

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)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск 2015

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Веткасов Николай Иванович

Официальные оппоненты: **Полянчиков Юрий Николаевич**, заслуженный деятель науки и образования, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Орлова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологические процессы и машины» Волжского института строительства и технологий (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Волгоградский архитектурно-строительный университет».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»**

Защита диссертации состоится «28» декабря 2015 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 999.003.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый учебный корпус, ауд. 117 (почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «__» ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Веткасов Николай Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из наиболее ответственных технологических операций изготовления абразивного инструмента (АИ) на органических терморреактивных связках (ОРС) и в частности на наиболее широко применяемой бакелитовой связке является термообработка его полуфабрикатов, в процессе которой формируются эксплуатационные свойства АИ (прочность, твердость и др.) и остаточные напряжения. Перспективным направлением совершенствования технологий термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке является применение микроволновой (сверхвысокочастотной) технологии нагрева, позволяющей существенно сократить длительность технологического цикла термообработки и удельные энергозатраты при обеспечении требуемых качественных показателей. Одно из принципиальных отличий бакелизации с использованием микроволновой энергетики от традиционной 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, что открывает возможность повышения скорости нагрева, а значит и производительности термообработки. Кроме этого, под действием электромагнитных излучений, ряд химических превращений протекает иначе, чем в обычных условиях, что открывает перспективы использования концентрированных потоков энергии переменных электрических и магнитных полей для управления и стимулирования химических реакций и спекания при производстве АИ на органических терморреактивных связках. Тем не менее, резкая активизация образования и выделения летучих веществ при быстром и непродолжительном нагреве полуфабрикатов в микроволновом 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 полуфабрикатов. Кроме этого микроволновый нагрев зачастую не обеспечивает требуемую равномерность распределения температур из-за наличия теплообмена наружных поверхностей термообрабатываемых полуфабрикатов с относительно холодной окружающей средой.

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

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Обоснование выбора наполнителей бакелитовой связки АИ, повышающих способность поглощать энергию микроволнового излучения и снижающих количество выделяющихся в процессе термообработки низкомолекулярных летучих веществ.

2. Моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов, модифицированных радиопоглощающими наполнителями, с целью обеспечения возможности управления радиопоглощающими свойствами полуфабрикатов АИ.

3. 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. Экспериментальное исследование влияния специальных наполнителей и нового способа термостатирования полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке на производительность микроволновой термообработки, структуру и твердость АИ.

5. Экспериментальное исследование работоспособности и опытно-промышленные испытания шлифовальных кругов (ШК), изготовленных с использованием специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве.

6. Разработка рекомендаций по проектированию технологических процессов изготовления АИ на бакелитовой связке с использованием микроволнового нагрева.

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

1. Математические модели и зависимости, результаты теоретических исследований влияния количества и вида радиопоглощающих наполнителей связки на изменение скорости микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке.

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, изготовленного с использованием специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности использования следующих разработок:

– программно-информационного комплекса для определения диэлектрической проницаемости полуфабрикатов АИ, модифицированных радиопоглощающими наполнителями, а также оценки влияния радиопоглощающих наполнителей на скорость их нагрева в микроволновом поле;

– математических моделей микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ в условиях радиопрозрачной теплоизоляции для оценки влияния параметров теплоизолирующего материала и режимов термообработки на равномерность нагрева полуфабрикатов и энергоемкость процесса.

– регрессионных зависимостей параметров работоспособности АИ от содержания графита, врезной подачи и скорости стола для заготовок из сталей ШХ15 и Р6М5;

– рекомендаций по проектированию технологических процессов термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, содержащей специальные наполнители, с использованием термостатирования;

– оборудования для обеспечения теплоизоляции полуфабрикатов АИ в процессе их микроволновой термообработки.

Методология и методы исследований. Достижение цели и решение поставленных задач в работе обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, технологии изготовления АИ, теорий тепломассопереноса и распространения электромагнитных волн, математического моделирования с использованием численно-аналитических методов математической статистики. Экспериментальные исследования проведены на натуральных образцах в лабораторных и производственных условиях на опытно-промышленной СВЧ установке УМБ1Э, разработанной в УлГТУ, с использованием аттестованных измерительных средств и применением методов регрессионного и дисперсионного анализа, а также путем физического и математического компьютерного моделирования.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается корректным соотношением результатов теоретических и экспериментальных исследований и применением современных методик и оборудования. Основные результаты работы доложены на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Инновации и актуальные проблемы техники и технологии», г. Саратов, 2009 г.; «Современные технологии упрочнения и восстановления деталей машин», г. Ульяновск, 2009 г.; «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», г. Ульяновск, 2009 г.; «Молодая наука XXI века», г. Краматорск, 2010, 2011 г.; «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня», г. Санкт-Петербург, 2010 г.; 60-я открытая студенческая научно-техническая конференция МГТУ «МАМИ», г. Москва, 2010 г.; «Физические основы высокоскоростной обработки и технологическое обеспечение компьютерных технологий в машиностроении», г. Ульяновск, 2011 г.; «Информатика и вычислительная техника», г. Ульяновск, 2011 г.; «Инжиниринг техно 2014», г. Саратов, 2014 г.; «Современные наукоемкие технологии: приоритеты развития и подготовка кадров», г. Набережные Челны, 2014 г.; «Резниковские чтения», г. Тольятти, 2015 г.; а также на следующих форумах и выставках: «НТТМ-2009», «НТТМ-2010», Всероссийский выставочный центр,

г. Москва, 2009, 2010 г.; молодежные инновационные форумы Приволжского федерального округа, г. Ульяновск, 2009-2011 г., 2015 г.; «Селигер 2009» – «Селигер 2011», Тверская обл.; «Россия вперед», Сколково, 2010 г.; «Наука будущего – наука молодых», г. Севастополь, 2015 г.

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, включая 2 статьи в изданиях из перечня ВАК и 3 патента РФ на новые способы изготовления АИ на бакелитовой связке.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (101 наименование) и приложений, включает 221 страницу машинописного текста, 60 рисунков и 50 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы основные научные положения, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту, её теоретическая и практическая значимость, отражены методология и методы исследований, а также степень достоверности и апробация результатов.

В **первой главе** проанализированы перспективные направления совершенствования технологии изготовления АИ на ОТС. Выявлено, что весьма перспективным направлением является применение микроволнового излучения при термообработке полуфабрикатов АИ. Обозначены преимущества и недостатки этого направления, потенциал и возможные методы решения проблем, возникающих при его реализации. Анализ априорной информации и предварительные исследования автора показали, что для уменьшения энергозатрат и ускорения процесса термообработки полуфабрикатов АИ с применением микроволнового нагрева целесообразно использовать специальные наполнители связки:

- наполнители, обладающие хорошими сорбционными свойствами, способные удерживать в своей структуре летучие вещества, выделяющиеся в процессе термообработки;

- наполнители с высоким тангенсом диэлектрических потерь, способные повысить радиопоглощающие свойства полуфабриката АИ.

Выявлены наполнители, применение которых позволит повысить эффективность процесса бакелизации, выполняемого с использованием энергии микроволнового излучения.

Предложены пути повышения производительности изготовления и улучшения качества АИ на основе снижения неравномерности микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, в частности – использование в

процессе термообработки специальной сыпучей парогазопроницаемой радиопрозрачной теплоизоляции.

Во **второй главе**, по методике И.Ю. Орлова и Т.Н. Орловой, проведен расчет количества выделяющихся в процессе бакелизации полуфабрикатов АИ летучих веществ, причем доминирующее влияние на деформацию полуфабрикатов оказывают пары воды. Потеря воды, как эффективного радиопоглощающего материала, влечет за собой снижение радиопоглощающих свойств полуфабрикатов АИ и скорости их нагрева в микроволновом поле. Показано, что достаточно эффективно связать пары воды можно с помощью сорбентов, способных вступать с водой в химическую реакцию с образованием твердых веществ – гидратов. Установлено, что по критерию "цена-качество" оптимальным является сульфат магния, одна молекула которого способна присоединить к себе до семи молекул воды с образованием твердого вещества – кристаллогидрата сульфата магния.

Критическим диапазоном температур при термообработке полуфабрикатов на бакелитовой связке является диапазон 80...120 °С: при достижении температуры 80 °С полуфабрикаты размягчаются с проявлением экзотермического эффекта. После достижения 120 °С полуфабрикаты начинают твердеть без проявления этого эффекта. Обильное выделение летучих веществ в критическом диапазоне температур приводит к деформации полуфабрикатов. Экспериментально установлено, что на конечном этапе термообработки полуфабрикатов содержащих 2 % сульфата магния, при достижении температур 170...200 °С, происходит обильное паровыделение. Это привело к выводу 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 не приводит к деформации полуфабриката, так как он отвердел и приобрёл достаточную прочность. Таким образом, замена наполнителя в виде гипса на сульфат магния позволит существенно форсировать процесс термообработки.

Согласно информации, приведенной в работе Ю.С. Архангельского, тепловая мощность энергии микроволнового излучения, рассеиваемой в единице объема полуфабриката в виде теплоты, пропорциональна квадрату напряженности электромагнитного поля в каждой конкретной точке полуфабриката, частоте приложенного поля и коэффициенту диэлектрических потерь. Повышая последний показатель за счет специальных наполнителей связки АИ, можно увеличить тепловую мощность микроволновой энергии, поглощенной полуфабрикатом. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять комплексную диэлектрическую проницаемость полуфабриката АИ как композита в зависимости от его рецептуры, а также вида и количества радиопоглощающего наполнителя. Разработаны физические модели микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ с различными радиопоглощающими свойствами без учета теплообмена с окружающей средой как при совмещенной термообработ-

та, кг/м³; ε'' – мнимая составляющая относительной диэлектрической проницаемости; k – постоянная затухания, м⁻¹; b – длина пути электромагнитной волны, проникающей в полуфабрикат, м.

При отдельной микроволновой термообработке полуфабрикатов (см. рис. 2) учитывали потери при отражении электромагнитной волны от стенок камеры (10 %):

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

Для облегчения расчетов по моделям (1) и (2) разработано программное обеспечение, с помощью которого проанализировали ряд материалов с высоким тангенсом угла диэлектрических потерь, как возможных наполнителей связки АИ. Максимальную эффективность показал графит, который (в количестве 2 % от массы формовочной смеси) по результатам расчета, способен повысить прирост температуры полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке при неизменной энергии микроволнового излучения, затрачиваемой на нагрев, в 1,6 раза. Экспериментальные исследования показали, что введение этого наполнителя позволяет снизить прижогообразование при шлифовании и шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra до 30 %.

В процессе микроволнового нагрева теплогенерация начинается с внутренних областей полуфабрикатов, при этом наружные поверхности, контактируя с менее нагретой окружающей средой, охлаждаются. Форсирование режимов термообработки за счет применения специальных наполнителей усиливает неравномерность микроволнового нагрева, что может привести к снижению качества продукции и появлению брака. Эту ситуацию можно кардинально изменить путем теплоизоляции (термостатирования) полуфабрикатов сыпучим радиопрозрачным материалом в процессе микроволнового нагрева. Для определения оптимальных параметров теплоизоляции было провели физическое (рис. 3) и математическое моделирование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ как в условиях термостатирования, так и без него.

Разработана математическая модель нагрева стопки полуфабрикатов в микроволновом поле, позволяющая оценивать равномерность распределения температур в зависимости от условий термостатирования:

$$\begin{cases} C_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_i(T)}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + q_{vi}; \\ i = \overline{1,2,3}; \quad q_{v1} = 0,55 \varepsilon_0 \varepsilon'(T) \operatorname{tg} \delta(T) \omega E^2(\tau) + q_e(T, \tau); \\ q_{v2} = q_{v3} = 0; \end{cases} \quad (3)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; ε' – действительная составляющая относительной диэлектрической проницаемости; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; E – напряженность электрического поля, В/м; $\omega = 2\pi f$ – круговая

частота, рад/с; f – частота приложенного поля, Гц; C – объемная теплоемкость ($C = c\rho$, Дж/(м³·°С)); λ – теплопроводность материала, Вт/(м·°С); τ – время, с; q_v – удельное внутреннее тепловыделение в элементарном объеме, Вт/м³; $q_e(T, \tau)$ – удельное количество теплоты, выделенное за счет экзотермического эффекта, Вт/м³; r, z – координаты в цилиндрической системе координат, м; i – индекс (1 – полуфабрикаты АИ, 2 – диатомитовое основание, 3 – теплоизолятор).

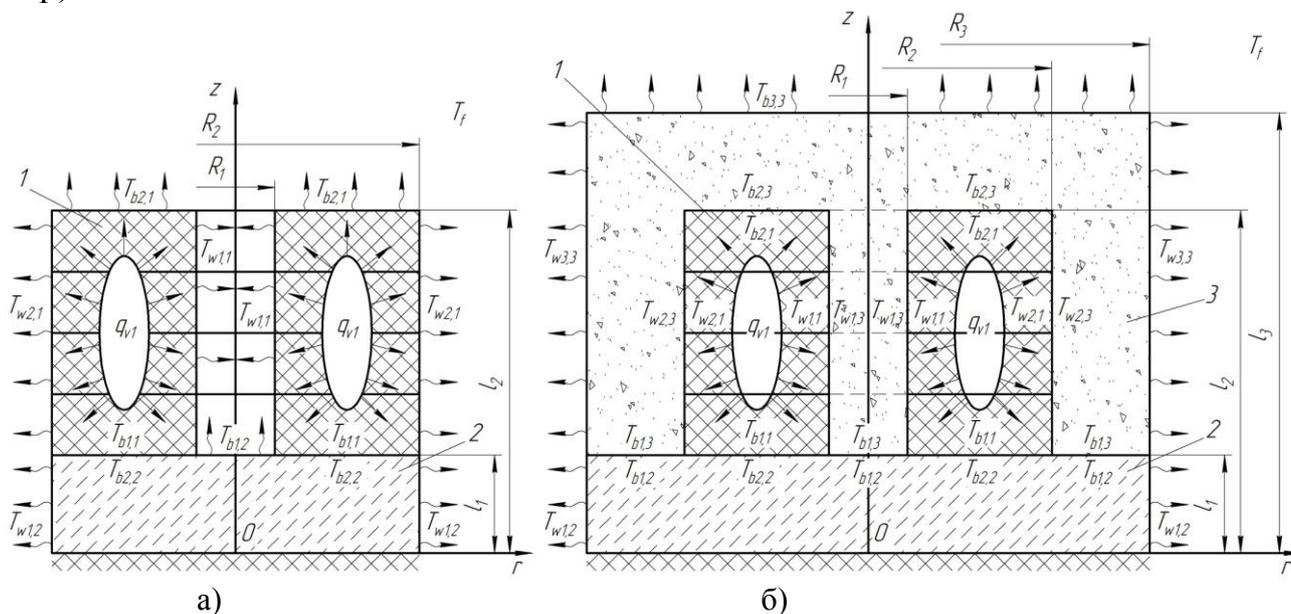


Рис. 3. Схема распространения тепловых потоков при микроволновой бакелизации стопки полуфабрикатов АИ 1, расположенных на диатомитовом основании 2: а – без теплоизоляции; б – в условиях радиопрозрачной теплоизоляции 3

Энергия, выделяющаяся в стопке полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке за счет реакции полимеризации $q_e(T, \tau)$, была определена экспериментально и табулирована. Так как реакция происходит в объеме связующего, то считали выделенную энергию равномерно распределенной по объему стопки. При теплофизическом анализе рассмотренной задачи учитывали, что объемная теплоемкость C и коэффициент теплопроводности λ полуфабрикатов, теплоизоляции и основания зависят от температуры T . Зависимости $\lambda(T)$ и $C(T)$ для полуфабрикатов АИ рассчитаны по формуле В.И. Одолевского с использованием справочных данных (рис. 4). Значения показателей $tg\delta$ и ϵ для нормальных условий были определены по формуле Нильсена. Зависимость $E(\tau)$ определяется режимом термообработки.

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

$$\tau = 0, \quad T_i(r, z, 0) = T_0. \quad (4)$$

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, которая совпадает с осью $0r$, приняли условие отсутствия теплообмена с другими телами и окружающей средой. Таким образом, будет справедлив частный случай граничного условия второго рода:

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0; \quad r = 0; \quad z \in [0; l_1]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial r} = 0; \quad r = 0; \quad z \in [l_1; l_3]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial z} = 0; \quad z = 0; \quad r \in [-R_3, R_3], \quad (7)$$

где T_i – температура тела, °С; R_3 – радиус диатомитового основания, м; l_1 – высота диатомитового основания, м; l_3 – общая высота слоя теплоизоляции и диатомитового основания, м; i – номер элемента системы (см. рис. 3).

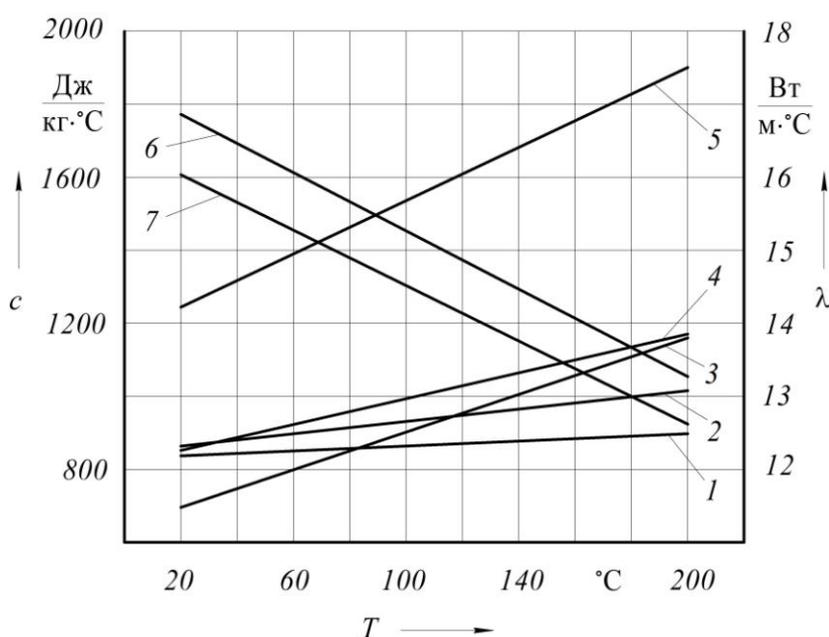


Рис. 4. Зависимость теплоемкости и теплопроводности полуфабриката АИ и его компонентов от температуры: 1 – 5 – теплоемкость соответственно электрокорунда белого, полуфабриката АИ, графита, гипса, фенолформальдегидной смолы; 6, 7 – коэффициент теплопроводности соответственно полуфабрикатов АИ с графитом (2 % по массе) и без графита

В качестве граничных условий третьего рода приняли конвективный теплообмен и тепловое излучение на открытых поверхностях стопки полуфабрикатов и теплоизоляции, которые подчиняются законам Ньютона-Рихмана и Стефана-Больцмана. В качестве граничных условий четвертого рода приняли кондуктивный теплообмен полуфабрикатов АИ с радиопрозрачным основанием и теплоизолятором (при наличии).

Математическая модель (3) была взята за основу конечно-элементной (КЭ) модели, созданной в программной среде NX 7.5. Геометрическую модель создали в виде трехмерной сборки, состоящей из различных тел. Задавали теплофизические характеристики каждого тела, соответствующие реальным материалам. Результатом КЭ моделирования являлось нестационарное температурное поле в стопке полуфабрикатов АИ. На рисунке 5 показано распределение температуры в стопках полуфабрикатов ШК после двух часов микроволнового воздействия для систем без теплоизоляции и с теплоизоляцией.

Расчеты по разработанным моделям показывают, что градиент температур для системы без теплоизоляции достигает 69 %. Для подавления теплового излучения и конвективного теплообмена было предложено использовать ряд радиопрозрачных теплоизоляторов с низкой плотностью. С помощью математической модели (3), созданной для оценки нагрева с термостатированием полуфабрикатов, выявили лучший теплоизолирующий материал из рассматриваемого ряда – вермикулит вспученный ВВФ-2, применение которого позволяет уменьшить градиент температур в стопке полуфабрикатов ШК в процессе бакеллизации до 10 %.

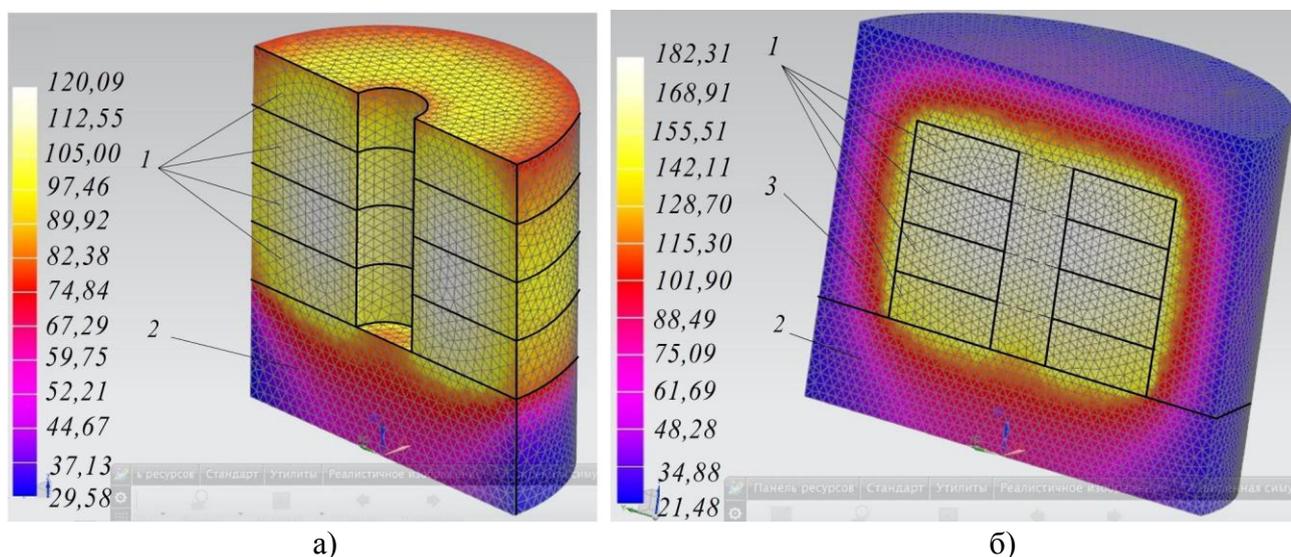


Рис. 5. Распределение температуры в стопке полуфабрикатов ШК 1, расположенной на диатомитовом основании 2 при микроволновом нагреве: а – без теплоизоляции; б – в условиях теплоизоляции вермикулитом вспученным

В третьей главе приведены методики и результаты экспериментальных исследований эффективности специальных наполнителей связки и нового способа термостатирования полуфабрикатов ШК при их микроволновом нагреве. Для экспериментальной оценки эффективности наполнителей, снижающих энергозатраты при изготовлении ШК, изготовили девять партий полуфабрикатов с различными наполнителями. В качестве наполнителей, способных связать летучие вещества, выделяющиеся в процессе термообработки полуфабрикатов ШК на бакелитовой связке, использовали дегидратированный сульфат магния и гипс ГВВС-16. В качестве наполнителя, способного повысить радиопоглощающие свойства полуфабрикатов, использовали графит кристаллический литейный ГЛ-1. Содержанием наполнителей варьировали в диапазоне 1,5...6 % от массы абразивного материала. В результате экспериментальных исследований выявлено, что замена наполнителя в виде гипса на сульфат магния позволяет повысить скорость микроволнового нагрева полуфабрикатов на бакелитовой связке, минимизируя вероятность возникновения дефектов. В ходе исследования микроволнового нагрева полуфабрикатов с различным содержанием радиопоглощающего наполнителя была подтверждена справедливость моделей (1) и (2). По результатам многофакторного эксперимента получили регрессион-

ные зависимости продолжительности нагрева до полной полимеризации связки τ и температуры T через 60 минут нагрева от содержания в связке сульфата магния $C_{см}$ (8), (9) и графита $C_{гр}$ (10), (11), массы стопки полуфабрикатов m и средней по всему циклу нагрева мощности микроволнового излучения P :

$$T = 58,61 - 0,23 \cdot C_{см} + 0,48 \cdot P - 0,00017 \cdot m - 0,00005 \cdot P \cdot m; \quad (8)$$

$$\tau = 107,08 - 10,95 \cdot C_{см} - 0,16 \cdot P + 0,018 \cdot m + 0,101 \cdot C_{см} \cdot P + 0,003 \cdot C_{см} \cdot m - 0,00003 \cdot C_{см} \cdot P \cdot m; \quad (9)$$

$$T = 86,39 + 4,28 \cdot C_{гр} + 0,44 \cdot P - 0,0048 \cdot m; \quad (10)$$

$$\tau = 99,91 + 14,59 \cdot C_{гр} - 0,07 \cdot P + 0,2 \cdot m - 0,113 \cdot C_{гр} \cdot P - 0,00006 \cdot P \cdot m + 0,00003 \cdot C_{гр} \cdot P \cdot m. \quad (11)$$

Для оценки адекватности полученных моделей определяли расчетное F и табличное F_k (при уровне значимости $q_{ад} = 5\%$) значения критерия Фишера, после сравнения которых, дели вывод об адекватности. Все полученные модели (8) – (11) признаны адекватными.

Экспериментальные исследования влияния термостатирования полуфабрикатов АИ на производительность их термообработки путем микроволнового нагрева проводили с применением различных теплоизоляционных материалов. В качестве одного из них был применен высокоэффективный теплоизолирующий сыпучий материал вермикулит марки ВВФ-2 (вспученный, фракционированный) с насыпной плотностью 125 кг/м^3 . Расхождение значений температур по сечениям стопок, определенных экспериментально и рассчитанных с помощью программного продукта NX 7.5 по математической модели (3), не превышает 8% .

Проведены экспериментальные исследования влияния использования радиопрозрачной теплоизоляции на разброс твердости полуфабрикатов по высоте стопки и в радиальном направлении. Результаты исследований показали, что применение радиопрозрачной теплоизоляции 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 бакелизированных полуфабрикатов как по высоте стопки, так и в радиальном направлении.

В четвертой главе приведены методики и результаты натурных экспериментальных исследований работоспособности АИ, изготовленных с использованием специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве. В результате однофакторных экспериментов было выявлено, что замена гипса на сульфат магния практически не сказывается на работоспособности АИ. Введение в связку ШК графита существенно снижает шероховатость обработанной поверхности. В связи с этим, при проведении многофакторных исследований варьировали только содержанием графита как радиопоглощающего наполнителя при неизменном содержании сульфата магния. Получены регрессионные зависимости коэффициента шлифования $K_{ш}$, среднего арифметического отклонения профиля шлифованной поверхности Ra , радиальной составляю-

щей силы шлифования P_y , касательной составляющей P_z и средней контактной температуры T_k от содержания в связке ШК графита $C_{гр}$, врезной подачи $S_{вр}$ и скорости стола шлифовального станка $V_{ст}$ для заготовок из стали ШХ15:

$$K_{ш} = 2,32 - 0,09 \cdot C_{гр} - 13,42 \cdot S_{вр} - 0,03 \cdot V_{ст} - 0,15 \cdot C_{гр} \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}; \quad (12)$$

$$Ra = 0,169 + 0,38 \cdot S_{вр} - 0,005 \cdot V_{ст} + 0,29 \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}; \quad (13)$$

$$P_y = 9,5 - 1,1 \cdot C_{гр} + 166,67 \cdot S_{вр} + 0,53 \cdot V_{ст}; \quad (14)$$

$$P_z = 8,5 - 1,19 \cdot C_{гр} + 83,33 \cdot S_{вр} + 0,3 \cdot V_{ст}; \quad (15)$$

$$T_k = 79,5 + 0,25 \cdot C_{гр} + 1550 \cdot S_{вр} + 4,37 \cdot V_{ст} - 75 \cdot C_{гр} \cdot S_{вр} + 0,1 \cdot C_{гр}; \quad (16)$$

и заготовок из стали Р6М5:

$$K_{ш} = 1,66 - 8,08 \cdot S_{вр} - 0,01 \cdot V_{ст}; \quad (17)$$

$$Ra = 0,139 - 0,008 \cdot C_{гр} + 0,125 \cdot S_{вр} - 0,003 \cdot V_{ст} + 0,128 \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}; \quad (18)$$

$$P_y = 37,08 - 5,17 \cdot C_{гр} + 391,67 \cdot S_{вр} + 2,05 \cdot V_{ст} + 25 \cdot C_{гр} \cdot S_{вр} + \\ + 0,39 \cdot C_{гр} \cdot V_{ст} + 48,33 \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}; \quad (19)$$

$$P_z = 26 - 2,56 \cdot C_{гр} + 300 \cdot S_{вр} + 1,13 \cdot V_{ст}; \quad (20)$$

$$T_k = 521,92 - 10,56 \cdot C_{гр} - 508,33 \cdot S_{вр} - 3,78 \cdot V_{ст} + 0,09 \cdot C_{гр} \cdot V_{ст} + \\ + 241,67 \cdot S_{вр} \cdot V_{ст}. \quad (21)$$

Установлено, что применение специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве оказывает положительное влияние на параметры работоспособности АИ, в частности введение графита в связку АИ в количестве 2 % (от массы абразивного материала) позволило снизить шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra на 35 % и теплосиловую напряженность шлифования заготовок из стали Р6М5 (рис. 5). Адекватность полученных моделей как и в предыдущем случае оценивали по критерию Фишера. Все полученные модели (12) – (21) признаны адекватными.

В пятой главе представлена конструкция устройства, которое обеспечивает высокопроизводительную засыпку стопок полуфабрикатов легким сыпучим теплоизолятором, а также его удаление после завершения операции термообработки.

Разработаны рекомендации по проектированию технологического процесса термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке с применением микроволнового излучения, в том числе даны рекомендации: по выбору радиопрозрачного теплоизолирующего материала, обеспечивающего термостатирование полуфабрикатов АИ в процессе их термообработки; по выбору адсорбирующих наполнителей, способных минимизировать вероятность возникновения деформаций полуфабрикатов в процессе термообработки; по выбору радиопоглощающих наполнителей, способных повысить скорость микроволнового нагрева; по использованию программного обеспечения, позволяющего определить необходимое количество радиопоглощающего наполнителя в зависимости от рецептуры полуфабрикатов АИ и др.

Представлены результаты опытно-промышленных испытаний ШК с графитовым наполнителем, бакелизированных в микроволновом поле, в сравнении со стандартными кругами. Испытания, проведенные на ОАО «Автодеталь-сервис» на операции шлифования торцов крестовины карданного вала 469-2201030 из стали 20Х, показали, что период стойкости ШК со специальным наполнителем на 25 % превышал этот показатель работоспособности стандартных ШК, изготовленных по конвективной технологии. К тому же параметр шероховатости шлифованной поверхности Ra уменьшился на 37 %.

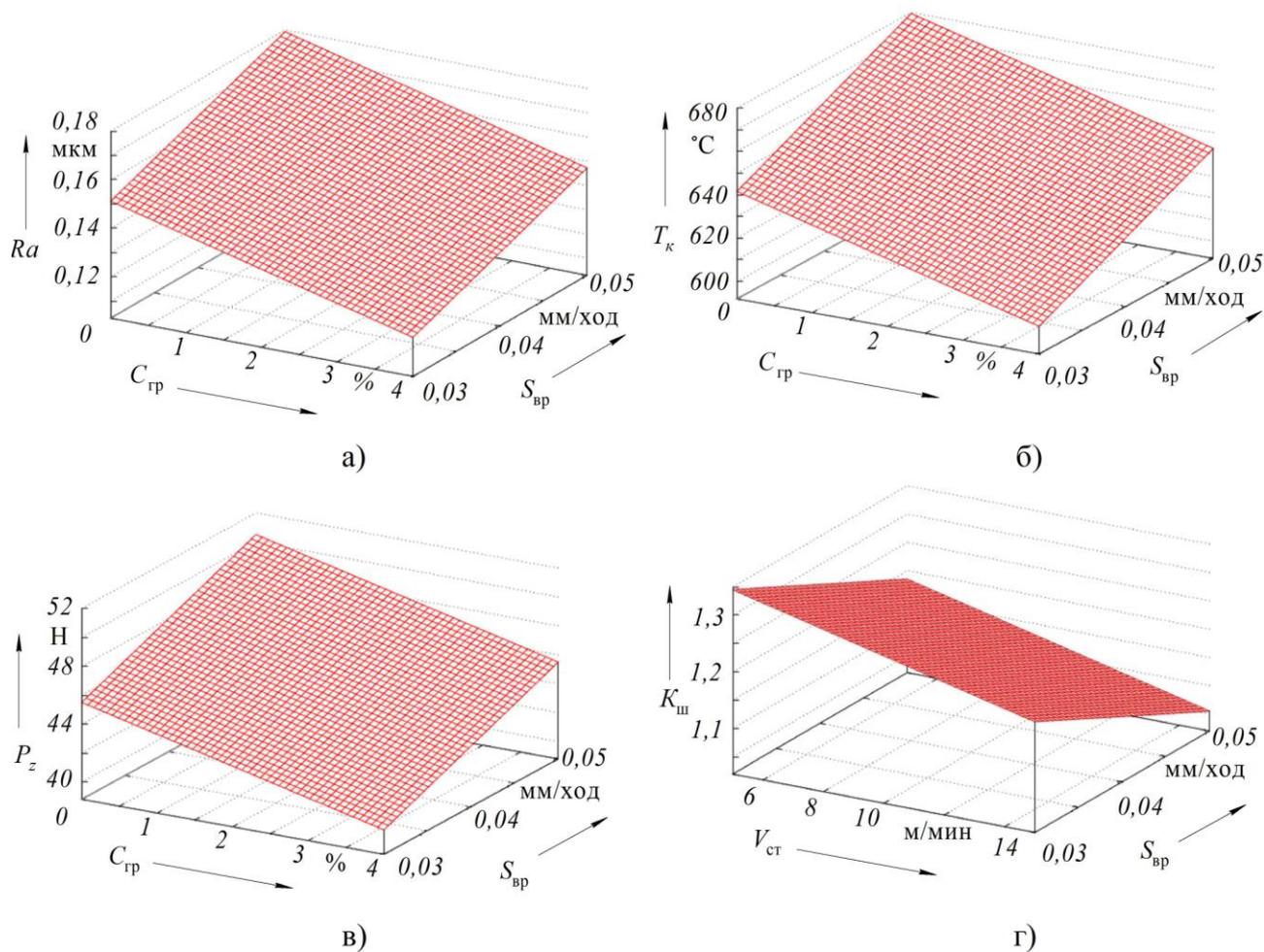


Рис. 5. Зависимость параметра шероховатости Ra шлифованной поверхности (а), средней контактной температуры T_k (б) и касательной составляющей силы шлифования P_z (в) от содержания графита $C_{гр}$ в ШК и подачи на врезание $S_{вр}$ ($V_{ст} = 10$ м/мин), а также коэффициента шлифования $K_{ш}$ (г) от скорости стола $V_{ст}$ и подачи на врезание при шлифовании заготовок из стали Р6М5: $V_k = 35$ м/с, $z = 0,15$ мм

Рассчитана ожидаемая экономическая эффективность применения разработанной микроволновой технологии изготовления АИ на бакелитовой связке, которая составила для участка бакелизации с одной микроволновой установкой типа УМБ1ЭМ 520 тысяч рублей в год.

Программно-информационный комплекс для определения диэлектрической проницаемости полуфабрикатов АИ, модифицированных радиопоглощающими

наполнителями, а также оценки влияния радиопоглощающих наполнителей на скорость их нагрева в микроволновом поле 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».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, выполненных в рамках настоящей диссертации, получены следующие научные выводы и практические результаты.

1. Разработаны математические модели (1), (2) изменения радиопоглощающих свойств полуфабриката и скорости его микроволнового нагрева путем модификации бакелитовой связки радиопоглощающими наполнителями. На основе результатов расчетов, выполненных с использованием разработанного соискателем программного обеспечения, выработаны рекомендации по содержанию в связке радиопоглощающего наполнителя в зависимости от рецептуры формовочной смеси, отдельной или совместной обработки партий полуфабрикатов.

2. Разработана математическая модель процесса микроволнового нагрева в условиях радиопрозрачной теплоизоляции (3), послужившая основой для выбора теплоизолирующего материала, применение которого минимизирует градиент температур по объему стопки полуфабрикатов АИ. Разработана методика численного моделирования с помощью программного продукта NX 7.5. Выявлено, что при применении в качестве теплоизоляции вермикулита вспученного ВВФ-2, градиент температур в стопке нагреваемых полуфабрикатов снижается до 7 раз по сравнению с нагревом без использования теплоизоляции.

3. Экспериментальная верификация математических моделей, указанных в п.п. 1 и 2 показала, что расхождение результатов расчетов и экспериментальных данных не превышает в среднем 15 %.

4. Получены 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 проведения бакелизации без возникновения дефектов в полуфабрикатах, при минимальных затратах времени. Определены закономерности влияния рекомендуемых наполнителей на структуру АИ. Выявлено, что применение радиопрозрачной теплоизоляции позволяет повысить твердость полуфабрикатов АИ и сократить разброс значений скоростей распространения звуковой волны по сечению стопки с 4,7 % до 1,5 %.

5. Получены регрессионные зависимости параметров работоспособности ШК на бакелитовой связке, термообработанных в микроволновом, поле в усло-

виях термостатирования, от содержания радиопоглощающего наполнителя и режимов шлифования заготовок из стали Р6М5 и ШХ15. Показано, что применение в качестве наполнителя ШК графита позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra на 23 %.

6. Разработаны рекомендации по проектированию технологического процесса изготовления АИ на бакелитовой связке с применением специальных наполнителей и термостатирования при микроволновом нагреве полуфабрикатов АИ. Изготовлено оригинальное оборудование для обеспечения теплоизоляции полуфабрикатов АИ в процессе их микроволновой термообработки.

7. Рассчитан совокупный ожидаемый годовой экономический эффект от использования в промышленности результатов исследований, полученных в рамках выполнения диссертации, на участке бакелизации с одной микроволновой установкой типа УМБ1ЭМ, который составил 520 тысяч рублей.

8. Проведены опытно-промышленные испытания АИ, термообработанного в микроволновом поле в условиях теплоизоляции с наполнителем из графита. Результаты теоретико-экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс подготовки студентов машиностроительного факультета УлГТУ, обучающихся по магистерской программе 15.04.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в виде сборника учебно-исследовательских лабораторных работ по дисциплине «Научные основы проектирования, технологии изготовления и применения специального абразивного инструмента».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Худобин, Л.В. Работоспособность шлифовальных кругов с наполнителями из углеродсодержащих материалов, бакелизированных в СВЧ-поле [Текст] / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов, С.М. Михайлин, В.В. Сапунов // Вектор науки Тольят. гос. ун-та. – 2011. – № 1(15). – С. 56 – 62.

2. Сапунов, В.В. Математическое моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов абразивного инструмента [Текст] / В.В. Сапунов, Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин // Вектор науки Тольят. гос. ун-та. – 2015. – № 3-1 (33-1). – С. 117 – 122.

Патенты

3. Способ изготовления абразивного инструмента на органической терморезактивной связке [Текст] : пат. 2460631 Рос. Федерация : МПК⁸ В 24 D 18/00, В 24 D 3/20, В 82 В 3/00 / Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин, С.М. Михайлин, С.В. Жданов, А.И. Капустин, В.В. Сапунов ; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. – № 2010121331/02 ; заявл. 25.05.10 ; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25. – 3 с.

4. Способ изготовления абразивного инструмента на органической терморезактивной связке [Текст] : пат. 2490115 Рос. Федерация : МПК⁸ В 24 D 18/00, В

24 D 3/28 / Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин, С.М. Михайлин, А.И. Капустин, В.В. Сапунов ; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. – № 2011149694/02 ; заявл. 06.12.11 ; опубл. 20.08.13, Бюл. № 23. – 4 с.

5. Способ СВЧ-термообработки полуфабрикатов из композиционных материалов на органических термореактивных связках [Текст] : пат. 2545939 Рос. Федерация : МПК⁸ В 24 D 18/00 / А.И. Капустин, Л.В. Худобин, В.В. Сапунов, Н.И. Веткасов, С.М. Михайлин, А.А. Капустин ; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. – № 2013157961/02 ; заявл. 25.12.13, опубл. 10.04.15, Бюл. № 10. – 7 с.

Публикации в других изданиях

6. Веткасов, Н.И. Сверхвысокочастотные технологии термообработки полуфабрикатов композиционных шлифовальных кругов на бакелитовой связке [Текст] / Н.И. Веткасов, Л.И. Ефремов, А.В. Сизов, В.В. Сапунов // Инновации и актуальные проблемы техники и технологии : материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2009. – Т.2. – С. 45 – 48.

7. Сапунов, В.В. Шлифовальные круги на бакелитовой связке с наполнителями из углеродсодержащих материалов [Текст] / В.В. Сапунов, Н.И. Веткасов, А.В. Степанов // Молодежь и наука XXI века : материалы III-й Междунар. науч.-практ. конф. / Ульянов. гос. с.-х. акад. – Ульяновск, 2010. – С. 105 – 107.

8. Веткасов, Н.И. Модификация связки абразивных инструментов для ускорения полимеризации полуфабрикатов при нагреве в сверхвысокочастотном поле [Текст] / Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин, В.В. Сапунов // Инжиниринг техно 2014 : сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2014. – Т.2. – С. 216 – 224.

9. Сапунов, В.В. Исследование влияния различных наполнителей абразивного инструмента на шероховатость обработанных заготовок [Текст] / В.В. Сапунов, А.В. Степанов, Н.И. Веткасов // Современные наукоемкие технологии: приоритеты развития и подготовка кадров : сб. статей междунар. науч.-практ. конф. / Казанский национальный исследовательский техн. ун-т. – Набережные Челны, 2014. – С. 75 – 79.

10. Сапунов, В.В. Математическое моделирование микроволнового нагрева полуфабрикатов абразивного инструмента [Текст] / В.В. Сапунов, Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин // IV Резниковские чтения: сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. / Тольяттинский государственный университет». – Тольятти, 2015. – С. 92 – 97.

11. Веткасов, Н.И. Термообработка полуфабрикатов абразивного инструмента в микроволновом поле с применением радиопрозрачной теплоизоляции [Текст] / Н.И. Веткасов, В.В. Сапунов // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: труды междунар. науч.-техн. конф. / ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – Севастополь, 2015. – С. 20 – 25.

САПУНОВ В.В.

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

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать _____.2015. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Усл. печ. л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ _____.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.