

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ПОЛУФАБРИКАТОВ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

© 2015

**В.В. Сапунов**, ассистент кафедры «Технология машиностроения»

**Н.И. Веткасов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

**Л.В. Худобин**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)*

**Ключевые слова:** микроволновый нагрев; абразивный инструмент; бакелитовая связка; термостатирование; математическая модель.

**Аннотация:** Обозначены преимущества и недостатки микроволнового способа термообработки полуфабрикатов абразивного инструмента (АИ). Описан способ микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ с использованием теплоизоляции объектов нагрева, который позволяет обеспечить равномерный нагрев стопки полуфабрикатов. Представлена физическая модель микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке в условиях термостатирования, на основе которой построена математическая модель и назначены начальные и граничные условия. Определены зависимости теплофизических характеристик полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке от температуры. Экспериментально определена зависимость удельной мощности тепловой энергии, выделенной и поглощенной в процессе полимеризации АИ за счет экзо- и эндотермических эффектов, от времени термообработки. Проведено численное моделирование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ методом конечных элементов в программной среде NX 7.5, в ходе которого обозначены источники выделения теплоты и зависимости изменения их удельной мощности от времени, заданы начальные и граничные условия в соответствии с построенной математической моделью. Представлены результаты численного моделирования в виде температурного поля в стопке полуфабрикатов АИ. На основе анализа моделей микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ, теплоизолированных различными материалами, выбран наиболее эффективный теплоизолятор. Выявлено значительное снижение градиента температур в процессе микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ за счет применения радиопрозрачной теплоизоляции. Путем численного моделирования процессов микроволновой термообработки выявлены режимы, обеспечивающие требуемые скорости нагрева полуфабрикатов АИ на различных этапах цикла термообработки. На полученных режимах проведено экспериментальное исследование влияния теплоизоляции на равномерность нагрева полуфабрикатов АИ в микроволновом поле.

Одной из наиболее длительных и энергоемких операций технологического процесса изготовления абразивного инструмента (АИ) на бакелитовой связке является термообработка полуфабрикатов [1; 2]. Существенно сократить длительность этой операции и повысить качество АИ на бакелитовой связке можно путем применения в процессе термообработки микроволнового нагрева, получившего широкое распространение в производстве строительных материалов, полимеров, керамики, резины, сушке древесины и др. [1; 3–6]. Уникальные параметры микроволнового излучения позволяют снизить длительность технологического цикла операции термообработки полуфабрикатов в несколько раз [7–11]. Однако тепловое излучение и конвективный теплообмен полуфабрикатов АИ с менее нагретой окружающей средой при микроволновом нагреве препятствуют минимизации длительности цикла термообработки, особенно ввиду неоднородности температурного поля в пространстве рабочей камеры [12–15]. В Ульяновском государственном техническом университете разработан способ микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, теплоизолированных сыпучим радиопрозрачным материалом: микроволновое излучение беспрепятственно проникает сквозь теплоизолирующий материал к стопке полуфабрикатов АИ, где рассеивается в виде теплоты, а летучие вещества, выделяющиеся в процессе полимеризации связки, после прохождения слоя сыпучего теплоизолятора удаляются из рабочей камеры с помощью системы вентиляции

[16]. Для оценки эффективности ряда теплоизолирующих материалов и назначения режимов термообработки при различных условиях выполнены математическое моделирование и численное исследование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке.

Физическая модель микроволнового нагрева стопки полуфабрикатов типоразмера 1 150' 25' 32 представлена на рис. 1. В рассматриваемой постановке для любого продольного сечения цилиндра задача будет осесимметричной и искомая функция будет зависеть только от трех переменных:  $T=T(r, z, \tau)$ . Соответствующее уравнение теплопроводности в полярных координатах будет иметь следующий вид [17]:

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

где  $\tau$  – время, с;

$T$  – температура, °С;

$\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м·°С);

$c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);

$q_v$  – удельное внутреннее тепловыделение в объеме  $dV=dx dy dz$ , Вт/м<sup>3</sup>;

$r, z$  – координаты в цилиндрической системе координат, м;

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

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

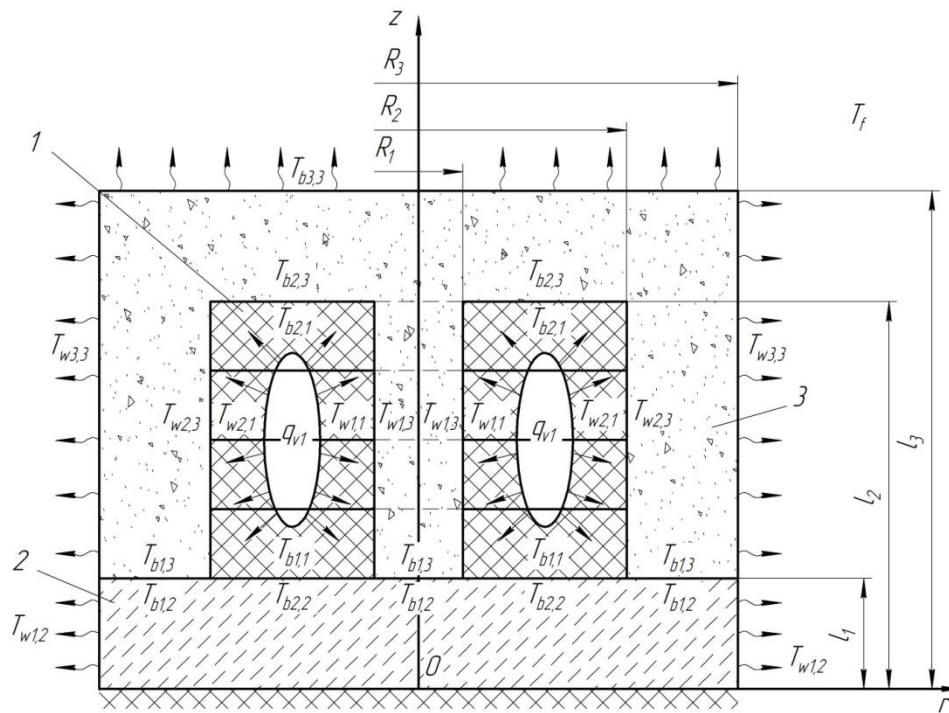


Рис. 1. Схема распространения тепловых потоков при микроволновой бакелизации стопки полуфабрикатов АИ 1, расположенных на диатомитовом основании 2 в условиях термостатирования радиопрозрачным теплоизолятором

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

$$c_i(T) = 0,76T + 863,9.$$

где  $q_{mw}(\tau)$ ,  $q_e(\tau)$  – удельное внутреннее тепловыделение в материале, соответственно, за счет энергии микроволнового излучения и экзотермического эффекта, Вт/м<sup>3</sup>.

Удельная мощность тепловой энергии  $q_{mw}(\tau)$ , выделенной в материале полуфабриката за счет воздействия на него микроволнового поля, определяется следующим выражением [18]:

$$q_{mw}(\tau) = 0,55 \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta \omega E^2(\tau),$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  
 $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  
 $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  
 $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  
 $\omega = 2\pi f$  – круговая частота, рад/с;  
 $f$  – частота приложенного поля, Гц.

Значения параметров  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\varepsilon$  были определены по формуле Нильсена [19]:  $\varepsilon = 7,89$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 0,011$ . Зависимость напряженности электрического поля от времени  $E(\tau)$  определяется режимом термообработки.

Энергия, выделяемая и поглощаемая в стопке полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке за счет реакции полимеризации  $q_e(\tau)$ , определена экспериментально (рис. 2) и табулирована. Так как реакция происходит в объеме связующего, то можно считать выделенную энергию равномерно распределенной по объему стопки.

Зависимость теплоемкости  $c_i(T)$  опытных образцов полуфабриката АИ от температуры  $T$  в диапазоне 20...200 °С:

Таким образом, двумерная нестационарная математическая модель нагрева стопки полуфабрикатов в микроволновом поле выглядит следующим образом:

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

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

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

В качестве граничных условий были приняты конвективный теплообмен и тепловое излучение на открытых поверхностях стопки полуфабрикатов и кондуктивный теплообмен с радиопрозрачным основанием и теплоизолятором.

Процессы распространения теплоты симметричны относительно оси  $Oz$ , а нормальные составляющие 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  $Or$  (см. рис. 1), приняли условие отсутствия

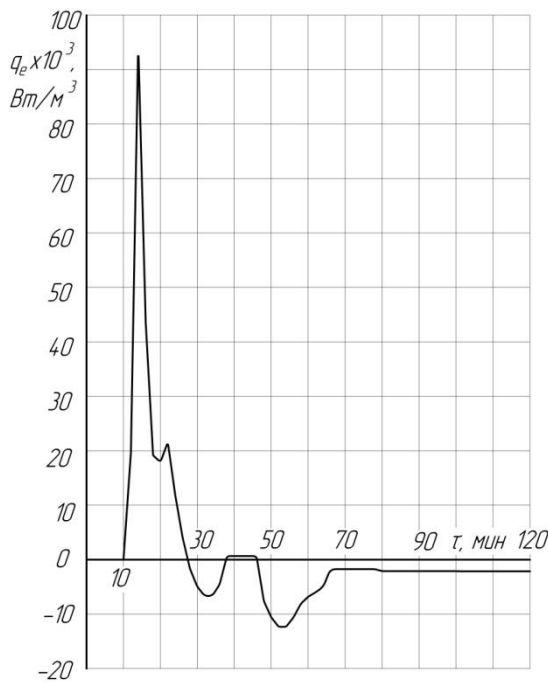
теплообмена с другими телами и окружающей средой. В любой точке этой поверхности удельный тепловой поток и пропорциональный ему градиент по нормали к ней равны нулю. Таким образом, оси  $0z$  и  $0r$  можно считать адиабатическими границами, для которых справедлив частный случай граничного условия второго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

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

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

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

где  $T_2$  – температура диатомитового основания, °С;  
 $T_3$  – температура теплоизолятора, °С;  
 $l_1, R_3$  – высота и радиус диатомитового основания, м;  
 $l_3$  – общая высота слоя теплоизоляции и диатомитового основания, м.



**Рис. 2.** Зависимость удельной мощности тепловой энергии  $q_e$ , выделенной и поглощенной в процессе полимеризации АИ за счет экзо- и эндотермических эффектов, от времени термообработки  $t$

На открытых поверхностях теплоизолятора и диатомитового основания в процессе микроволнового нагрева имеет место конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой. Конвективный теплообмен подчиняется закону Ньютона – Рихмана, а радиационный – с открытых поверхностей тел – закону Стефана – Больцмана [20]. Таким образом, граничные

условия третьего рода, учитывающие конвективный и радиационный теплообмен, будут иметь следующий вид:

$$\lambda_{r,3} \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,3} - T_f) + \varepsilon_{p3} \sigma_0 (T_{w3,3}^4 - T_f^4),$$

$$r = R_3, \quad z \in [l_1; l_3];$$

$$\lambda_{r,2} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,2} - T_f) + \varepsilon_{p2} \sigma_0 (T_{w3,2}^4 - T_f^4),$$

$$r = R_3, \quad z \in [0; l_1];$$

$$\lambda_{z,3} \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha_f (T_{b3,3} - T_f) + \varepsilon_{p3} \sigma_0 (T_{b3,3}^4 - T_f^4),$$

$$z = l_3, \quad r \in [-R_3; R_3],$$

где  $\alpha_f$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $T_f$  – температура окружающей среды, °С;  
 $\lambda_{r,i}$  – теплопроводность тела в направлении оси  $0r$ , Вт/(м·°С);  
 $\sigma_0$  – постоянная Стефана – Больцмана;  
 $\lambda_{z,i}$  – теплопроводность тела в направлении оси  $0z$ , Вт/(м·°С);  
 $T_{wk,i}$  – температура поверхности тела, перпендикулярной направлению оси  $0r$ , °С;  
 $T_{bk,i}$  – температура поверхности тела, перпендикулярной направлению оси  $0z$ , °С;  
 $\varepsilon_{pi}$  – степень черноты поверхности тела;  
 $i$  – номер позиции тела (см. рис. 1);  
 $k$  – порядковый номер поверхности тела в направлении осей координат (см. рис. 1).

На границах соприкосновения полуфабриката, диатомитового основания и теплоизолятора обеспечивается равенство температур и равенство потоков теплоты. Следовательно, граничное условие четвертого рода примет следующий вид:

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w1,1} = T_{w1,3},$$

$$r = -R_1, \quad z \in [l_1; l_2];$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w2,1} = T_{w2,3},$$

$$r = R_2, \quad z \in [l_1; l_2];$$

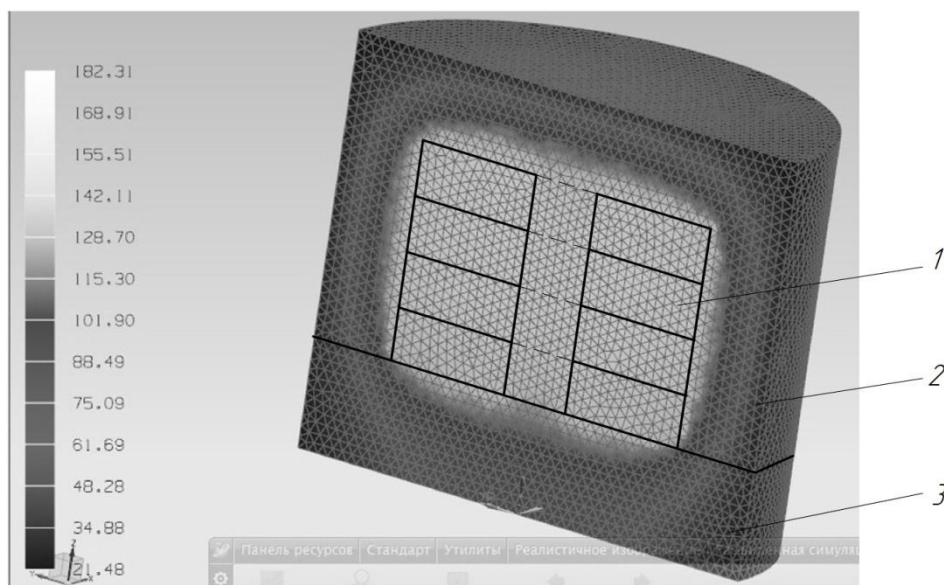
$$\lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial z}; \quad T_{b1,3} = T_{b1,2},$$

$$z = l_1, \quad r \in [-R_3; -R_2], \quad r \in [-R_1; R_1], \quad r \in [R_2; R_3];$$

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

$$z = l_2, \quad r \in [-R_2; -R_1], \quad r \in [R_1; R_2],$$

где  $R_1, R_2$  – соответственно, радиус посадочного отверстия и радиус наружного диаметра полуфабриката, м.



**Рис. 3.** Температурное распределение в стопке полуфабрикатов в процессе нагрева с применением теплоизоляции под воздействием микроволнового излучения:  
1 – полуфабрикаты АИ, 2 – теплоизолятор, 3 – диатомитовое основание

Решить описанную выше математическую модель аналитическим путем не представляется возможным, в связи с чем решение было осуществлено численным методом при помощи ЭВМ: в программной среде NX 7.5 была создана геометрическая модель в виде трехмерной сборки, состоящей из различных тел; каждому телу задавали свои теплофизические характеристики, соответствующие реальным материалам; затем была создана конечно-элементная модель, заданы начальные и граничные условия, указаны источники выделения теплоты и зависимости изменения их удельной мощности от времени. Результатом численного моделирования явилось нестационарное температурное поле в стопке полуфабрикатов АИ. Анализ моделей микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ, теплоизолированных различными материалами, показал, что наиболее эффективным теплоизолятором среди отобранных является вермикулит вспученный фракционированный ВВФ-2 ТУ 5712-091-00281915-2007. На рис. 3 показано распределение температуры в стопке полуфабрикатов АИ, теплоизолированных вермикулитом, после двух часов воздействия микроволнового излучения. Анализ модели, показанной на рис. 3, свидетельствует о том, что благодаря применению теплоизоляции нагреваемых полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке удалось снизить градиент температур по сечению стопки полуфабрикатов АИ с 35 до 9%. Путем численного моделирования процессов микроволновой термообработки выявлены режимы, обеспечивающие требуемые скорости нагрева полуфабрикатов АИ на различных этапах цикла термообработки. На этих режимах экспериментально исследовали влияние теплоизоляции на равномерность нагрева полуфабрикатов АИ в микроволновом поле. Выявлено, что расхождение теоретических и экспериментальных значений температур не превышает 5%.

Таким образом, доказана возможность применения радиопрозрачного теплоизолятора для снижения неоднородности микроволнового нагрева полуфабрикатов и разработана методика корректировки режимов термообработки в зависимости от внешних условий. Снижение неоднородности микроволнового нагрева позволило резко сократить длительность цикла термообработки, снизить энергоемкость этой операции и улучшить качество АИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худобин Л.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М. Сверхвысокочастотная энергетика в производстве абразивных инструментов и их работоспособность. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 307 с.
2. Худобин Л.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М., Сапунов В.В. Работоспособность шлифовальных кругов с наполнителями из углеродсодержащих материалов, бакелизованных в СВЧ-поле // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 1. С. 56–62.
3. Веткасов Н.И., Худобин Л.В., Сапунов В.В. Модификация связки абразивных инструментов для ускорения полимеризации полуфабрикатов при нагреве в сверхвысокочастотном поле // Инжиниринг техно 2014: сборник трудов II междунар. научно-практ. конф. Саратов, 2014. Т. 2. С. 216–224.
4. Морозов Г.А., Морозов О.Г. Микроволновые технологии. Результаты и новые задачи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. № 3. С. 82–91.
5. Нефедов В.Н. Высокоэффективные СВЧ-технологии термообработки материалов с малыми диэлектрическими потерями // Производственные технологии 2001: материалы отчетной конференции-выставки. М., 2002. С. 340.

6. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. М.: Наука, 2000. 264 с.
7. Доценко А.В. Оптимизация ущерба и резервирования при СВЧ диэлектрическом нагреве // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 1. № 1. С. 131–137.
8. Толстов В.А. Повышение энергетической эффективности установок СВЧ диэлектрического нагрева // Электродинамические устройства и линии передачи СВЧ: межвуз. науч. сборник. Саратов, 2000. С. 109–113.
9. Быков Ю.В., Рыбаков К.И., Семенов В.Е. Микроволновая высокотемпературная обработка материалов // Вакуумная СВЧ электроника: сборник обзоров. Н. Новгород, 2002. С. 26–35.
10. Демьянчук Б.А. Микроволновый нагрев: особенности модернизации технологии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 2. С. 41–45.
11. Михайлин С.М., Капустин А.И., Жданов С.В. Сверхвысокочастотные технологии в производстве абразивных инструментов на бакелитовой связке // Вестник машиностроения. 2008. № 10. С. 58–61.
12. Попов Е.М. Микроволновая сушка полезных ископаемых // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 4. С. 33–35.
13. Кингстон Г.М., Джесси Л.Б. Пробоподготовка в микроволновых печах. Теория и практика. М.: Мир, 1991. 336 с.
14. Архангельский Ю.С., Воронкин В.А. Элементная база СВЧ электротермического оборудования. Саратов: СГТУ, 2003. 212 с.
15. Михайлин С.М. Моделирование распределения тепловой мощности сверхвысокочастотного излучения в камере поликонденсации композитных материалов // Вестник УлГТУ. 2009. № 1. С. 31–33.
16. Капустин А.И., Худобин Л.В., Сапунов В.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М., Капустин А.А. Способ СВЧ-термообработки полуфабрикатов из композиционных материалов на органических терморезистивных связках : патент на изобретение РФ № 2545939 от 10.04.2015.
17. Резник С.В., Румянцев С.А. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. № 1. С. 6–21.
18. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
19. 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. Т. 81. № 1. С. 106–110.
20. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
- crowave energy in the manufacture of abrasive tools and their efficiency]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2013, 307 p.
2. Khudobin L.V., Vetkasov N.I., Mihaylin S.M., Sapunov V.V. The efficiency of the grinding wheels filled with carbonaceous materials, bakelite in a microwave field. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 56–62.
3. Vetkasov N.I., Khudobin L.V., Sapunov V.V. Modification bundles of abrasive tools to accelerate the polymerization of semi-finished products when heated in the microwave field. *Inzhiniring techno 2014: sbornik trudov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Saratov, 2014, vol. 2, pp. 216–224.
4. Morozov G.A., Morozov O.G. Microwave technology. Results and new tasks. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2006, no. 3, pp. 82–91.
5. Nefedov V.N. High-performance microwave technology heat treatment of materials with low dielectric loss. *Proizvodstvennye tekhnologii 2001: materialy otchetnoy konferentsii-vystavki*. Moscow, 2002, p. 340.
6. Didenko A.N. *SVCH-energetika: teoriya i praktika* [Microwave energy: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2000, 264 p.
7. Dotsenko A.V. Optimization of the damage and the backup when the microwave dielectric heating. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 131–137.
8. Tolstov V.A. Improving the energy efficiency of microwave dielectric heating. *Elektrodinamicheskie ustroystva i linii peredachi SVCH: mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik*. Saratov, 2000, pp. 109–113.
9. Bykov Y.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. Microwave high-temperature processing of materials. *Vakuumnaya SVCH elektronika: sbornik obzorov*. N. Novgorod, 2002, pp. 26–35.
10. Demyanchuk B.A. Microwave heating: especially the modernization of technologies. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2004, no. 2, pp. 41–45.
11. Mikhaylin S.M., Kapustin A.I., Zhdanov S.V. Microwave technology in the manufacture of abrasive tools on bakelite base. *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 10, no. 58–61.
12. Popov E.M. Microwave drying of minerals. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2015, no. 4, pp. 33–35.
13. Kingston G.M., Jessie L.B. *Probopodgotovka v mikrovolnovykh pechakh. Teoriya i praktika* [Sample preparation in microwave ovens. Theory and practice]. Moscow, Mir Publ., 1991, 336 p.
14. Arkhangelskiy Y.S., Voronkin V.A. *Elementnaya baza SVCH elektrotermicheskogo oborudovaniya* [Element base of microwave electrothermal equipment]. Saratov, SSTU Publ., 2003, 212 p.
15. Mihaylin S.M. Modeling the distribution of thermal power microwave radiation in the chamber condensation composite materials. *Vestnik UIGTU*, 2009, no. 1, pp. 31–33.
16. Kapustin A.I., Khudobin L.V., Sapunov V.V., Vetkasov N.I., Mikhaylin S.M., Kapustin A.A. *Sposob SVCH-termoobrabotki polufabrikatov iz kompozitsionnykh materialov na organicheskikh termoreaktivnykh svyazkah* [Method of microwave heat treatment of semi-finished

## REFERENCES

1. Khudobin L.V., Vetkasov N.I., Mihaylin S.M. *Sverkhvysokochastotnaya energetika v proizvodstve abrazivnykh instrumentov i ikh rabotosposobnost* [Mi-

- products made of composite materials based on organic thermosetting bundles]. Patent RF no. 2545939, 2015.
17. Reznik S.V., Rumyantsev S.A. Mathematical modeling of the thermal state of cylindrical workpieces from polymeric composite materials at microwave heating. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie*, 2014, no. 1, pp. 6–21.
18. Arkhangelskiy Y.S. *Spravochnaya kniga po SVCH elektrotermii: spravochnik* [Handbook of Microwave electrothermics: directory]. Saratov, Nauchnaya kniga Publ., 2011, 560 p.
19. Usanov D.A., Skripal A.V., Romanov A.V. Complex permittivity of composites based on dielectric matrices and their constituent carbon nanotubes. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2011, vol. 81, no. 1, pp. 106–110.
20. Lykov A.V. *Teplomassoobmen. Spravochnik* [Heat and Mass Transfer. Directory]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 480 p.

## MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE HEATING OF SEMIFINISHED ABRASIVE TOOLS

© 2015

**V.V. Sapunov**, assistant of the Department “Technology of machine building”

**N.I. Vetkasov**, Doctor of Engineering, Professor of the Department “Technology of machine building”

**L.V. Khudobin**, Doctor of Engineering, Professor of the Department “Technology of machine building”  
*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)*

**Keywords:** microwave heating; abrasive tools; bakelite bond; thermostat control; mathematical model.

**Abstract:** The authors noted the advantages and disadvantages of microwave heat treatment of semi-finished abrasive tool (AT) and described the method of microwave heat treatment of semi-finished AT using heat insulation of heat units, which ensures uniform heating of the stack of semis. The article represents the physical model of microwave heating of AT bakelite bonded semis in the thermostat, which is the base for construction of mathematical model and determination of initial and boundary conditions. The authors specified the dependencies of thermal and physical characteristics of bakelite bonded semi-finished AT on temperature. The authors determined experimentally the dependence of specific capacity of heat energy released and absorbed in the process of AT polymerization by means of exothermic and endothermic effects on the time of heat treatment, carried out a numerical simulation of the microwave heating of semi-finished AT using the finite-element method in the NX 7.5 software environment. During this simulation, heat emission sources and the dependences of their specific capacity changes on the time are designated, initial and boundary conditions are given in accordance with the designed mathematical model. The article presents the results of numerical simulation in the form of temperature field in the stack of semi-finished AT. The most effective heat-insulator is selected on the basis of the analysis of models of microwave heating of semi-finished AT heat-insulated using various materials. During the microwave heating of AT semis using the radio transparent insulation the authors discovered the significant reduction in the temperature gradient. By means of numerical simulation of microwave heat treatment, the modes providing the required rates of heating of AT semis at various stages of the heat treatment cycle are revealed. Using these modes, the authors carried out the experimental study of the influence of heat insulation on the uniformity of AT semis heating within the microwave field.