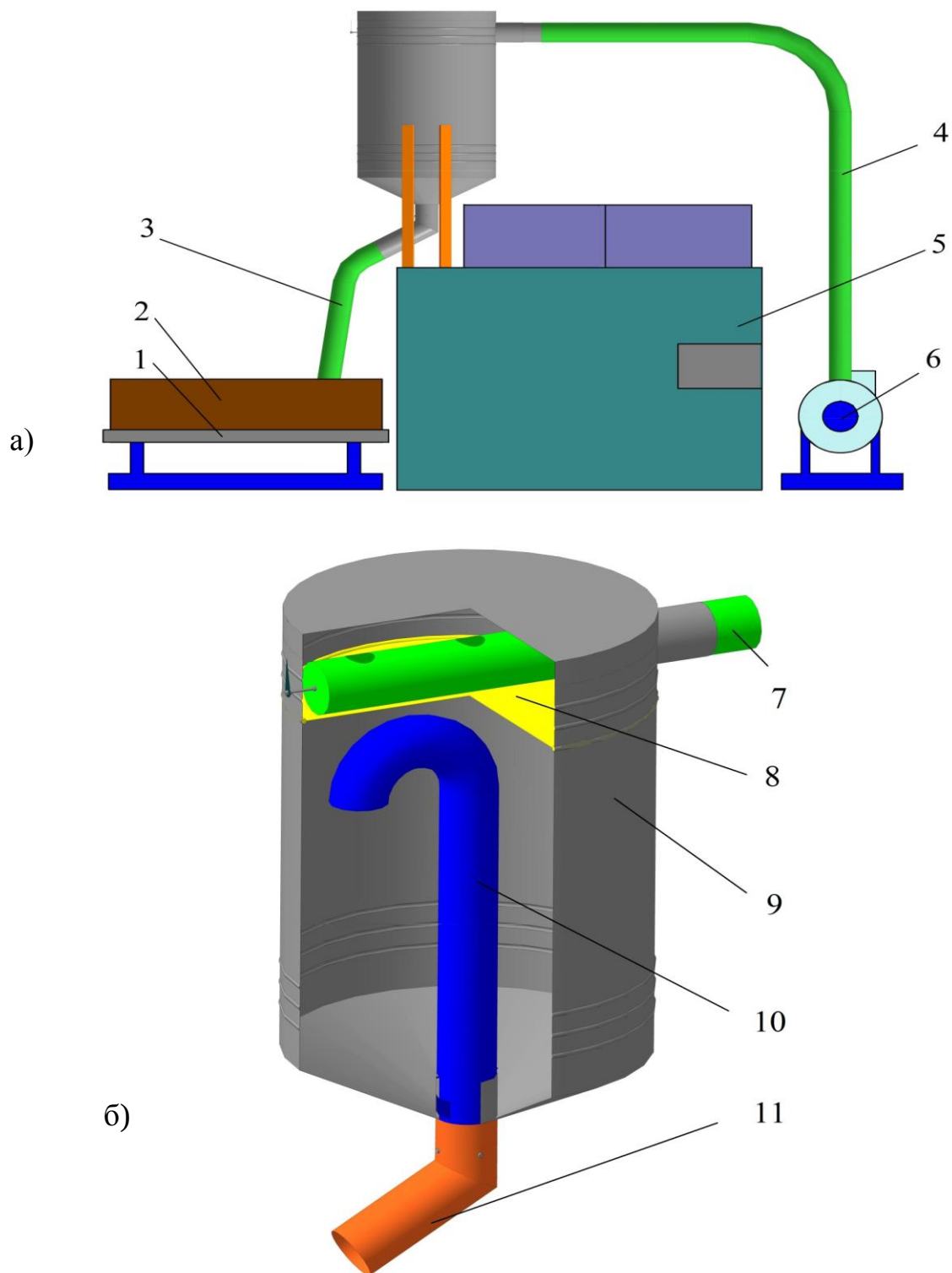


Рис. 5.1. Модернизированная опытно-промышленная СВЧ - установка УМБ1ЭМ (а) и устройство для засыпки, удаления и хранения сыпучего теплоизолирующего материала (б): 1 – рабочая тележка; 2 – радиопрозрачный короб; 3, 4 – соединительные трубопроводы; 5 – СВЧ - установка УМБ1Э; 6 – вентилятор радиальный ВР280-46№2; 7 – патрубок для забора воздуха; 8 – фильтр; 9 – емкость-накопитель; 10 – внутренний патрубок; 11 – патрубок для подачи и забора теплоизолятора

После окончания термообработки включают вентилятор 6 и вермикулит поступает в емкость 9, предназначенную для его хранения. Для предотвращения попадания вермикулита в верхний отсек емкости и последующего его удаления через трубопровод 4 в устройстве предусмотрен фильтр 8, который состоит из металлического кольца и двух сеток из нержавеющей стали, между которыми располагается несколько слоев синтепона (ТУ-6-13-0204056-40-90). Техническая характеристика разработанного устройства представлена в таблице 5.1.

5.1. Техническая характеристика устройства для засыпки, удаления и хранения сыпучего теплоизолирующего материала

Параметры	Значения
Производительность засыпки вермикулита, л/мин	70
Производительность удаления вермикулита, л/мин	23
Мощность вентилятора, кВт	2
Максимальный объем вермикулита, загружаемого в емкость-накопитель, м ³	0,35
Габаритные размеры устройства, мм	1570×1050×765
Масса без теплоизолятора, кг	65

Радиопрозрачный короб 2, предназначенный для размещения полуфабрикатов АИ и теплоизолирующего материала в процессе термообработки, должен отвечать следующим требованиям: низкий уровень диэлектрических потерь; теплостойкость до 250 °С; влагостойкость; механическая прочность.

Для обеспечения вышеуказанных требований в качестве материала стенок короба был выбран сотовый наполнитель из стеклоткани, который используется в авиастроении и судостроении при изготовлении антенных обтекателей, радиопрозрачных экранов, локаторов и других объектов. Панели из сотового наполнителя обладают влагостойкостью, отвечают высоким требованиям по теплостойкости, имеют необходимые прочностные свойства (прочность при сжатии не менее 32 кг/см², модуль упругости при сдвиге не менее 1000 кг/см²), обеспечивают высокий уровень теплоизоляции при минимальной массе конструкции.

Для склеивания панелей из сотового наполнителя был применен кремнийорганический компаунд КЛТ-30 ТУ 38.103.691-89 (табл. 5.2), предназначенный для

защиты приборов и аппаратов от воздействия влаги, для герметизации приборов, работающих в условиях вибрации, для склеивания стекол, оргстекла, керамики и других материалов, обладает высокими диэлектрическими свойствами. Компаунд отверждается при комнатной температуре под действием влаги, находящейся в воздухе, с образованием резиноподобного водо-, тепло- и морозостойкого материала. Время отверждения 24 часа в слое до 2 мм. Для усиления конструкции короба его внутренние углы были дополнительно проклеены двумя полосками из сотового заполнителя. Общий вид радиопрозрачного короба представлен на рисунке 5.2.

5.2. Свойства кремнийорганического компаунда КЛТ-30

Характеристика	Норма по ТУ
Плотность, г/см ³	1,15
Температурный режим эксплуатации, °С	– 60 ... + 300
Жизнеспособность, мин.	15 ... 40
Прочность при разрыве, не менее, МПа	0,8 ... 1,2
Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 МГц	3,4
Электрическая прочность при 20 °С, кВ/мм	14,5
Тангенс угла диэлектрических потерь при 106 Гц, не более	0,01

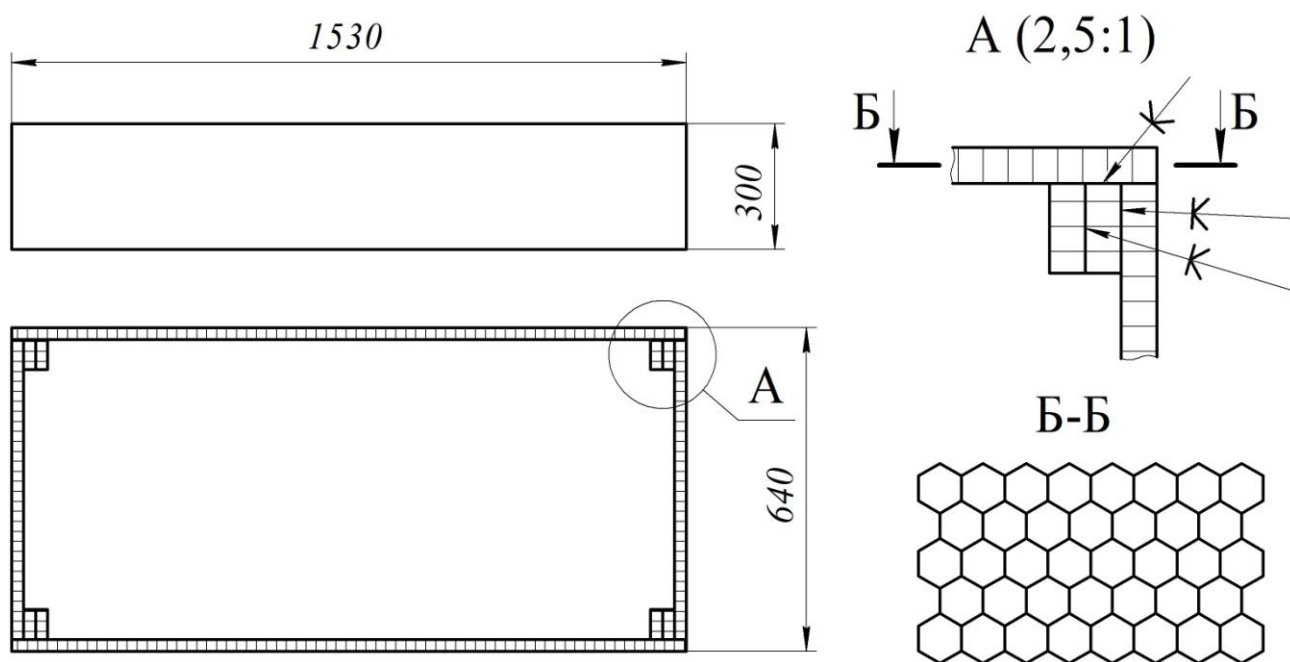


Рис. 5.2. Радиопрозрачный короб

5.2. Рекомендации по разработке технологического процесса термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, содержащей специальные наполнители, с использованием термостатирования

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований (главы 2 – 4) разработаны рекомендации по проектированию технологических процессов термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, содержащей специальные наполнители, с использованием термостатирования:

1. При проведении термообработки в микроволновом поле для термостатирования полуфабрикатов АИ рекомендуется использовать сыпучий радиопрозрачный теплоизолятор, в качестве которого целесообразно использовать вермикулит вспученный ВВФ-2 ТУ 5712-091-00281915-2007. Высота слоя теплоизолирующего материала над поверхностью стопки полуфабрикатов, а также толщина слоя от стопки полуфабрикатов АИ до стенки радиопрозрачного короба должна быть не меньше 40 мм.

2. Для ускорения процесса СВЧ – термообработки рекомендуется заменить наполнитель гипс ГВВС-16, ТУ 21-РСФСР-153-90 полуводный на дегидратированный сульфат магния в аналогичной массовой пропорции.

3. При термообработке полуфабрикатов, на абразивном материале, с низкими радиопоглощающими свойствами (электрокорунд белый, нормальный, циркониевый и др.), обладающих низкой твердостью и (или) высокой пористостью, следует вводить в формовочную смесь дополнительно радиопоглощающий наполнитель – графит кристаллический литейный ГЛ-1 ГОСТ 5279. Содержание наполнителя необходимо ограничить двумя процентами от массы абразива.

4. При микроволновой термообработке полуфабрикатов АИ, рабочая и нерабочая части которых состоят из абразивных материалов с различными радиопоглощающими свойствами, следует ввести графит в ту часть полуфабриката АИ, радиопоглощающие свойства которой необходимо усилить. Количество наполни-

теля определяют по зависимостям (2.48), (2.52) – (2.54), (2.59) с помощью программы RPT2.

5. Поскольку с увеличением высоты стопки полуфабрикатов АИ, загружаемых в микроволновую установку, повышается неравномерность нагрева и снижается эффективность применения радиопоглощающих наполнителей, следует ограничить максимальную высоту стопки полуфабрикатов величиной 0,3 ... 0,5 м.

6. При разработке рецептуры формовочной смеси следует учитывать влияние графита на показатели работоспособности АИ (при помощи регрессионных зависимостей (4.9) – (4.18)).

7. При проектировании технологического процесса изготовления АИ на бакелитовой связке, необходимо учитывать тот факт, что при замене конвективного способа термообработки на микроволновый, твердость АИ повышается в среднем на 1 - 2 степени, а при введении в состав формовочной смеси графита в количестве 4 % от массы абразива, скорость распространения звуковой волны снижается в среднем на 3 %.

5.3. Использование разработок в промышленности

Для использования в промышленности предлагаются следующие разработки:

- рекомендации по проектированию технологических процессов термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, содержащей специальные наполнители, с использованием термостатирования, которые переданы в ОАО «Косулинский абразивный завод» для последующего внедрения;

- оборудование для обеспечения теплоизоляции полуфабрикатов АИ в процессе их микроволновой термообработки, которое было изготовлено в ООО «Центр ресурсосберегающих технологий»;

- программно-информационный комплекс для определения диэлектрической проницаемости полуфабрикатов АИ, модифицированных радиопоглощающими

наполнителями, а также оценки влияния радиопоглощающих наполнителей на скорость их нагрева в СВЧ - поле, который внедрен в учебный процесс подготовки студентов машиностроительного факультета, обучающихся по магистерской программе 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств на кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета, в виде сборника учебно-исследовательских лабораторных работ по дисциплине «Научные основы проектирования, технологии изготовления и применения специального абразивного инструмента»;

– шлифовальные круги на бакелитовой связке с наполнителями различной природы, полуфабрикаты которых термообработаны в СВЧ - поле с применением сыпучей радиопрозрачной теплоизоляции.

Для подтверждения результатов проведенных исследований влияния графитового наполнителя на технологическую эффективность АИ на бакелитовой связке были проведены опытно-промышленные испытания опытных образцов АИ 1 600' 75' 305 14А F46 М 7 В 35 м/с в условиях действующего производства ОАО "Автодеталь-сервис". Испытания проводили в цехе № 3 представителями техотдела ОАО "Автодеталь-сервис" и Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 (рис. 5.3) из стали 20Х на торцешлифовальном станке модели СА-12.

Цель испытаний: выявление технологической эффективности ШК на бакелитовой связке с графитовым наполнителем, термообработанного в микроволновом поле, на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 в условиях основного производства ОАО "Автодеталь-сервис".

Номенклатура шлифовальных кругов для проведения опытно-промышленных испытаний представлена в табл. 5.3. Содержание графитового наполнителя (графита марки ГЛ1 ГОСТ 5274) в опытном образце ШК составляло 4 % по массе.



Рис. 5.3. Деталь – крестовина карданного вала 469-2201030 (материал: сталь 20X; твердость HRC 59...63; масса детали 0,26 кг)

5.3. Номенклатура шлифовальных кругов для проведения опытно-промышленных испытаний

Круг	Типоразмер	Характеристика	Вид термообработки
Стандартный	1 600' 75' 305	14А F46 М 7 В 35 м/с 2 кл. А (ГОСТ 2424)	Конвекция
Опытный образец		14А F46 М 7 В 35 м/с 2 кл. А (ГОСТ 2424)	Микроволновая термообработка

Испытания проводили на торцешлифовальном станке модели СА-12. Глубина резания при этом составляла $t = 0,2$ мм, снимаемый припуск – $z = 0,2$ мм, $V = 55$ м/мин, частота вращения круга $n = 1100$ об/мин. Шлифование выполняли с применением СОЖ – 4 %-ной эмульсии "Автокат Ф-78" (ТУ7774-009-27883685-99). Размеры обработки: наружный и внутренний диаметры соответственно $\varnothing 15$ и $\varnothing 8$ мм. Шлифовальный круг правили карандашом алмазным синтетическим 3908-0087, 1 карат (ГОСТ 607).

В результате проведенных испытаний установлено, что опытный образец

АИ 1 600' 75' 305 14А F46 М 7 В 35 м/с с графитовым наполнителем показал на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 более высокую работоспособность по сравнению с применением стандартного круга такого же типоразмера и характеристики: стойкость круга увеличилась на 25 % при обеспечении такой же шероховатости шлифованной поверхности, что и при шлифовании стандартным кругом (табл. 5.4). Изменений твердости и наличия прижогов в поверхностном слое торцов крестовины, шлифованных как стандартным, так и опытным АИ, не обнаружено.

5.4. Результаты опытно-промышленных испытаний АИ с графитовым наполнителем на операции шлифования торцов крестовины карданного вала

Показатели работоспособности кругов	Вариант обработки	
	Базовый	Опытный
1. Стойкость кругов до появления прижога на детали, шт.	200	250
2. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , обеспечиваемое при шлифовании, мкм	0,63	0,4

По результатам опытно-промышленных испытаний составлен акт (приложение 5.1) в котором рекомендовано использование АИ 1 600' 75' 305 14А F46 М 7 В 35 м/с, производства ОАО "Дмитровградхиммаш" с графитовым наполнителем, на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 из стали 20Х на торцешлифовальном станке модели СА-12 в механическом цехе № 3 ОАО "Автодеталь-сервис".

Проект «Шлифовальные круги на бакелитовой связке с наполнителями из углеродсодержащих материалов» удостоен медалей Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа (г. Ульяновск, 2010 г.) и десятой Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2010» (Всероссийский выставочный центр, г. Москва, 2010 г.). Проект по теме диссертационной работы был поддержан по программе «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» («У.М.Н.И.К.») Фонда содействия развитию ма-

лых форм предприятий в научно-технической сфере. В 2011 г. диссертант стал лауреатом конкурса научно-технического творчества молодежи Приволжского федерального округа.

5.4. Экономическая эффективность применения модернизированной технологии изготовления АИ на бакелитовой связке

Как показали экспериментальные исследования (глава 3), модернизация технологии микроволновой бакелизации полуфабрикатов АИ позволит сократить длительность цикла термообработки по сравнению с существующей технологией [6] до двух часов. При этом для реализации модернизированной технологии потребуется изготовить устройство для засыпки, удаления и хранения сыпучего теплоизолирующего материала при термостатировании полуфабрикатов АИ, радиопрозрачный короб и закупить необходимое количество радиопрозрачного теплоизолирующего материала (вермикулита вспученного, см. параграф 5.1). Необходимые для реализации модернизированной технологии оборудование и оснастка на участке бакелизации, а также его стоимость представлена в таблице 5.5.

5.5. Оборудование и оснастка на участке микроволновой бакелизации полуфабрикатов АИ

Наименование	Количество, шт.	Стоимость, руб.
СВЧ-установка УМБ1Э	1	1 100 000
Устройство для засыпки, удаления и хранения сыпучего теплоизолирующего материала при термостатировании полуфабрикатов АИ	1	50 000
Радиопрозрачный короб	2	20 000
Итого		1 170 000

Срок амортизации оборудования и оснастки определили по гарантийному сроку эксплуатации СВЧ-бакелизатора, т.е. 5 лет. Амортизационные отчисления при этом составят:

$$C_{\text{асвч}} = 1\,170\,000 \text{ руб.} / 5 \text{ лет} = 234\,000 \text{ руб./год.}$$

СВЧ - установка УМБ1ЭМ оснащена двумя тележками, благодаря чему параллельно с термообработкой партии полуфабрикатов на первой тележке выполняют выгрузку термообработанных и загрузку сырых полуфабрикатов АИ на вторую тележку. Максимальная загрузка одной тележки составляет 150 кг. За одну смену на установке УМБ1ЭМ планируется изготавливать по модернизированной технологии 600 кг АИ. Режим работы установки – односменный при пятидневной рабочей неделе. Максимальный объем производства продукции СВЧ-установкой в год с учетом потерь мощности (10 %) от незапланированных простоев составит 137 310 кг. Объем полуфабрикатов АИ массой 150 кг, загружаемый в СВЧ - установку, составляет 0,058 м³. Объем радиопрозрачного короба равен 0,234 м³. Объем теплоизолирующего материала, необходимый для проведения цикла термообработки по модернизированной технологии, составляет 0,176 м³. В процессе эксплуатации, возможно, будет постепенно происходить загрязнение теплоизолирующего материала летучими веществами, что приведет к потере им радиопрозрачных свойств и необходимости его регенерации (конвективной термообработки при 500 °С) или замене. Примем, что при установленном режиме работы СВЧ - установки полную замену теплоизолирующего материала будут производить один раз в месяц. Следовательно, на одну СВЧ - установку в год потребуется 2,1 м³ вермикулита вспученного (316,8 кг).

Для повышения радиопоглощающих свойств полуфабрикатов АИ по модернизированной технологии предполагается модифицировать бакелитовую связку графитом литейным в количестве 2 % от массы абразива, а для предотвращения эффекта вспучивания заменить гипс полуводный на дегидратированный сульфат магния. Перечень и количество материалов, необходимых для изготовления 137 310 кг АИ, представлены в таблице 5.6.

Удельные энергозатраты при бакелизации по действующей технологии составляют в среднем 0,3 кВт·ч/кг. Как показали экспериментальные исследования (параграфы 3.1, 3.2) при реализации модернизированной технологии за счет предлагаемых решений удельные энергозатраты будут снижены на 15 – 20 % и составят в среднем 0,248 кВт·ч/кг. Стоимость одного кВт·ч составляет 7,5 руб.

5.6. План обеспечения сырьем цеха по производству АИ на один год (по модернизированной технологии)

Наименование	Расход, кг/год	Цена в руб./кг	Стоимость сы- рья, тыс. руб.
Электрокорунд белый 25А F80, ГОСТ28818	117 359	55	6 455
Связка СФП-012А3, ТУ 2257-074-05015227-2002	10 562	120	1 267
Увлажнитель Абразит-031, ТУ 2221-067-26161597-06	5 281	108	570
Сульфат магния ГОСТ 4523	1 760	30	53
Графит кристаллический ли- тейный ГЛ-1, ГОСТ 5279	2 347	45	106
Вермикулит вспученный фрак- ционированный ВВФ-2, ТУ 5712-091-00281915-2007	316,8	43,3	14
Итого			8 465

Для обслуживания СВЧ-установки достаточно одного оператора, заработная плата которого составит 25 000 руб. в месяц (средняя по региону). Таким образом можно оценить основные статьи себестоимости изготовления АИ по модернизированной технологии (табл. 5.7).

Для изготовления 135 000 кг АИ в год по действующей технологии потребуются две СВЧ-установки типа УМБ1Э (длительность цикла термообработки по действующей технологии не менее 4 часов) и соответственно два оператора для их обслуживания. Амортизационные отчисления при этом составят:

$$C_{\text{асвч}} = 2\,200\,000 \text{ руб.} / 5 \text{ лет} = 440\,000 \text{ руб./год.}$$

Необходимые сырье и материалы для реализации действующей технологии представлены в таблице 5.8, основные статьи себестоимости изготовления АИ – в таблице 5.9.

5.7. Затраты на производство АИ по модернизированной технологии
на участке бакелизации в год

Основные статьи себестоимости	Затраты, тыс. руб.
Сырье и материалы	8 465
Электроэнергия на бакелизацию	255
Амортизационные отчисления	234
Заработная плата основных производственных рабочих	300
Отчисления от заработной платы	90,6
Накладные расходы (5 % от себестоимости)	491,7
Итого затрат	9836,3

5.8. План обеспечения сырьем цеха по производству АИ на один год
(по действующей технологии)

Наименование	Расход, кг/год	Цена в руб./кг	Стоимость сы- рья, тыс. руб.
Электрокорунд белый 25А F80, ГОСТ28818	117 359	55	6 455
Связка СФП-012А3, ТУ 2257-074-05015227-2002	10 562	120	1 267
Увлажнитель Абразит-031, ТУ 2221-067-26161597-06	5 281	108	570
Гипс ГВВС-16, ТУ 21-РСФСР-153-90	1 760	8,3	15
Итого			8 307

5.9. Затраты на производство АИ по действующей технологии
на участке бакелизации в год

Основные статьи себестоимости	Затраты, тыс. руб.
Сырье и материалы	8 307
Электроэнергия на бакелизацию	309
Амортизационные отчисления	440
Заработная плата основных производственных рабочих	600
Отчисления от заработной платы	181,2
Накладные расходы (5 % от себестоимости)	517,7
Итого затрат	10 354,9

Таким образом, расчет экономической эффективности применения микроволновой технологии изготовления АИ на бакелитовой связке показал, что применение сыпучей радиопрозрачной теплоизоляции, радиопоглощающих наполнителей связки и замена адсорбирующего наполнителя на более эффективный позволит получить экономический эффект в размере 518 600 руб. в год.

5.5. Выводы

1. Для реализации в промышленности разработаны рекомендации по проектированию технологического процесса изготовления АИ на ОТС с применением специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве полуфабрикатов АИ. Спроектировано и изготовлено оборудование для обеспечения теплоизоляции полуфабрикатов АИ в процессе их СВЧ – термообработки. Проект «Шлифовальные круги на бакелитовой связке с наполнителями из углеродсодержащих материалов» удостоен медалей Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа (г. Ульяновск, 2010 г.) и X-ой Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2010» (Всероссийский выставочный центр, г. Москва, 2010 г.).

2. Источниками экономической эффективности использования в промышленности разработанной технологии изготовления АИ на бакелитовой связке являются: сокращение длительности технологического цикла термообработки (до 2 раз) и удельных энергозатрат на термообработку полуфабрикатов ШК (до 20 %), повышение их качества. Совокупный ожидаемый годовой экономический эффект от использования в промышленности результатов исследований, полученных в рамках выполнения диссертации, на участке бакелизации с одной СВЧ - установкой типа УМБ1ЭМ составит около 520 тысяч рублей.

3. Источниками экономической эффективности использования в промышленности предложенных ШК на бакелитовой связке с наполнителями различной природы, полуфабрикаты которых термообработаны в СВЧ - поле с применением сыпучей радиопрозрачной теплоизоляции являются: увеличение периода стойкости;

сокращение числа переточек и правок шлифовальных кругов; интенсификация режима обработки и повышение производительности труда. Технологическая эффективность предложенных ШК подтверждена результатами опытно-промышленных испытаний на ОАО «Автодеталь-Сервис».

Заключение

По результатам исследований, выполненных в рамках настоящей диссертации, можно сделать следующие выводы.

1. Проведен анализ научно-технической литературы, а именно, рассмотрены перспективные пути совершенствования технологии изготовления АИ на ОТС, среди которых выделено направление, включающее применение в процессе термообработки микроволнового нагрева, позволяющего повысить в несколько раз производительность процесса и качество АИ.

2. Выявлены факторы, препятствующие широкому распространению технологии изготовления АИ на ОТС с использованием микроволнового нагрева, а именно тепловые потери с поверхностей полуфабрикатов в процессе термообработки и недостаточные радиопоглощающие свойства полуфабрикатов определенных рецептур.

3. Предложены меры по повышению эффективности операции микроволновой термообработки АИ на бакелитовой связке, а именно применение адсорбирующих наполнителей, способных связать пары воды, радиопоглощающих наполнителей и полуфабрикатов АИ в процессе термообработки с помощью специального сыпучего радиопрозрачного парогазопроницаемого материала.

4. Получены математические зависимости, позволяющие моделировать изменение радиопоглощающих свойств полуфабриката и скорости его нагрева путем модификации радиопоглощающими наполнителями при совмещенном микроволновом нагреве и нагреве в разных СВЧ-камерах. На основе результатов расчетов, выполненных с использованием разработанного соискателем программного обеспечения, определено необходимое для модификации полуфабрикатов АИ количество радиопоглощающего наполнителя в зависимости от рецептуры формовочной смеси и производственных условий.

5. Разработана математическая модель процесса микроволнового нагрева в условиях радиопрозрачной теплоизоляции и соответствующие начальные и граничные условия. Разработана методика численного моделирования с помощью

программного продукта NX 7.5. Выявлено, что при применении в качестве теплоизоляции вермикулита вспученного ВВФ-2, градиент температур снижается до 7 раз по сравнению с нагревом без использования теплоизоляции.

6. Проведена экспериментальная верификация разработанных математических моделей. Расхождение результатов расчетов и экспериментальных значений не превышает 23 %.

7. Разработаны регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать скорость нагрева при определенных режимах микроволновой термообработки, массе загружаемой садки и рецептурах формовочных смесей, а также определять удельную мощность микроволнового излучения, необходимую для обеспечения процесса бакелизации без возникновения дефектов в полуфабрикатах, при минимальных затратах времени.

8. Выявлено влияние рекомендуемых наполнителей на структуру АИ. Введение в формовочную смесь комплексного наполнителя из сульфата магния (1,5 % от массы абразива) и графита (2 % от массы абразива) приводит к незначительному снижению количества пор.

9. Выявлено, что при обработке заготовок из стали Р6М5 размерный износ шлифовального круга больше, чем при обработке заготовок из стали ШХ15 независимо от содержания в нем графита, что объясняется различием групп обрабатываемости данных сталей. Установлено, что при увеличении содержания графита до 4 % коэффициент шлифования уменьшается не более чем на 3,7 % при обработке заготовок из стали Р6М5 и не более чем на 7,5 % при обработке заготовок из стали ШХ15. При увеличении содержания графита до 4 % значение среднего арифметического отклонения профиля шлифованных поверхностей уменьшается не более чем на 23,5 % при обработке заготовок из стали Р6М5, а при обработке заготовок из стали ШХ15 практически не изменяется.

10. Для реализации в промышленности разработаны рекомендации по проектированию технологического процесса изготовления АИ на ОТС с применением специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве полуфабрикатов АИ. Спроектировано и изготовлено

оборудование для обеспечения теплоизоляции полуфабрикатов АИ в процессе их СВЧ – термообработки.

11. Выявлено, что источниками экономической эффективности использования в промышленности разработанной технологии изготовления АИ на бакелитовой связке являются: сокращение длительности технологического цикла термообработки (до 2 раз) и удельных энергозатрат на термообработку полуфабрикатов ШК (до 20 %), повышение их качества. Совокупный ожидаемый годовой экономический эффект от использования в промышленности результатов исследований, полученных в рамках выполнения диссертации, на участке бакелизации с одной СВЧ - установкой типа УМБ1ЭМ составит около 520 тысяч рублей.

12. Проведены опытно-промышленные испытания АИ термообработанного в микроволновом поле в условиях теплоизоляции с наполнителем из графита.

Список литературы

1. Анфиногентов В.И., Гараев Т.К., Морозов Г.А. Моделирование СВЧ нагрева диэлектрика движущимся излучателем - Электронное приборостроение. - Научно-практический сборник. Вып. 1 (29). Казань: КГТУ (КАИ). 2003 г.
2. Архангельский, Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю.С. Архангельский – Саратов : Научная книга, 2011. – 560 с.
3. Архангельский Ю.С., Тригорлов С.В. СВЧ электротермические установки лучевого типа - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 122 с.
4. Бакуль, В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента: Учебное пособие / В.Н. Бакуль, Ю.И. Никитин, Е.Б. Верник, В.Ф. Селех. - М.: Машиностроение, 1975. - 296 с.
5. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учебное пособие для втузов – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
6. Бекасова, В.Н. Влияние срока хранения связки на качество абразивного инструмента / В.Н. Бекасова, В.Д. Сагдеева, Л.С. Корякова, В.Д. Милованова // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник трудов международной научно-технической конференции "Шлифабразив". Волжский: ВолжскИСИ.
7. Берека О.Н., Наumenко А.В. Влияние сильного электрического поля на истечение зерна из камеры обработки // Вестник ВИЭСХ, 2013 г., № 4 (13). – С. 3 – 7.
8. Булыжев Е.М. Планирование экспериментов при исследовании технологических процессов / Е.М. Булыжев, И.Л. Худобин, В.В. Демидов. – Ульяновск: УлПИ, 1983. – 63 с.
9. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с.
10. Валеев, Г.Х. Регрессионное моделирование при обработке данных. –

Казань: ФЭН, 2001. – 296 с.

11. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии. – К.: "Наукова думка", 1987. – 605 с.

12. ГОСТ 12865 Вермикулит вспученный. М.: ИПК Издательство стандартов, 1995. 5 с.

13. ГОСТ Р 52588-2006. Инструмент абразивный. Требования безопасности. Введ. 2008-01-01. М.: Стандартиформ, 2007. 23 с.

14. Григорович М.Б, Блоха Н.Т. Словарь по минеральному сырью – М.:Наука, 1976 – 88 с.

15. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. – М.: Наука, 2003. – 446 с.

16. Кабанов В.А. Энциклопедия полимеров – Т. 3. – М.: Советская энциклопедия, 1977 г. – 1152 с.

17. Кноп, А. В. Фенольные смолы и материалы на их основе / А. Кноп, В. Шейб. – М. : Химия, 1983 г. – 280 с.

18. Ковальчук, Ю.М. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента: Учебное пособие / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глаговский и др.; под общ ред. Ю.М. Ковальчука. М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.

19. Ковальчук, Ю.М. Производство абразивного и алмазного инструмента в Российской Федерации [Электронный ресурс] / Ю.М. Ковальчук // Проинструмент – 2003. – № 22. Режим доступа:

http://www.instrument.su/zurnals/22/zurnal_22Theme.shtml

20. Комарова, Т.В. Получение углеродных материалов: учеб. пособие/ РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М.: РХТУ, 2001. – 95 с.

21. Копусов В.Н., Швыркин Н.В. К вопросу создания многомагнетронного микроволнового оборудования для современных технологий - Материалы междунар. Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». - Севастополь: Вебер, 2001, с. 652-653.

22. Коржавчиков М.А. Численное моделирование диэлектрических свойств

увлажненных дисперсных систем // Вестник РГРТУ, 2008, № 3, вып. 25. – С.59 – 65.

23. Краткая химическая энциклопедия. – Т. 4. – М.: Советская энциклопедия, 1965 г. – 1182 с.

24. Кремень, З.И. Специализированные абразивные инструменты / З.И. Кремень, М.А. Зайцева, С.М. Федотова // Учебное пособие для слушателей заочных курсов повышение квалификации ИТР по проектированию и производству режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1986. - 40 с.

25. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов: учебник для хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.

26. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. – М.: Физматгиз, 1962 – 248 с.

27. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник), 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с., ил.

28. Михайлин С.М. Влияние СВЧ-термообработки на структуру шлифовальных кругов на бакелитовой связке / С. М. Михайлин, Н. И. Веткасов, С. В. Жданов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. статей межд. научно-техн. конф. – Волгоград, Волжский: Волжский ин-т строит. и технологий, 2006. – С. 9 – 12.

29. Михайлин С.М. Математическое моделирование процесса сверхвысокочастотной термообработки абразивных инструментов на органических связках / С. М. Михайлин, А. Ш. Хусаинов // СТИН. – 2008. – № 1. – С. 14 – 20.

30. Михайлин С.М. Моделирование распределения тепловой мощности сверхвысокочастотного излучения в камере поликонденсации композитных материалов / С. М. Михайлин // Вестник УлГТУ. – 2009, – №1.

31. Михайлин С.М. Подготовка формовочной смеси и полуфабрикатов абразивных изделий для сверхвысокочастотной бакелизации / С. М. Михайлин, С. В. Жданов // Технология машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 28 – 31.

32. Михайлин, С.М. Проектирование и исследование композиционных шлифовальных кругов, технологии их изготовления и применения при круглом наружном шлифовании. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Ульянов. политех. институт. - Ульяновск, 2002. – 230 с.

33. Михайлин С.М. Работоспособность шлифовальных кругов на бакелитовой связке, изготовленных по СВЧ-технологии / С. М. Михайлин, Н. И. Веткасов, С. В. Жданов // Вестник УлГТУ. – 2005. – № 2. – С. 33 – 35.

34. Михайлин С.М. Работоспособность шлифовальных кругов на органических термореактивных связках, изготовленных с использованием СВЧ-энергетики / С. М. Михайлин, С. В. Жданов // Вестник УлГТУ. – 2006 – № 1. – С. 39 – 42.

35. Михайлин С.М. Сверхвысокочастотные технологии в производстве абразивных инструментов на бакелитовой связке /С. М. Михайлин, А. И. Капустин, С. В. Жданов // Вестник машиностроения. – 2008. – № 10. – С. 58 – 61.

36. Михайлин С.М. Формирование партии полуфабрикатов абразивных инструментов для сверхвысокочастотной бакелизации / С. М. Михайлин, С. В. Жданов // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 10. – С. 13 – 16.

37. Михайлин С.М. Экономическая эффективность применения СВЧ-термообработки при производстве абразивных инструментов на бакелитовой связке / С. М. Михайлин // Вестник УлГТУ. – 2006. – № 1. – С. 46 – 48.

38. Михайлин С.М. Энергоемкость термообработки шлифовальных кругов на бакелитовой связке СВЧ-излучением / С. М. Михайлин, Н. И. Веткасов, С. В. Жданов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. статей межд. научно-техн. конф. – Волгоград, Волжский: Волжский институт строительства и технологий, 2005. – С. 98 – 101.

39. Морозова, А.Г. Влияние химически активных наполнителей на процесс формирования и эксплуатации абразивного инструмента / А.Г. Морозова // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник трудов международной научно-технической конференции "Шлифабразив – 99". - Волжский: ВолжскИСИ, 1999. - С. 121 – 123.

40. Морозов Г.А., Потапова О.В., Седельников Ю.Е. Использование метода сфокусированной апертуры для СВЧ- технологических установок - Рефераты докладов VI международной крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, 1996. с. 25.

41. Нечаев, Л. В. Исследование процесса одновременного формообразования и термообработки ТВЧ абразивных сегментов типа 5С на бакелитовой связке / Л. В. Нечаев, В. В. Райт // Отчет о НИР. Челябинск: УралВНИИАШ, 1984. - С. 91.

42. Никитин А.В. Метод производства терморезактивных полимерных композитов [Электронный ресурс] / А.В. Никитин // Научно-техническая библиотека SciTecLibrary. – 2010. Режим доступа:

<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/10408.html>

43. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. Часть II. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1999. – 474 с.

44. Окресс, Э. СВЧ-энергетика / Э. Окресс – М.: Мир, 1971. – Т.2. – 272 с.

45. Орлов, И. Ю. Методика оценки технологических показателей формовочных смесей на основе бакелита /И. Ю. Орлов, В. М. Шумячер, // Всероссийское совещание заведующих кафедрами материаловедения и технологии конструкционных материалов «Материаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки»: Сборник статей. – Волжский: ВИСТех (филиал) ВолГАСУ, 2007. - С. 48 – 52.

46. Орлов И.Ю. Методика расчета удельного количества летучих веществ при термообработке абразивного бакелитового инструмента / И.Ю. Орлов, Т.Н. Орлова // Материаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки: Сборник статей Всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии конструкционных материалов. – Волжский: ВолГАСУ, 2007. – С. 52 – 55.

47. Орлова, Т. Н. Исследования влияния двухстадийного смешивания компонентов формовочной смеси на технологичность смеси (получение

свободно-текучих формовочных смесей) и физико-механические свойства абразивного инструмента на бакелитовой связке / Т. Н. Орлова, // Международная НТК «Шлифабразив – 2004»: Сборник трудов конференции. – Волжский: ВолжскИСИ, 2004. - С. 91 – 94.

48. Панова, Л.Г. Способы, технологии и оборудование переработки полимерных композиционных материалов методами прессования и литья под давлением: учеб. пособие/Л.Г.Панова, С.Г.Кононенко, Т.П.Устинова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. - 120 с.

49. Патент РФ № 2136481. Масса для изготовления абразивного инструмента. / А.Н. Порада, Л.А. Волович, О.Л. Кисельгоф, И.П. Козыряцкий, 1999 г.

50. Патент РФ № 2294825. Способ изготовления абразивного инструмента на бакелитовой связке / Михайлин С.М., Веткасов Н.И., Трефилов Н.А., Капустин А.И., Жданов С.В., В24D 18/00, опубл. 10.03.2007 г., бюл. № 7.

51. Патент РФ № 2349688. Способ термообработки полуфабрикатов абразивных инструментов на органических термореактивных связках / Михайлин С.М., Худобин Л.В., Веткасов Н.И., Капустин А.И., Жданов С.В., Трефилов Н.А. С30В 33/02, опубл. 20.03.2009 г., бюл. № 8.

52. Патент РФ № 2351696. Способ термообработки полуфабрикатов абразивных инструментов на органических термореактивных связках / Михайлин С.М., Худобин Л.В., Веткасов Н.И., Капустин А.И., Жданов С.В., Трефилов Н.А. С30В 33/02, опубл. 10.04.2009 г., бюл. № 10.

53. Патент РФ № 2467100. Способ термообработки полуфабрикатов абразивных инструментов на органических термореактивных связках / Веткасов Н.И., Худобин Л.В., Поляков С.В., Михайлин С.М., Жданов С.В., С30В 33/02, опубл. 20.11.2012 г., бюл. № 32.

54. Патент РФ № 2545939. Способ СВЧ-термообработки полуфабрикатов из композиционных материалов на органических термореактивных связках / Капустин А.И., Худобин Л.В., Сапунов В.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М., Капустин А.А., В24D 18/00, опубл. 10.04.2015 г., бюл. № 10.

55. Патент США № 3664819. Абразивный инструмент с металлическим

покрытием алмаза или кубического нитрида бора и смолой, содержащей неорганический наполнитель и кристаллический графит, кл. 51-295, 1974 г.

56. Патент США № US4150514. Способ формования связанных тугоплавких частиц / А, Томас Дугласс, В24D18/00, опубл. 24 апр 1979, № заявки US 05/846,379.

57. Патент США № US4404003. Способ микроволнового нагрева шлифовальных кругов / А, Денис Харрис, В24D3/32, опубл. 13 сентября 1983, № заявки US 06/312,061.

58. Патент США № WO1996030164 А1. Диэлектрическое отверждение / Николя Аврил, Гво Шин Свай, Джони Виджая, В24D3/28, опубл. 3 окт 1996, № заявки PCT/US1996/002904.

59. Поляков, С.А. Электроактивация жидкостекольного связующего. Керамические диафрагмы, фильтры, электроактиваторы воды и водных растворов / С.А. Поляков // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник трудов международной научно-технической конференции "Шлифабразив – 97". Волжский: ВолжскИСИ, 1997. - С. 61 – 63.

60. Райт, В.В. Разработка шлифовальных кругов на бакелитовой связке для врезного профильного шлифования / В.В. Райт, Г.Н. Саламатина, Т.А. Осинцева // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении: Тезисы докладов конференции "Оптимшлифабразив – 88". Л.: ВНИИТЭМР, 1988. - С. 131 – 133.

61. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов: методические указания. – М.: Изд. стандартов, 1978. – 64 с.

62. Резник, С.В. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве [Электронный ресурс] / С.В. Резник, С.А. Румянцев // Научное издание МГТУ им. Баумана «Наука и образование» - электронный научно-технический журнал, 2014. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/658448.html>.

63. Сапунов В.В., Веткасов Н.И., Худобин Л.В. Математическое

моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов абразивного инструмента // Теплофизические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства : труды IV междунар. научно-техн. конференции. - Тольятти : ТГУ, 2015. - Ч.1. - С.92 - 97

64. Серга, Г. В. Новые технологии измельчения, разделения и смешивания в производстве абразивных материалов / Г. В. Серга, Н. Н. Довжикова, Ф. Ф. Кремьянский // Международная НТК «Шлифабразив – 2002»: Сборник трудов конференции. – Волжский: ВолжскИСИ, 2002. - С. 42 – 45.

65. Скородумова, О.Б. Золь-гель процесс и повышение режущей способности абразивного инструмента / О.Б. Скородумова, Г.Д. Семченко, Н.Ю. Кобец // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник трудов международной научно-технической конференции "Шлифабразив – 98". Волжский: ВолжскИСИ, 1998. - С. 170 – 171.

66. Степанова В. В. Применение многоэлементного возбуждения для повышения равномерности распределения СВЧ энергии в частично заполненных СВЧ камерах - Материалы 10-й междунар. Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». - Севастополь: Вебер, 2000, с. 589-590.

67. Сушко М.Я., Криськив С.К. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем // Журнал технической физики, 2009, том 79, вып. 3. – С.97 – 101.

68. Ткачев, А.Г. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур : монография / А.Г. Ткачев, И.В. Золотухин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 316 с.

69. Ткачев А.Г., Мищенко СВ., Коновалов В.И. II Российские нанотехнологии. - 2007. - Т 2. - № 7-8. - С. 100-108.

70. Урывский Ф. П. Выбор оптимального состава смазочно-охлаждающих элементов в композиционных кругах / Ф. П. Урывский, В. А. Михайлов, В.Н. Трусов // Оптимизация процессов резания жаро- и особопроочных материалов: межвуз. науч. сб. – УФА: Уфим. авиац. ин-т. –1981. – Вып. 6. – С. 45 – 48.

71. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Комплексная диэлектрическая

проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок // Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 1. – С.106 – 110.

72. Физические величины : справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

73. Хиппель, А.Р. Диэлектрики и волны / А.Р. Хиппель – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 439 с.

74. Худобин Л.В. Контактные температуры и силы шлифования кругами, термообработанными по микроволновой технологии / Л. В. Худобин, С. М. Михайлин, А.Н. Унянин, Н. И. Веткасов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 4. С. 81-86.

75. Худобин, Л.В. Курсовые и дипломные проекты с развитой научно-исследовательской частью: учебное пособие / Л.В. Худобин, В.Ф. Гурьянихин, В.Р. Берзин. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 84 с.

76. Худобин Л.В. Работоспособность шлифовальных кругов, содержащих регенерированное абразивное зерно и бакелизованных в СВЧ-поле / Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов, С. М. Михайлин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2012. № 4. С. 31-35.

77. Худобин, Л.В. Сверхвысокочастотная энергетика в производстве абразивных инструментов и их работоспособность / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, С.М. Михайлин – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 307 с.

78. Худобин Л.В. Сверхвысокочастотная энергетика в производстве абразивных инструментов на бакелитовой связке / Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов, С. М. Михайлин // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 11 (29). С. 34-41.

79. Худобин Л. В. Структура и твердость шлифовальных кругов на бакелитовой связке, термообработанных по сверхвысокочастотной технологии / Л. В. Худобин, С. М. Михайлин, Н. И. Веткасов // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 11. – С. 16 – 21.

80. Худобин Л. В. Теплосиловая напряженность плоского торцового шлифования композиционными кругами различных характеристик / Л. В. Худобин, С. М. Михайлин, А. Н. Унянин // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: материалы международной научно-техн. конф. Т. 1. – Ростов-на-Дону: Донской ГТУ, 2008. – С. 69 – 74.

81. Худобин Л. В. Технологическая эффективность шлифования кругами, изготовленными по СВЧ-технологии / Л. В. Худобин, С. М. Михайлин, Н. И. Веткасов // Физические и компьютерные технологии: труды 13-й межд. научно-техн. конф. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007 – С. 73 – 75.

82. Худобин, Л.В. Шлифование композиционными кругами / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов – Ульяновск : УлГТУ, 2004 – 256 с.

83. Чалых А. Е. Диффузия в полимерных системах. – М.: Химия, 1987. – 312 с.

84. Шарабаев, А. В. Способ и устройство дозирования и укладки формовочной массы / А. В. Шарабаев, М. А. Шарабаев // Международная НТК «Шлифабразив – 1999»: Сборник трудов конференции. – Волжский: ВолжскИСИ, 1999. С. 54 – 57.

85. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: справочник. – М.: НПО «ИТЭИ», 1992. – 185 с.

86. Экономика машиностроительного производства: учебное пособие / В. А. Зайцев; под ред. О. Н. Герасиной. – М.: МГИУ, 2007. – 127 с.

87. Эфрос, М.Г. Современные абразивные инструменты / М.Г. Эфрос, В.С. Миронюк; под ред. З.И. Кремня. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1987. – 158 с.

88. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.

89. Якимов А. В. Технология машиностроения / А. В. Якимов, В. Н. Царюк, А. А. Якимов и др.; под общ. ред. А. В. Якимова. – Одесса: Астропринт, 2001. – 608 с.

90. Font, J.; Muntasell, J.; Cesari E., Mater. Res. Bull. 1999, 24, 157-165.

91. Fullerenes. Chemistry, Physics, and Technology / Ed. K.M. Kadish, R.S. Ruoff. N. Y., 2000.
92. Harris P. J. F. // Carbon Nanotubes and Related Structures: New Materials for the 21st Century. N. Y., 1999.
93. Mangiacapra, P.; Gorrasi, G.; Sorrentino, A., Carbohydr. Polymers 2006, 64, 516-523.
94. Nightingale C., Day R.J. Flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fibre/epoxy composites cured thermally and with microwave radiation // Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing. 2002. Vol. 33. P. 1021-1030.
95. Patterson M. C. Outil d' usinage en ceramigue hautes perfomences produkt par frittage microondes / M. C. Patterson, R.M. Kimbler, P.S/ Apte, R. Roy // Ind. Ceram. – 1992. – № 1. – S. 47.
96. Radkovskaya A.A. Experimental study of a bi-periodic magnetoinductive waveguide: comparison with theory/ A.A. Radkovskaya, O. Sydoruk, M. Shamonin and others // IET Microwaves, Antennas and Propad. – 2007. – № 1. – P. 80 – 83.
97. Rybakov K.I. Microwave heating of conductive powder materials / K.I. Rybakov, V. E Semenov, S. V. Egorov and others // J. Appl. Phys. – 2006. – P. 023506/1 – 023506/9.
98. Schabel M. Mikrowellwnbessrahlung feuerfester Steine / M Schabel, S. Hansel // Keram. Z. – 1991. – 43. – № 8. – P. 547 – 552.
99. Sorrentino, A.; Gorrasi, G.; Tortora, M.; Vittoria, V., Polymer 2005, 46, 1601-1608.
100. Tcherdyntsev, V.V.; Kaloshkin S.D.; Shelekhov E.V.; Salimon A.I.; Sartori S.; Principi G., “// Intermetallics 2005, 13, 841–847.
101. Xiang Ch., Pan Y., Liu X. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. N 12. P. 123 103-1–123 103-3

Приложения

Результаты расчета в программе "NIELSEN" (наполнитель: 2 % графита)

Введите исходные данные:

Действительная часть диэлектрической проницаемости наполнителя:	34,3
Мнимая часть диэлектрической проницаемости наполнителя:	-13,4
Действительная часть диэлектрической проницаемости матрицы:	6,62
Мнимая часть диэлектрической проницаемости матрицы:	-0,055
Коэффициент, позволяющий учитывать форму включений:	4
Объемная доля наполнителя:	0,024
Максимально возможная объемная доля наполнителя, характеризующая укладку и форму частиц:	0,7

Результаты расчета:

Комплексная диэлектрическая проницаемость композита	7,00634265815253-0,149486812156525i
---	-------------------------------------

Результаты расчета в программе "RPT1"

Введите исходные данные:

Дейст. часть диэлектрической проницаемости наполнителя, $\varepsilon(n)$:	34,3
Мнимая часть диэлектрической проницаемости наполнителя, $\varepsilon(n)$:	-13,4
Дейст. часть диэлектрической проницаемости матрицы, $\varepsilon(m)$:	6,62
Высота полуфатриката, м	0,05
Мнимая часть диэлектрической проницаемости матрицы, $\varepsilon(m)$:	-0,055
Плотность матрицы	2727,5
Коэффициент, позволяющий учитывать форму включений, A :	4
Плотность композита	2713,9
Объемная доля наполнителя, ν :	0,024
Теплоемкость матрицы	880,4
Максимально возможная объемная доля наполнителя, характеризующая укладку и форму частиц, PF :	0,7
Теплоемкость композита	876,9
Частота электромагнитного поля f , Гц	2450000000

Результаты расчета:

Комплексная диэлектрическая проницаемость композита, $\varepsilon(k)$:	7,00634265815253-0,149486812156525i
Тангенс угла диэлектрических потерь композита $\operatorname{tg}\delta$	0,021335927
Постоянная затухания композита k	2,900110572
Постоянная затухания матрицы k	1,097718687
Отношение скорости нагрева композита к скорости нагрева матрицы	2,697239607

Результаты расчета в программе "RPT2"

Введите исходные данные:

Дейст. часть диэлектрической проницаемости наполнителя, $\varepsilon(H)$:	34,3
Дейст. часть диэлектрической проницаемости эталона, $\varepsilon(\varepsilon)$:	7
Мнимая часть диэлектрической проницаемости наполнителя, $\varepsilon(H)$:	-13,4
Мнимая часть диэлектрической проницаемости эталона, $\varepsilon(\varepsilon)$:	0,15
Дейст. часть диэлектрической проницаемости матрицы, $\varepsilon(M)$:	6,62
Высота полуфатриката, м	0,05
Мнимая часть диэлектрической проницаемости матрицы, $\varepsilon(M)$:	-0,055
Плотность эталона	2727,5
Коэффициент, позволяющий учитывать форму включений, A :	4
Плотность композита	2713,9
Объемная доля наполнителя, ν :	0,024
Теплоемкость эталона	880,4
Максимально возможная объемная доля наполнителя, характеризующая укладку и форму частиц, PF :	0,7
Теплоемкость композита	876,9
Частота электромагнитного поля f , Гц	2450000000

Результаты расчета:

Комплексная диэлектрическая проницаемость композита, $\varepsilon(K)$:	7,00634265815253-0,149486812156525i
Тангенс угла диэлектрических потерь композита $\operatorname{tg}\delta$	0,021335927
Постоянная затухания композита k	2,900110572
Постоянная затухания эталона k	2,911384743
Отношение скорости нагрева композита к скорости нагрева эталона	1,005676171

Результаты расчета в программе "RPT3"

Введите исходные данные:

Дейст. часть диэлектрической проницаемости наполнителя, $\varepsilon(n)$:	34,3
Мнимая часть диэлектрической проницаемости наполнителя, $\varepsilon(n)$:	-13,4
Дейст. часть диэлектрической проницаемости матрицы, $\varepsilon(m)$:	6,62
Высота полуфатриката, м	0,2
Мнимая часть диэлектрической проницаемости матрицы, $\varepsilon(m)$:	-0,055
Плотность матрицы	2727,5
Коэффициент, позволяющий учитывать форму включений, A :	4
Плотность композита	2713,9
Объемная доля наполнителя, ν :	0,024
Теплоемкость матрицы	880,4
Максимально возможная объемная доля наполнителя, характеризующая укладку и форму частиц, PF :	0,7
Теплоемкость композита	876,9
Частота электромагнитного поля f , Гц	2450000000

Результаты расчета:

Комплексная диэлектрическая проницаемость композита, $\varepsilon(k)$:	7,00634265815253-0,149486812156525i
Тангенс угла диэлектрических потерь композита $\operatorname{tg}\delta$	0,021335927
Постоянная затухания композита k	2,900110572
Постоянная затухания матрицы k	1,097718687
Отношение скорости нагрева композита к скорости нагрева матрицы	0,737992294

Результаты обработки экспериментальных данных в программе «Эксперимент 2в3»

Журнал планирования эксперимента																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									</
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

Журнал планирования эксперимента																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Результаты обработки экспериментальных данных в программе «Эксперимент 2в3»
(коэффициент шлифования $K_{\text{ш}}$)

Журнал планирования эксперимента																			
			X ₁	X ₂	X ₃														
Контролируемые переменные			Сгр	Свр	Vст				У			обрабатываемый материал ШХ15							
Верхний уровень			4	0,05	15														
Нижний уровень			0	0,03	5														
Основной уровень			2	0,04	10														
Интервал варьирования			2	0,01	5				Кш										
Матрица планирования 2 ³ в кодowych обозначениях переменных																			
№	Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса								Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения				Результаты расчета для проверки адекватности модели			
	m ₁	m ₂	m ₃	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃								
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,79	1,86	1,81	1,820	0,00130	1,804	0,00026	
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,66	1,7	1,71	1,690	0,00070	1,687	0,00001	
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1,58	1,6	1,62	1,600	0,00040	1,604	0,00001	
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1,5	1,55	1,54	1,530	0,00070	1,545	0,00024	
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1,59	1,64	1,65	1,627	0,00103	1,642	0,00024	
6	1	6	8	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1,57	1,58	1,59	1,580	0,00010	1,584	0,00001	
7	5	2	4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1,47	1,53	1,51	1,503	0,00093	1,500	0,00001	
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1,42	1,43	1,35	1,400	0,00190	1,384	0,00026	
Коэффициенты b _i				1,5938	-0,0438	-0,0854	-0,0663	0,0004	0,0063	0,0096	-0,0146	Проверка однородности дисперсий				Проверка адекватности модели			
S ² (y)	9E-04	S ² (b _i)	4E-05	0,000037	0,000037	0,000037	0,000037	0,000037	0,000037	0,000037	0,000037	ΣS ₀ ²		0,0071		Σ(Y _{ср} -Y _{оп}) ²		0,001	
q, %	5	S(b _i)	0,01	0,006067	0,006067	0,006067	0,006067	0,006067	0,006067	0,006067	0,006067	S ² _{оmax}		0,0019		S _{ад} ²		0,001	
V _{зн}	16	t _i	-	262,702	7,21143	14,0795	10,9202	0,06868	1,0302	1,57965	2,40381	G		0,2689		F		1,1871	
t _{кр}	2,119	t _i -t _{кр}	-	260,583	5,09243	11,9605	8,80116	-2,05032	-1,0888	-0,53935	0,28481	q, %		5		q _{ад} , %		5	
Вывод			значим	значим	значим	значим	нет	нет	нет	нет	значим	V1b		2		V _{1ад}		3	
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)												V2b		8		V _{2ад}		16	
Y=1,59-0,04X1-0,09X2-0,07X3-0,01X1X2X3												Gкр		0,5157		F _{кр}		3,24	
Y=2,32-0,09Cгр-13,42Cсвр-0,03Vст-0,15CгрCсврVст												G-Gкр		-0,246832075		F-F _{кр}		-2,05	
Коэффициенты влияния (H)				-0,04365	-1341,67	-0,00677	Вывод		Однородны		Вывод		адекватна						

Журнал планирования эксперимента											
											Устройство
Контролируемые переменные				X ₁	X ₂	X ₃					
Верхний уровень				C _р	S _р	V _{ст}					
Нижний уровень				0	0,03	5					
Основной уровень				2	0,04	10					
Интервал варьирования				2	0,01	5					
Матрица планирования 2 ³ в кодовых обозначениях переменных											
№	Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса						Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения	
	m ₁	m ₂	m ₃	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	6	8	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	5	2	4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1
Коэффициенты b _i				1,2267	-0,0142	-0,0733	-0,0517	-0,0042	-0,0042	0,0083	0,0025
Проверка значимости коэффициентов											
S ² (y)	0,007	S ² (b _i)	0,0003	0,000301	0,000301	0,000301	0,000301	0,000301	0,000301	0,000301	0,000301
q, %	5	S(b _i)	0,02	0,017346	0,017346	0,017346	0,017346	0,017346	0,017346	0,017346	0,017346
V _{зн}	16	t _i	-	70,7194	0,81673	4,22779	2,97867	0,24022	0,24022	0,48043	0,14413
t _{кр}	2,119	t-t _{кр}	-	68,6004	-1,30227	2,10879	0,85967	-1,87878	-1,87878	-1,63857	-1,97487
Вывод				значим	нет	значим	значим	нет	нет	нет	нет
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)											
Y=1,23-0,07X ₂ -0,05X ₃											
Y=1,66-8,08S _{вр} -0,01V _{ст}											
Коэффициенты влияния (H)											
				0,00771	-808,333	-0,00283					
Проверка однородности дисперсий				ΣS ₀ ²	0,0578	Σ(Y _{ср} -Y _{оп}) ²	0,0025	Σ(Y _{ср} -Y _{оп}) ²	0,0025	Σ(Y _{ср} -Y _{оп}) ²	0,0025
				S ² _{омакс}	0,0114	S ² _{ад}	0,0015	S ² _{ад}	0,0015	S ² _{ад}	0,0015
				G	0,1979	F	0,2068	F	0,2068	F	0,2068
				q, %	5	q _{ад} , %	5	q _{ад} , %	5	q _{ад} , %	5
				V1b	2	V1ад	5	V1ад	5	V1ад	5
				V2b	8	V2ад	16	V2ад	16	V2ад	16
				Gкр	0,5157	F _{кр}	2,85	F _{кр}	2,85	F _{кр}	2,85
				G-Gкр	-0,317777323	F-F _{кр}	-2,65	F-F _{кр}	-2,65	F-F _{кр}	-2,65
Вывод				Вывод	Однородны	Вывод	адекватна	Вывод	адекватна	Вывод	адекватна

Результаты обработки экспериментальных данных в программе «Эксперимент 2в3»
(параметр шероховатости Ra)

Журнал планирования эксперимента																			Устройство		
Контролируемые переменные						X ₁	X ₂	X ₃				У			обрабатываемый материал ШХ15						
						Стр	Свр	V _{ст}													
Верхний уровень						4	0,05	15													
Нижний уровень						0	0,03	5													
Основной уровень						2	0,04	10													
Интервал варьирования						2	0,01	5						Ra							
Матрица планирования 2 ³ в кодowych обозначениях переменных														Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения						Результаты расчета для проверки адекватности модели	
№	Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса								Y _{оп}						(Y _{ср} -Y _{оп}) ²			
	m ₁	m ₂	m ₃	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃										
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,183	0,211	0,199	0,198	0,00020	0,200	0,00000			
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,198	0,196	0,212	0,202	0,00008	0,200	0,00000			
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,251	0,211	0,239	0,234	0,00042	0,231	0,00001			
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,221	0,237	0,225	0,228	0,00007	0,231	0,00001			
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,221	0,256	0,218	0,232	0,00045	0,235	0,00001			
6	1	6	8	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	0,232	0,241	0,243	0,239	0,00003	0,235	0,00001			
7	5	2	4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,335	0,317	0,322	0,325	0,00009	0,325	0,00000			
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1	0,315	0,33	0,332	0,326	0,00009	0,325	0,00000			
Коэффициенты b _i				0,2477	0,0008	0,0302	0,0325	-0,002	0,0012	0,0148	0,0005	Проверка однородности дисперсий			Проверка адекватности модели						
Проверка значимости коэффициентов																					
S ² (y)	2E-04	S ² (b _i)	7E-06	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	ΣS ₀ ²	0,0014	Σ(Y _{ср} -Y _{оп}) ²			5E-05				
q, %	5	S(b _i)	0	0,002717	0,002717	0,002717	0,002717	0,002717	0,002717	0,002717	0,002717	S ² _{оmax}	0,0004	S ² _{ад}			4E-05				
V _{зн}	16	t _i	-	91,1707	0,29138	11,1184	11,9465	0,75145	0,44474	5,44417	0,19936	G	0,3149	F			0,2218				
t _{кр}	2,119	t _i -t _{кр}	-	89,0517	-1,82762	8,99938	9,8275	-1,36755	-1,67426	3,32517	-1,91964	q, %	5	q _{ад} , %			5				
Вывод				значим	нет	значим	значим	нет	нет	значим	нет	V1b	2	V _{1ад}			4				
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)																					
Y=0,25+0,03X2+0,03X3+0,01X2X3																					
Y=0,169+0,38Sсвр-0,005Vст+0,29SсврVст																					
Коэффициенты влияния (H)																					
				0,00272	37,5	-0,00103						Вывод	Однородны	F- _F _{кр}			3,01				
												Вывод	Однородны	F- _F _{кр}			-2,79	адекватна			

Журнал планирования эксперимента															Устройство							
Контролируемые переменные															обрабатываемый материал Р6М5							
Верхний уровень															у							
Нижний уровень																						
Основной уровень																						
Интервал варьирования															Ra							
Матрица планирования 2 ³ в кодовых обозначениях переменных															Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения				Результаты расчета для проверки адекватности модели			
№	Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса									Y _{оп}	S ₀ ²	Y _{ср}	Y ₃	Y ₂	Y ₁				
	m ₁	m ₂	m ₃	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃											
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,151	0,148	0,142	0,147	0,00002	0,142	0,00003				
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,108	0,134	0,115	0,119	0,00018	0,124	0,00003				
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,174	0,168	0,145	0,162	0,00023	0,160	0,00000				
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,156	0,135	0,132	0,141	0,00017	0,143	0,00000				
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,145	0,172	0,151	0,156	0,00020	0,155	0,00000				
6	1	6	8	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,134	0,124	0,15	0,136	0,00017	0,137	0,00000				
7	5	2	4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,201	0,209	0,181	0,197	0,00021	0,205	0,00007				
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1	0,212	0,183	0,194	0,196	0,00021	0,188	0,00007				
Коэффициенты b _i				0,1568	-0,0088	0,0173	0,0145	0,0033	0,0036	0,008	0,0016	Проверка однородности дисперсий				Проверка адекватности модели						
Проверка значимости коэффициентов																						
S ² (y)	2E-04	S ² (b _i)	7E-06	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	0,000007	ΣS ₀ ²	0,0014	Σ(Y _{ср} -Y _{он}) ²	0,0002							
q, %	5	S(b _i)	0	0,002703	0,002703	0,002703	0,002703	0,002703	0,002703	0,002703	0,002703	S ² _{0max}	0,0002	S _{ад} ²	0,0002							
V _{зн}	16	t _i	-	58,0245	3,23729	6,41291	5,36465	1,20242	1,32575	2,95981	0,5858	G	0,1671	F	1,1822							
t _{кр}	2,119	t _i -t _{кр}	-	55,9055	1,11829	4,29391	3,24565	-0,91658	-0,79325	0,84081	-1,5332	q, %	5	q _{ад} , %	5							
Вывод				значим	значим	значим	значим	нет	нет	значим	нет	V1b	2	V _{1ад}	3							
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)												V2b	8	V _{2ад}	16							
Y=0,16-0,01X1+0,02X2+0,01X3+0,01X2X3												Gкр	0,5157	F _{кр}	3,24							
Y=0,14-0,01Cгр+0,13Cвр-0,003Vст+0,13CврVст												G-Gкр	-0,348637262	F-F _{кр}	-2,06							
Коэффициенты влияния (H)				-0,00406	12,5	-0,00059						Вывод	Однородны	Вывод	адекватна							

Результаты обработки экспериментальных данных в программе «Эксперимент 2в3»
(радиальная R_y и касательная R_z составляющие силы и контактная температура T_k)

Журнал планирования эксперимента																				Устройство					
Контролируемые переменные				X_1	X_2	X_3							У		обрабатываемый материал ШХ15										
Верхний уровень				$C_{гр}$	$S_{ар}$	$V_{ст}$																			
Нижний уровень				4	0,05	15																			
Основной уровень				0	0,03	5																			
Интервал варьирования				2	0,04	10							Рy												
				2	0,01	5																			
Матрица планирования 2^3 в кодových обозначениях переменных														Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения										Результаты расчета для проверки адекватности модели	
№		Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса							Проверка однородности дисперсий										Проверка адекватности модели			
		m_1	m_2	m_3	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3													$X_1X_2X_3$	
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	18	20	18	18,667	1,33333	S_0^2	$Y_{оп}$	$(Y_{оп}-Y_{он})^2$						
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	11	11	15	12,333	5,33333	$S_{ад}^2$	11,167	1,36111						
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	22	23	24	23,000	1,00000	F	24,000	1,00000						
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	14	17	18	16,333	4,33333	$q_{ад}, \%$	16,417	0,00694						
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	25	27	29	27,000	4,00000	$V_{1ад}$	27,000	-						
6	1	6	8	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	17	18	20	18,333	2,33333	$V_{2ад}$	19,417	1,17361						
7	5	2	4	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	34	32	34	33,333	1,33333	$V_{3ад}$	32,250	1,17361						
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1	24	23	27	24,667	4,33333	$F_{кр}$	24,667	0,00000						
Коэффициенты b_i				21,708	-3,7917	2,625	4,125	-0,0417	-0,5417	0,5417	0,0417	Проверка адекватности модели													
Проверка значимости коэффициентов																									
$S^2(y)$	3	$S^2(b_i)$	0,125	0,125000	0,125000	0,125000	0,125000	0,125000	0,125000	0,125000	0,125000	ΣS_0^2	24,0000		$\Sigma(Y_{оп}-Y_{он})^2$		4,7222								
q, %	5	$S(b_i)$	0,35	0,353553	0,353553	0,353553	0,353553	0,353553	0,353553	0,353553	0,353553	$S^2_{оmax}$	5,3333		$S_{ад}^2$		3,5417								
$V_{зн}$	16	t_i	-	61,4004	10,7245	7,42462	11,6673	0,11785	1,53206	1,53206	0,11785	G	0,2222		F		1,1806								
$t_{кр}$	2,119	$t_i-t_{кр}$	-	59,2814	8,60545	5,30562	9,54826	-2,00115	-0,58694	-0,58694	-2,00115	q, %	5		$q_{ад}, \%$		5								
Вывод				значим	значим	значим	значим	нет	нет	нет	нет	V1b	2		$V_{1ад}$		4								
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)														V2b		8		16							
Y=21,71-3,79X1+2,63X2+4,13X3														Gкр		0,5157		3,01							
Y=9,50-1,10Cгр+166,67Sар+0,53Vст														G-Gкр		-0,293477778		-1,83							
Коэффициенты влияния (H)				-0,55208	16666,7	0,10667	Вывод		Однородны		Вывод		адекватна												

Журнал планирования эксперимента																			Устройство					
Контролируемые переменные				X ₁	X ₂	X ₃	У										обрабатываемый материал ШХ15							
Верхний уровень				Сгр	Свр	Vст																		
Нижний уровень				4	0,05	15																		
Основной уровень				0	0,03	5																		
Интервал варьирования				2	0,04	10											Pz							
				2	0,01	5																		
Матрица планирования 2 ³ в кодových обозначениях переменных																	Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения				Результаты расчета для проверки адекватности модели			
№		Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса																			
		m ₁	m ₂	m ₃	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{ср}	S ₀ ²	Y _{оп}	(Y _{ср} -Y _{оп}) ²					
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	11	14	14	13,00	3,00	12,92	0,007						
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	7	9	8	8,00	1,00	7,67	0,111						
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	12	17	16	15,00	7,00	15,50	0,250						
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	10	10	11	10,33	0,33	10,25	0,007						
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	18	15	18	17,00	3,00	16,83	0,028						
6	1	6	8	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	10	14	9	11,00	7,00	11,58	0,340						
7	5	2	4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	19	22	18	19,67	4,33	19,42	0,063						
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1	12	15	16	14,33	4,33	14,17	0,028						
Коэффициенты b _i				13,542	-2,625	1,2917	1,9583	0,125	-0,2083	0,2083	0,0417	Проверка однородности дисперсий				Проверка адекватности модели								
Проверка значимости коэффициентов																								
S ² (y)	3,75	S ² (b _i)	0,1563	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	ΣS ₀ ²	30,0000		Σ(Y _{ср} -Y _{оп}) ²		0,8333							
q, %	5	S(b _i)	0,4	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	S ² _{0max}	7,0000		S _{ад} ²		0,625							
V _{зн}	16	t _i	-	34,258	6,64078	3,26769	4,95424	0,31623	0,52705	0,52705	0,10541	G	0,2333		F		0,1667							
t _{кр}	2,119	t _i -t _{кр}	-	32,139	4,52178	1,14869	2,83524	-1,80277	-1,59195	-1,59195	-2,01359	q, %	5		q _{ад} , %		5							
Вывод				значим	значим	значим	значим	нет	нет	нет	нет	V1b	2		V _{1ад}		4							
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)													8		V _{2ад}		16							
Y=13,54-2,63X1+1,29X2+1,96X3													0,5157		F _{кр}		3,01							
Y=8,50-1,19Cгр+83,33Cсвр+0,30Vст													-0,282366667		F-F _{кр}		-2,84							
Коэффициенты влияния (H)				-0,59375	8333,33	0,06	Однородны		Вывод		Вывод		адекватна											

Журнал планирования эксперимента																			
				X ₁	X ₂	X ₃	Устройство												
Контролируемые переменные				C _{гр}	S _{ар}	V _{ст}	У												
Верхний уровень				4	0,05	15													
Нижний уровень				0	0,03	5													
Основной уровень				2	0,04	10	Тк												
Интервал варьирования				2	0,01	5													
Матрица планирования 2 ³ в кодовых обозначениях переменных																			
№	Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса								Результаты расчета для проверки адекватности модели							
	m ₁	m ₂	m ₃	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃								
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{ср}	S ₀ ²	Y _{оп}	(Y _{ср} -Y _{оп}) ²	
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	138	140	149	142,333	34,33333	142,500	0,02778	
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	205	197	187	196,333	81,33333	199,833	12,25000	
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	161	165	175	167,000	52,00000	166,833	0,02778	
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	215	230	224	223,000	57,00000	226,500	12,25000	
6	1	6	8	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	182	197	194	191,000	63,00000	190,833	0,02778	
7	5	2	4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	273	283	269	275,000	52,00000	271,500	12,25000	
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1	222	204	219	215,000	93,00000	215,167	0,02778	
Коэффициенты b _i				196	-17,167	17,333	30	-5,1667	-5,8333	1,6667	-1,8333	Проверка однородности дисперсий			Проверка адекватности модели				
Проверка значимости коэффициентов												ΣS ₀ ²	582,0000	Σ(Y _{ср} -Y _{оп}) ²			49,1111		
S ² (y)	72,75	S ² (b _i)	3,0313	3,031250	3,031250	3,031250	3,031250	3,031250	3,031250	3,031250	3,031250	S _{0max} ²	149,3333	S _{ад} ²			73,6667		
q, %	5	S(b _i)	1,74	1,741049	1,741049	1,741049	1,741049	1,741049	1,741049	1,741049	1,741049	G	0,2566	F			1,0126		
V _{зн}	16	t _i	-	112,576	9,85996	9,95569	17,231	2,96756	3,35047	0,95728	1,05301	q, %	5	q _{ад} , %			5		
t _{кр}	2,119	t _i -t _{кр}	-	110,457	7,74096	7,83669	15,112	0,84856	1,23147	-1,16172	-1,06599	V1б	2	V _{1ад}			2		
Вывод				значим	значим	значим	значим	значим	значим	нет	нет	V2б	8	V _{2ад}			16		
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)												Gкр	0,5157	F _{кр}			3,63		
Y=196,00-17,17X ₁ +17,33X ₂ +30,00X ₃ -5,17X ₁ X ₂ -5,83X ₁ X ₃												G-Gкр	-0,259113517	F-F _{кр}			-2,62		
Y=79,50+0,25C _{гр} +1 550,00S _{ар} +4,37V _{ст} -75,00C _{гр} S _{ар} +0,1C _{гр} V _{ст}												Вывод	Однородны	Вывод			адекватна		
Коэффициенты влияния (H)				0,125	155000	0,87333						Проверка адекватности модели							

Журнал планирования эксперимента																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Журнал планирования эксперимента											
				X_1	X_2	X_3					
Контролируемые переменные			$C_{гр}$	$S_{вр}$	$V_{ст}$						
Верхний уровень			4	0,05	15						
Нижний уровень			0	0,03	5						
Основной уровень			2	0,04	10						
Интервал варьирования			2	0,01	5						
Матрица планирования 2^3 в кодových обозначениях переменных											
№	Порядок реализации опытов			Геометрические параметры (факторы) процесса							
	m_1	m_2	m_3	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$
1	8	3	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	4	5	3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	3	8	7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	6	1	2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	7	4	5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	6	8	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	5	2	4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	2	7	6	1	1	1	1	1	1	1	1
Коэффициенты b_i				543,54	-16,875	19,542	30,792	0,4583	1,375	12,125	0,0417
Проверка значимости коэффициентов											
$S^2(y)$	36,42	$S^2(b_i)$	1,5174	1,517361	1,517361	1,517361	1,517361	1,517361	1,517361	1,517361	1,517361
q, %	5	$S(b_i)$	1,23	1,231812	1,231812	1,231812	1,231812	1,231812	1,231812	1,231812	1,231812
$V_{зн}$	16	t_i	-	441,254	13,6993	15,8642	24,997	0,37208	1,11624	9,84322	0,03383
$t_{кр}$	2,119	$t_i-t_{кр}$	-	439,135	11,5803	13,7452	22,878	-1,74692	-1,00276	7,72422	-2,08517
Вывод				значим	значим	значим	значим	нет	нет	значим	нет
Уравнение регрессии (неполная квадратичная модель)											
$Y=543,54-16,88X_1+19,54X_2+30,79X_3+12,13X_2X_3$											
$Y=521,92-10,56C_{гр}-508,33S_{вр}-3,78V_{ст}+0,09C_{гр}V_{ст}+241,67S_{вр}V_{ст}$											
Коэффициенты влияния (H)				-5,28125	-50833,3	-0,75667					
				Вывод				Однородны			
								Вывод			

Устройство											
			у								

"Утверждаю"
 Технический директор
 ОАО "Автодеталь-сервис"
 Пономарев В.А.
 " " " 2011 г.



"Утверждаю"
 Проректор по научной
 работе УлГТУ
 Ярушкина Н.Г.
 " " " 2011 г.



Акт

опытно-промышленных испытаний торцевых композиционных шлифовальных кругов производства ОАО "Дмитровградхиммаш" на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 из стали 20Х

Настоящий акт составлен в том, что в период с 15 ноября 2010 г. по 30 января 2011 г. в цехе № 3 ОАО "Автодеталь-сервис" представителями техотдела ОАО "Автодеталь-сервис" и Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) проведены опытно-промышленные испытания композиционных шлифовальных кругов (КШК) 1-600х75х305 14А25НС17Б 35м/с с отверстиями, заполненными твердым смазочным материалом, на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 из стали 20Х на торцешлифовальном станке модели СА-12 (КШК разработаны на кафедре "Технология машиностроения" УлГТУ).

Цель испытаний: выявление технологической эффективности КШК на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 в условиях основного производства ОАО "Автодеталь-сервис".

1. Номенклатура шлифовальных кругов для проведения опытно-промышленных испытаний

Круг	Типоразмер	Характеристика	Вид термообработки
Стандартный	1-600х75х305	14А40НС17Б 35м/с 2кл. А (ГОСТ 2424-83)	Конвекция
КШК		14А25НС17Б 35м/с 2кл. А (ГОСТ 2424-83)	СВЧ-термообработка

С этой целью были проведены сравнительные испытания КШК и стандартных кругов такого же типоразмера. Число отверстий КШК равно одной тысяче восьмидесяти, отношение суммарной площади смазочных элементов к площади абразивной части рабочей поверхности круга равно 0,25. Условия испытаний приведены в табл. 2.

Для контроля параметров процесса шлифования применяли следующие измерительные средства:

штангенциркуль ШЦ 1-125-0,1 (ГОСТ 166-89);

секундомер "NOKIA" (цена деления 0,1 с, погрешность измерения $\pm 0,25$ с);

контрольное приспособление 41-1011;

контрольное приспособление 41-1016;

эталон для настройки контрольного приспособления 420.41-021;

контрольное приспособление 420.41-154.

2. Условия проведения операции

Заготовка	Крестовина карданного вала 469-2201030 из стали 20Х, HRC, не менее 59...63, масса детали 0,26 кг.
Станок	Торцешлифовальный станок мод. СА-12
Шлифовальный круг	См. табл. 1
Состав твердого смазочного материала, % масс	Пульвербакелит СФП-012А (ОСТ 6-05-441-73) - 25; графит ГЛ1 (ГОСТ 5274-74) - 70; декстрин (ГОСТ 6034-74) - 5
Условия шлифования	Глубина резания $t = 0,2$ мм, снимаемый припуск $z = 0,2$ мм, $V = 55$ м/мин, частота вращения круга $n = 1100$ об/мин. Шлифование выполняли с применением СОЖ - 4 % эмульсии "Автокат Ф-78" (ТУ7774-009-27883685-99). Размеры обработки: наружный и внутренний диаметры соответственно $\varnothing 15$ и $\varnothing 8$ мм.
Режим правки	Шлифовальный круг правили карандашом алмазным синтетическим 3908-0087. 1 карат (ГОСТ 607-80).

В результате проведенных испытаний установлено, что КШК 1-600x75x305 14A25HC17Б 35 м/с с отверстиями, заполненными твердым смазочным материалом, показал на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 более высокую работоспособность по сравнению с применением стандартного круга такого же типоразмера: стойкость круга увеличилась на 25 % при обеспечении такой же шероховатости шлифованной поверхности, что и при шлифовании стандартными кругами (табл. 3). Изменений твердости и наличия прижогов в поверхностном слое торцов крестовины, шлифованных как стандартными, так и КШК, не обнаружено.

3. Результаты опытно-промышленных испытаний КШК на операции шлифования торцов крестовины карданного вала

Показатели работоспособности	Вариант обработки	
	Базовый	Опытный
1. Стойкость кругов до появления прижога на детали, шт.	200	250
2. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , обеспечиваемое при шлифовании, мкм	0,63	0,4

Рекомендовать использование композиционных шлифовальных кругов 1-600x75x305 14A25HC17B 35м/с производства ОАО "Дмитровград-химмаш" с отверстиями, заполненными твердым смазочным материалом, разработанных в УлГТУ, на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 из стали 20Х на торцешлифовальном станке модели СА-12 в механическом цехе № 3 ОАО "Автодеталь-сервис".

Представители ОАО
"Автодеталь-сервис"

Главный технолог

 Е.В. Галицкий

Начальник цеха № 3

 П.А. Алексеев

Мастер участка

 А.П. Горюнова

Представители УлГТУ

Профессор, д.т.н.

 Н.И. Веткасов

Профессор, к.т.н.

 С.М. Михайлин

Исполнитель

 В.В. Сапунов