

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.78: 621.385.6.6

doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-83-92

Моделирование прогрева связующего полимерных композиционных материалов с использованием СВЧ-излучения

П.В. Просунцов¹, С.В. Резник¹, К.В. Михайловский¹, Е.С. Беленков²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² АО «Российские космические системы»

Modeling the Heating of the Binder of Polymeric Composite Materials Using Microwave Radiation

P.V. Prosuntsov¹, S.V. Reznik¹, K.V. Mikhailovskiy¹, E.S. Belenkov²¹ Bauman Moscow State Technical University² AO Russian Space Systems

Среди актуальных проблем производства ракетно-космических конструкций выделяется проблема повышения производительности, энергетической эффективности и качества готовых деталей из полимерных композиционных материалов. Одним из узких мест является отверждение полимерного связующего в заготовках деталей. Применение объемного микроволнового нагрева заготовок может дать заметные преимущества по сравнению с традиционными методами при условии глубокого теоретического обоснования режимов СВЧ-нагрева. Предложено решение задачи прогрева цилиндрической заготовки из полимерного композиционного материала. В рамках многомасштабного подхода разработаны физическая и математическая модели переноса электромагнитного излучения, учитывающие распределение электромагнитного поля в отдельных составляющих композита. Проведено моделирование температурного состояния обрабатываемой заготовки для различных компоновочных схем установки СВЧ-нагрева. Показано, что наиболее равномерный нагрев достигается в прямоугольной камере с вращением заготовки вокруг своей оси.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, полимерный композиционный материал, отверждение связующего, СВЧ-излучение, представительный элемент объема

One of the most important tasks in space-rocket manufacturing is to increase the performance, energy efficiency and quality of the polymer composite parts. A particularly challenging problem is curing the polymer binder in workpieces. Microwave volumetric heating can provide significant advantages compared to conventional curing techniques, provided that the microwave heating regimes are justified theoretically. The paper provides a solution to the problem of heating a cylindrical part from a polymer composite material. Physical and mathematical models of electromagnetic radiation transfer are developed within the framework of a multiscale approach. The models take into account the distribution of the electromagnetic field in the components of the composite's constituents. The thermal state of the part is mo-

deled for various microwave heating arrangements. It is shown that the most uniform heating is achieved in a rectangular chamber, with the part rotating along its axis.

Keywords: rocket and space technology, polymer composite material, binder curing, microwave radiation, representative volume element

В ракетно-космической технике важно применять материалы, обеспечивающие малую массу конструкции при ее высокой прочности и жесткости. Благодаря уникальным механическим, химическим и тепловым характеристикам полимерных композиционных материалов (ПКМ) их не только внедряют в производство космических аппаратов и ракет, но и все более широко используют при создании автомобилей, кораблей, строительных конструкций и многих других гражданских сооружений.

Неотъемлемым этапом производства ПКМ является отверждение полимерного связующего. При этом его отверждение осуществляется при повышенных температурах в печах (как правило, крупногабаритные изделия) или в сушильных камерах (малогабаритные изделия), а для сокращения времени отверждения внутри камеры повышают давление воздуха (автоклавный метод).

Несмотря на простоту, такой метод отверждения связующего имеет существенные недостатки: во-первых, время отверждения может достигать нескольких десятков часов, что влечет за собой большие энергетические затраты; во-вторых, в процессе отверждения возникают значительные градиенты температуры в изделии, что может привести к термическим деформациям и короблению.

Для снижения стоимости и повышения качества изделий из ПКМ необходимо переходить на принципиально иные методы обработки. Одним из перспективных подходов является применение электромагнитного излучения микроволнового диапазона (СВЧ-излучения) для объемного нагрева и последующего отверждения полимерного связующего. В частности, такая технология может оказаться особенно эффективной при производстве многоэлементных трансформируемых космических конструкций [1–6].

Согласно исследованиям зарубежных и отечественных специалистов [7–14], использование этого метода позволит сократить энергетические затраты на производство изделий за счет снижения продолжительности термообработки в несколько раз и улучшить их качество путем

повышения однородности температурных полей в заготовках. В обстоятельных литературных обзорах [7–9] раскрыты подходы к обработке заготовок изделий из стекло-, углепластиков и керамики, рассмотрены возможности современного оборудования и измерительных приборов.

В области исследований теплофизических процессов, происходящих в ПКМ при воздействии микроволнового излучения, можно выделить работу [7], где представлен большой массив экспериментальных данных и исследовано влияние ряда технологических параметров на процесс отверждения. Дано описание оригинальной установки СВЧ-нагрева с рабочей зоной гексаэдральной формы с попеременной схемой включения отдельных магнетронов, что должно снижать негативное влияние образующихся в рабочей зоне установки стоячих электромагнитных волн на температурное состояние обрабатываемого изделия. Однако математические модели поглощения СВЧ-излучения и прогрева изделия в работе [7] отсутствуют.

В научных трудах [10–12] приведены физические и математические модели процесса СВЧ-нагрева изделий из ПКМ, а также результаты экспериментальных исследований их температурного состояния при таком нагреве. Следует отметить, что в этих публикациях принята гипотеза об однородном распределении электромагнитного поля в обрабатываемом изделии.

Цель работы — выбор рациональной конструктивно-компоновочной схемы установки СВЧ-нагрева для отверждения связующего ПКМ на основе математического моделирования процессов переноса электромагнитного излучения и прогрева.

Моделирование процессов в представительном элементе объема (ПЭО) материала. Для моделирования распространения СВЧ-излучения в рабочей зоне технологической установки и прогрева изделия из ПКМ необходимы надежные данные о таких электрофизических характеристиках материала, как относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ ,

удельная проводимость σ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. Экспериментальное определение характеристик ПКМ затруднено большим количеством возможных вариантов сочетания типов связующего, наполнителя и структуры материала. Поэтому на этапе проектирования целесообразно использовать их расчетно-теоретическое определение на основе моделирования распространения СВЧ-излучения в ПЭО ПКМ.

В качестве ПЭО для однонаправленных угле-, стекло и органопластиков применена модель, включающая в себя одно волокно вместе с окружающим его объемом. Принято, что армирующее волокно в ПЭО имеет форму цилиндра радиусом $R_{rve} = 5$ мкм и длиной $L_{rve} = 27$ мкм, а окружающее эпоксидное связующее — форму параллелепипеда с боковой гранью длиной $L_{rve} = 27$ мкм и шириной $H_{rve} = 12$ мкм. Считалось, что на одну из боковых граней параллелепипеда падает плоская электромагнитная волна (рис. 1).

Распространение электромагнитной волны в ПЭО ПКМ описывается уравнениями Гельмгольца [13]

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \tau^2} = 0; \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial \tau^2} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{H} — вектор напряженности магнитного поля, А/м; ε_0 — электрическая постоянная, Ф/м; μ — относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 — коэффициент магнитной проницаемости среды, Гн/м; τ — время.

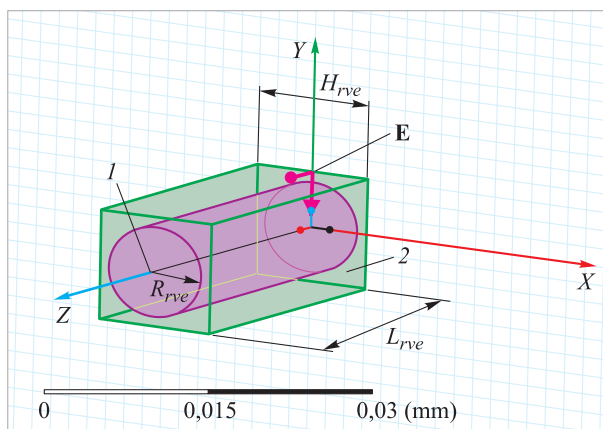


Рис. 1. Геометрическая модель ПЭО однонаправленного ПКМ:

1 — волокно; 2 — связующее; \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля падающей волны

Принято, что внешнюю поверхность ПЭО микроволновое излучение проходит без отражения и потерь. На поверхности волокна из диэлектрического материала выполняются следующие граничные условия:

$$H_{\tau 1} = H_{\tau 2};$$

$$E_{\tau 1} = E_{\tau 2};$$

$$D_{\tau 1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} D_{\tau 2};$$

$$B_{\tau 1} = \frac{\mu_1}{\mu_2} B_{\tau 2},$$

где $H_{\tau 1}$ и $H_{\tau 2}$ — тангенциальные составляющие вектора напряженности магнитного поля связующего (матрицы) и волокна; $E_{\tau 1}$ и $E_{\tau 2}$ — тангенциальные составляющие вектора напряженности электрического поля матрицы и волокна; $D_{\tau 1}$ и $D_{\tau 2}$ — тангенциальные составляющие вектора электрической индукции матрицы и волокна; ε_1 и ε_2 — относительные диэлектрические проницаемости матрицы и волокна; $B_{\tau 1}$ и $B_{\tau 2}$ — тангенциальные составляющие вектора магнитной индукции матрицы и волокна; μ_1 и μ_2 — относительные магнитные проницаемости матрицы и волокна.

При поглощении энергии электромагнитного излучения происходит выделение тепла внутри материала, интенсивность которого для диэлектриков зависит от частоты и мощности излучения:

$$q_{mw}(T) = \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta f E^2,$$

где T — температура материала, К; f — линейная частота микроволнового излучения, Гц.

В электропроводящем углеродном волокне, где напряженность электрического поля близка к нулю, граничные условия на поверхности раздела волокно — матрица примут вид:

$$E_{\tau 1} = 0;$$

$$j_s = [H_{\tau 1}, n_0],$$

где j_s — плотность электрического тока в проводнике, А/м²; n_0 — нормаль к границе раздела проводящей и диэлектрической сред.

В электропроводящей среде уравнения Максвелла содержат ненулевую плотность электрического тока, а значения некоторых величин, используемые при расчете электрических полей, становятся комплексными числами. В этом случае (1) и (2) принимают комплексный вид [14]:

$$\operatorname{rot} \bar{\mathbf{H}} = i\omega \bar{\epsilon} \epsilon_0 \bar{\mathbf{E}};$$

$$\operatorname{rot} \bar{\mathbf{E}} = -i\omega \mu_0 \bar{\mathbf{H}},$$

где $\bar{\mathbf{H}}$, $\bar{\mathbf{E}}$ и $\bar{\epsilon}$ — комплексные значения векторов напряженностей магнитного, электрического полей и диэлектрической проницаемости среды соответственно; i — мнимая единица; ω — круговая частота излучения.

При моделировании электромагнитных процессов в ПЭО ПКМ частота СВЧ-излучения принята равной 2,45 ГГц, а напряженность электрического поля падающей планарной волны — 4,3 В/м. Моделирование проведено в пакете программ ANSYS HFSS [15].

Для ПЭО ПКМ, состоящего из стеклянного волокна и эпоксидного связующего, на рис. 2 приведено распределение напряженности электрического поля в волокне и матрице. Анализ

полученных результатов позволяет сделать вывод, что распределение напряженности электрического поля практически не изменяется во всей системе волокно — связующее.

Для ПЭО ПКМ, содержащего углеродное волокно и эпоксидное связующее, на рис. 3 показано распределение плотности электрического тока в волокне и напряженности электрического поля в связующем при воздействии микроволнового излучения. Как видно из рисунка, значения напряженности электрического поля в связующем различаются.

Анализ мощности тепловыделения в ПЭО ПКМ показал, что для эпоксидного связующего она достигает $9,744 \cdot 10^{-16}$ Вт, а для углеродного волокна второго — $1,191 \cdot 10^{-9}$ Вт. Столь большое различие можно объяснить возникновением индуцированных токов в углеродном волокне.

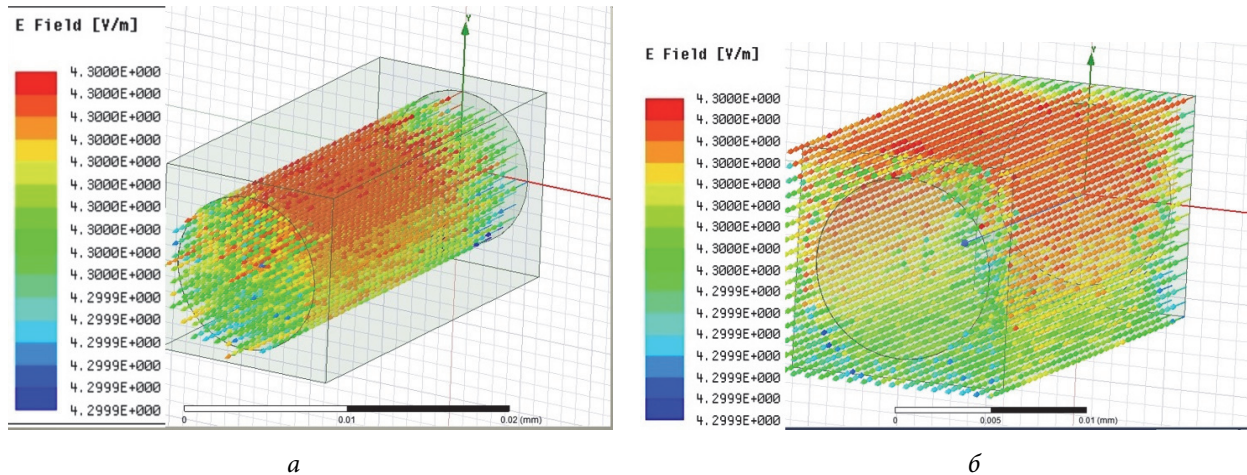


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля, В/м, в стеклянном волокне (а) и эпоксидном связующем (б) при воздействии микроволнового излучения

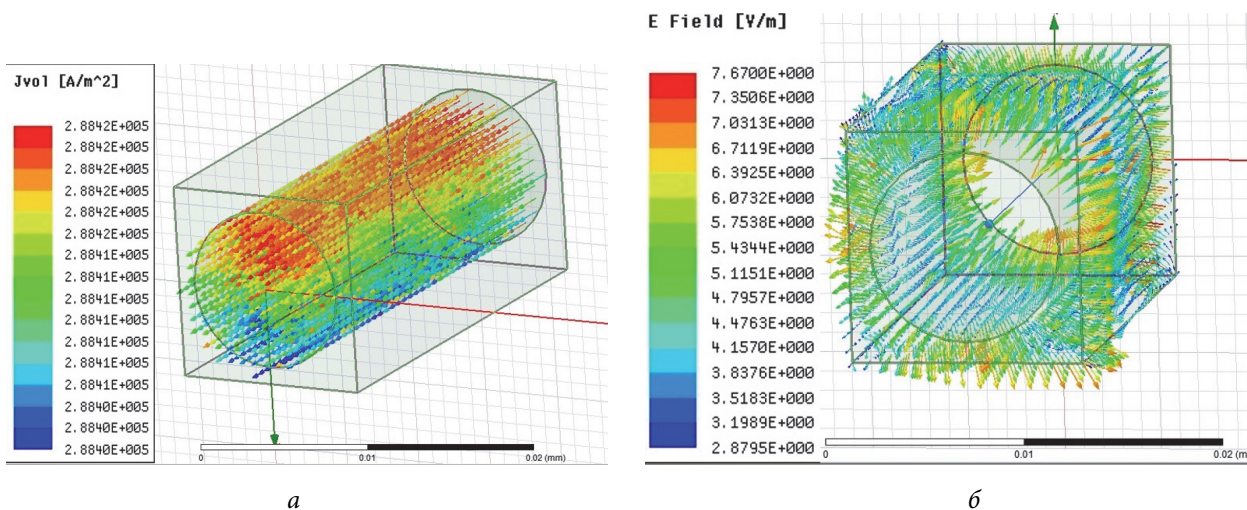


Рис. 3. Распределение плотности электрического тока, A/m^2 , в углеродном волокне (а) и напряженности электрического поля, В/м, в эпоксидном связующем (б) при воздействии микроволнового излучения

Отсюда следует важный вывод: в отличие от электромагнитных процессов, происходящих в ПКМ с диэлектрическими волокнами (стеклянными и органическими), где наибольший вклад в тепловыделение вносит связующее, в ПКМ с проводящими волокнами основное выделение тепла происходит именно в них.

Процедура гомогенизации характеристик ПКМ. Для возможности представления ПКМ при моделировании тепловых и электромагнитных процессов в установке СВЧ-нагрева как материала с однородной структурой проводилась процедура гомогенизации. Для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости среды системы волокно — связующее применялся метод Рэлея первого порядка [16]:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 \sqrt{\frac{1 - \Delta_{12}v}{1 + \Delta_{12}v}};$$

$$\Delta_{12} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2},$$

где v — объемная доля наполнителя в ПКМ.

Для определения остальных характеристик использовались правило смеси и условие равенства количества выделения тепла в гетерогенном ПЭО ПКМ и гомогенизированной модели.

Моделирование прогрета заготовки из ПКМ в СВЧ-печи. В качестве модели для проведения анализа тепловых и электромагнитных процессов в установке СВЧ-нагрева на макроуровне рассмотрена полая цилиндрическая деталь из

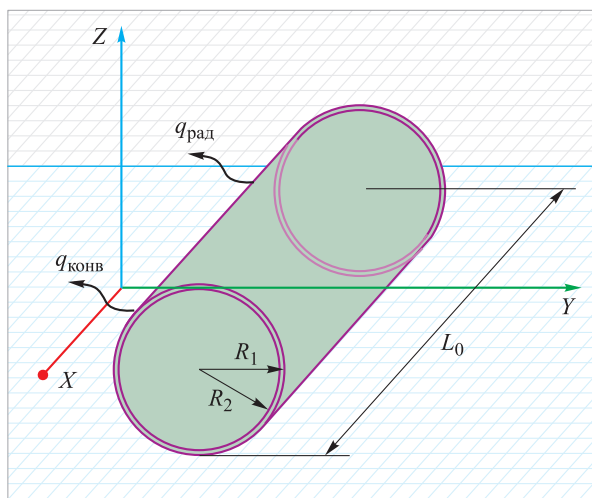


Рис. 4. Геометрическая модель цилиндрической заготовки

стеклопластика. Считалось, что цилиндрическая заготовка с внешним радиусом $R_1 = 90$ мм, внутренним радиусом $R_2 = 85$ м и длиной $L_0 = 1200$ мм (рис. 4) расположена в СВЧ-печи, имеющей один или несколько источников излучения и, соответственно, один или несколько волноводов. Материал заготовки принимался однородным и изотропным, на боковых поверхностях заготовки тепловая энергия рассеивалась посредством конвективного ($q_{конв}$) и радиационного ($q_{рад}$) теплообмена с окружающей средой, форма изделия, тепловые и электромагнитные характеристики материала не изменялись на протяжении всего периода воздействия микроволнового излучения, температура окружающей среды являлась постоянной величиной.

Математическая модель теплообмена в цилиндрической заготовке описывается выражением

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

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T(r, z, \varphi, \tau)}{\partial r} \right) +$$

$$+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T(r, z, \varphi, \tau)}{\partial \varphi} \right) + q_{mw},$$

где c — удельная теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К); ρ — плотность материала заготовки, кг/м³; r, z, φ — координаты точки в объеме модели в цилиндрической системе координат; λ — теплопроводность материала заготовки, Вт/(м·К).

Граничные и начальные условия примут вид

$$-\lambda \frac{\partial T(R_1, z, \varphi, \tau)}{\partial r} = -\alpha_f [T(R_1, z, \varphi, \tau) - T_f] -$$

$$- \epsilon_w \sigma_0 [T^4(R_1, z, \varphi, \tau) - T_f^4];$$

$$-\lambda \frac{\partial T(R_2, z, \varphi, \tau)}{\partial r} = -\alpha_f [T(R_2, z, \varphi, \tau) - T_f] -$$

$$- \epsilon_w \sigma_0 [T^4(R_2, z, \varphi, \tau) - T_f^4];$$

$$T(r, z, \varphi, 0) = T_f,$$

где α_f — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_f — температура окружающей среды, К; ϵ_w — степень черноты материала заготовки; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Рассмотрена модель камеры, оснащенная одним магнетроном мощностью 2,4 кВт, работающим на частоте 2,45 ГГц. Приняты следующие

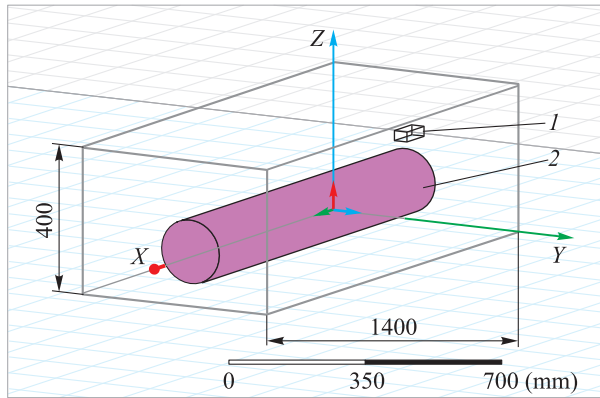


Рис. 5. Схема размещения заготовки в установке СВЧ-нагрева:
1 — излучатель мощностью 2400 Вт;
2 — обрабатываемая деталь

щие размеры камеры: высота — 400 мм; ширина — 540 мм; длина — 1400 мм (рис. 5).

Результаты моделирования, приведенные на рис. 6, а, свидетельствуют о крайне неоднородном распределении напряженности электрического поля в установке СВЧ-нагрева при использовании одного магнетрона. Вследствие этого процесс прогрева заготовки будет проис-

ходить неравномерно. Различие значений напряженности электрического поля порядка 10^4 В/м для локальных областей заготовки может приводить к локальным перепадам температуры в десятки градусов.

Для снижения неоднородности напряженности электрического поля рассмотрена конструкция камеры, оснащенная четырьмя источниками СВЧ-излучения, мощностью 600 Вт каждый. В этом случае, как следует из рис. 6, б, распределение напряженности электрического поля при работе четырех магнетронов становится более однородным, что в свою очередь приводит к снижению перепадов температуры внутри заготовки.

Однако внедрение дополнительных источников излучения усложняет конструкцию установки и повышает стоимость обработки. Поэтому были рассмотрены другие варианты компоновки установки СВЧ-нагрева, различающиеся размерами рабочей зоны, местами размещения магнетронов и использованием разных вариантов движения заготовки в процессе обработки. Предпочтительным вариантом следует признать печь, конструкция которой позволяет осуществ-

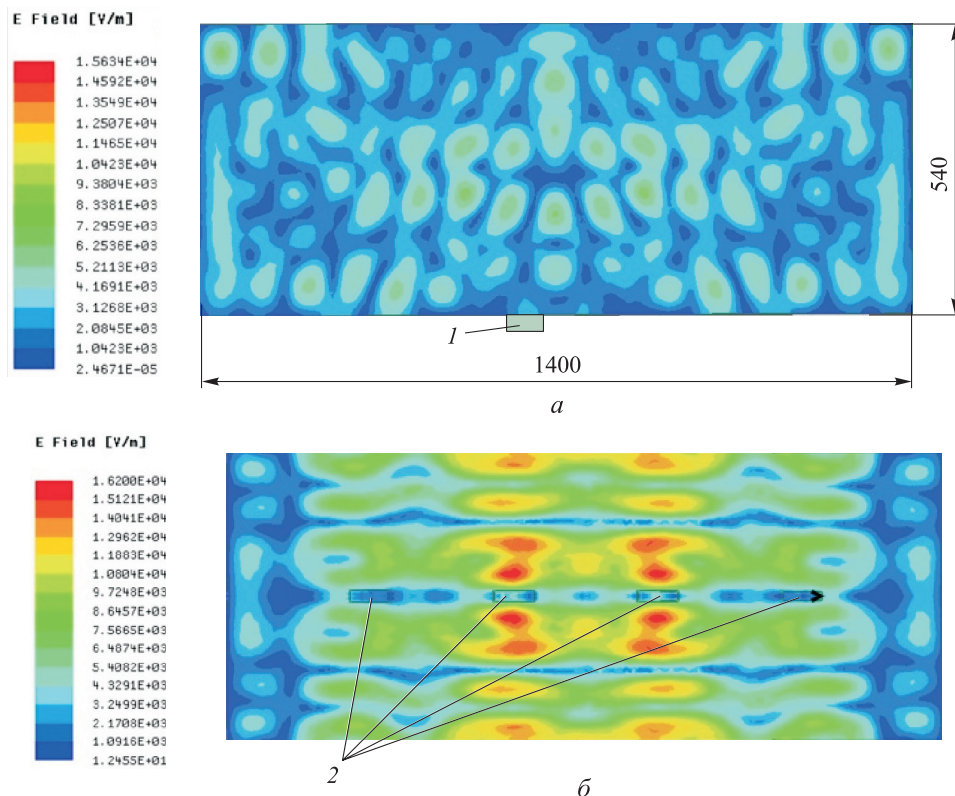


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля, В/м, в установке СВЧ-нагрева при использовании одного (а) и четырех (б) магнетронов:
1 — излучатель мощностью 2400 Вт; 2 — излучатели мощностью 600 Вт

лять движение заготовки вокруг своей оси в процессе воздействия СВЧ-излучения.

Анализируя полученные результаты, можно отметить более равномерное распределение

напряженности электрического поля (рис. 7) и температуры в заготовке (рис. 8). Таким образом, вращение заготовки вокруг своей оси способно привести к значительному повышению

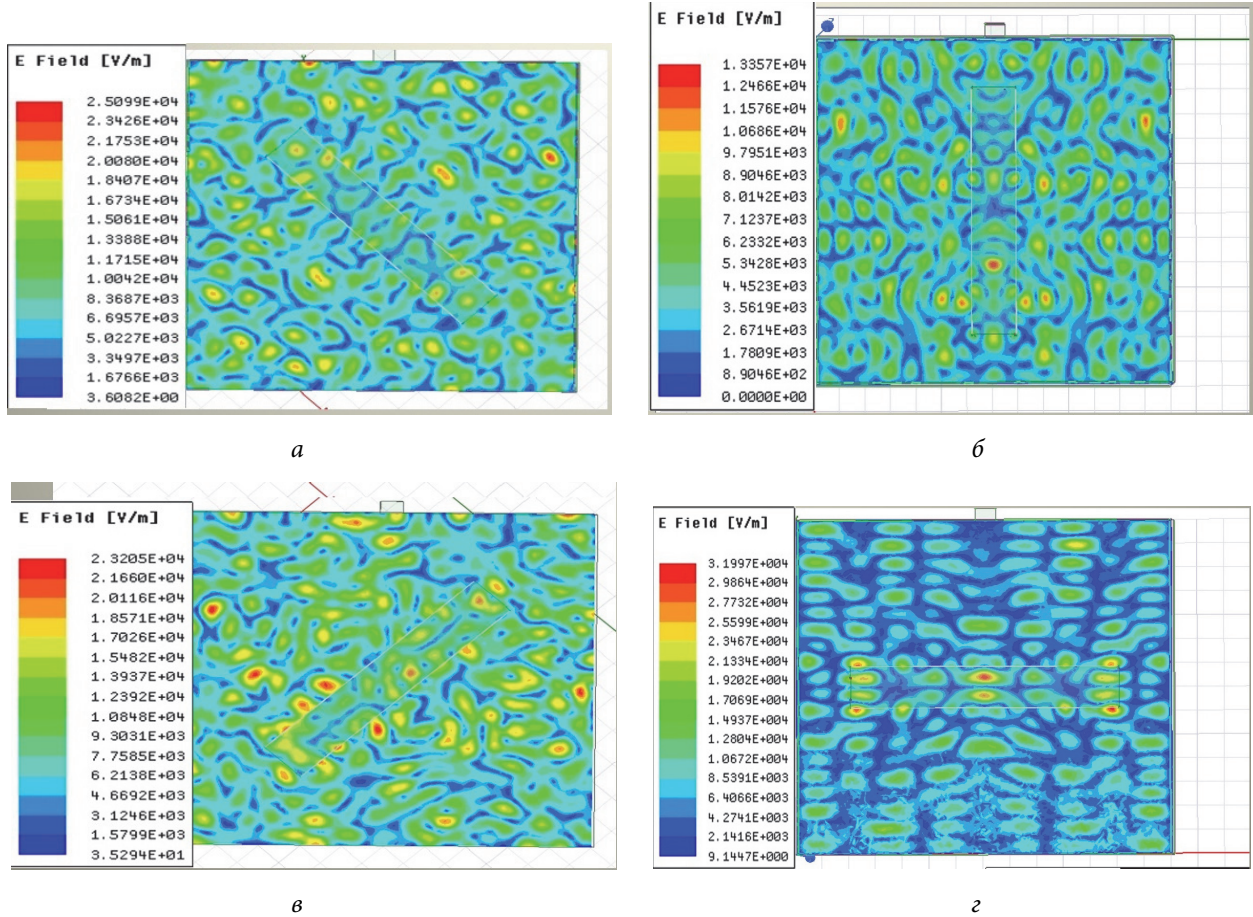


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля, В/м, при повороте детали вокруг своей оси в установке СВЧ-нагрева на угол, равный 45 (а), 90 (б), 135 (в) и 180° (г)

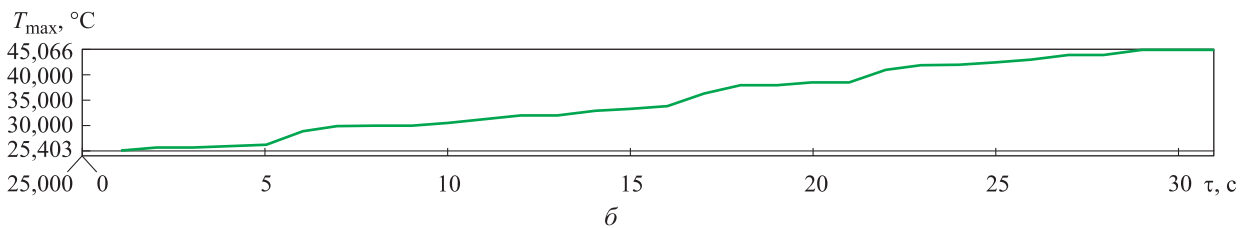
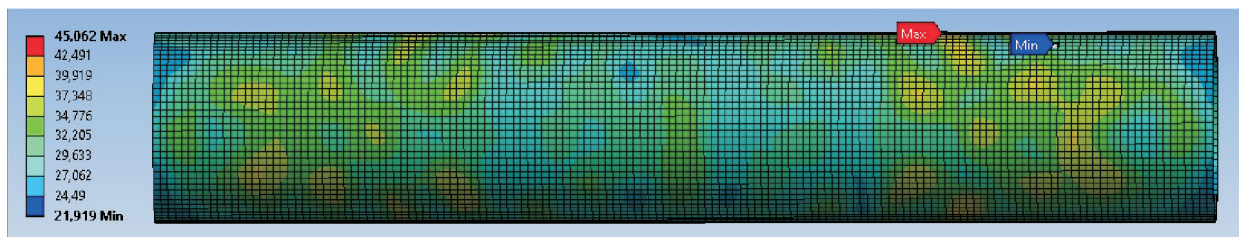


Рис. 8. Температурное состояние заготовки при ее вращении в установке СВЧ-нагрева вокруг своей оси:
 а — поле температуры заготовки, °С, в момент времени 30 с;
 б — зависимость максимальной температуры заготовки T_{max} от времени τ

равномерности распределения температуры и, как следствие, к повышению качества изделия из ПКМ.

Выводы

1. Разработаны физическая и математическая модели переноса электромагнитного излучения и прогрева ПЭО ПКМ, учитывающие распределение электромагнитного поля в каждом отдельном компоненте при воздействии микроволнового излучения и позволяет проводить анализ температурного состояния ПЭО ПКМ.

2. Создана методика гомогенизации характеристик ПКМ модели ПЭО для вычисления эффективных характеристик материала и их последующего применения в модели макроуровня. Основным критерием перехода к моде-

ли макроуровня является равенство объемной мощности тепловыделения для систем двух уровней.

3. Предложены физические и математические модели переноса электромагнитного излучения и прогрева цилиндрической заготовки из стеклопластика, учитывающие неоднородное распределение электромагнитного поля в заготовке детали из ПКМ при воздействии микроволнового излучения.

4. Проведено моделирование температурного состояния обрабатываемой заготовки для различных конструктивно-компоновочных схем установки СВЧ-нагрева. Анализ результатов показал, что наиболее равномерный нагрев достигается в камере, оснащенной подвижными элементами, где обеспечено вращение заготовки вокруг своей оси.

Литература

- [1] Zimin V.N., Koloskov I.M., Meshkovsky V.E., Usyukin V.I. Investigation of natural oscillations for self-deployable truss space antennae. *Computational Engineering*, 2001, vol. 30, pp. 497–504.
- [2] Gottero M., Sacchi E., Lorenzo G., Reznik S.V., Kalinin D.Yu. The largedeployable antenna (LDA). A review of thermal aspects. *Proc. 35th Int. Conf. on Environmental Systems*, 2005, Roma, Italy, July 11–15, 2005, 16 p.
- [3] Kotik A., Usyukin V., Vinogradov I., Arkhipov M. Simulation of reflecting surface deviation of centimeter-band parabolic space radiotelescope (SRT) with the large-size mirror. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2017, 105671A, doi: 10.1117/12.2308118
- [4] Reznik S.V., Denisov O.V., Prosuntsov P.V., Timoshenko V.P., Shulyakovskii A.V. Thermal-vacuum tests of hollow composite rods intended for structures in space. *Polymer Science — Series D*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 242–245, doi: 10.1134/S1995421213030192
- [5] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovsky K.V., Shafikova I.R. Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 153, is. 1, 012012, doi: 10.1088/1757-899X/153/1/012001
- [6] Sayapin S.N., Shkapov P.M. Kinematics of deployment of petal-type large space antenna reflectors with axisymmetric petal packaging. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, vol. 45, no. 5, pp. 387–397, doi: 10.3103/S1052618816050137
- [7] Kwak M. *Microwave curing of carbon-epoxy composites: process development and material evaluation*. London, Imperial College London, 2016. 175 p.
- [8] Teufl D., Zaremba S. 2.45 GHz microwave processing and its influence on glass fiber reinforced plastics. *Materials*, 2018, vol. 11, no. article 838, doi: 10.3390/ma11050838
- [9] Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S., Basu D. Prospects of microwave processing: An overview. *Bulletin of Materials Science*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 1–13, doi: 10.1007/s12034-009-0001-4
- [10] Гузева Т.А. Совершенствование технологических режимов отверждения заготовок деталей из органопластиков под действием СВЧ-излучения. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 163 с.
- [11] Резник С.В., Румянцев С.А. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 1, с. 6–21, doi: 10.7463/0114.0658448

- [12] Михайловский К.В., Резник С.В. Прогнозирование температурных режимов процесса отверждения связующего при получении деталей из полимерных композиционных материалов с помощью микроволнового излучения. *Тепловые процессы в технике*, 2014, т. 6, № 8, с. 378–384.
- [13] Zong L., Zhou S., Sgriccia N., Hawley M.C., Sun R., Kempel L.C. Dielectric properties of an эпоxy-amine system at a high microwave frequency. *Polymer Engineering and Science*, 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1576–1580, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.20345>
- [14] Дворко И.М. Получение полимерных материалов и изделий отверждением терморективных композиций под действием электрических полей. *Пластические массы*, 1998, № 8, с. 16–21.
- [15] Банков С.Е., Курушин А.А. *Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft*. Москва, ЗАО «НПП «Родник», 2009. 256 с.
- [16] Емец Ю.П. Электрические характеристики трехкомпонентной диэлектрической среды. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1998, т. 114, вып. 3(9), с. 1126–1136.

References

- [1] Zimin V.N., Koloskov I.M., Meshkovsky V.E., Usyukin V.I. Investigation of natural oscillations for self-deployable truss space antennae. *Computational Engineering*, 2001, vol. 30, pp. 497–504.
- [2] Gottero M., Sacchi E., Lorenzo G., Reznik S.V., Kalinin D.Yu. The largedeployable antenna (LDA). A review of thermal aspects. *Proc. 35th International Conference on Environmental Systems*, 2005, Roma, Italy, July 11–15, 2005, 16 p.
- [3] Kotik A., Usyukin V., Vinogradov I., Arkhipov M. Simulation of reflecting surface deviation of centimeter-band parabolic space radiotelescope (SRT) with the large-size mirror. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2017, 105671A, doi: 10.1117/12.2308118
- [4] Reznik S.V., Denisov O.V., Prosuntsov P.V., Timoshenko V.P., Shulyakovskii A.V. Thermal-vacuum tests of hollow composite rods intended for structures in space. *Polymer Science – Series D*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 242–245, doi: 10.1134/S1995421213030192
- [5] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovsky K.V., Shafikova I.R. Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 153, is. 1, 012012, doi: 10.1088/1757-899X/153/1/012001
- [6] Sayapin S.N., Shkapov P.M. Kinematics of deployment of petal-type large space antenna reflectors with axisymmetric petal packaging. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, vol. 45, no. 5, pp. 387–397, doi: 10.3103/S1052618816050137
- [7] Kwak M. *Microwave curing of carbon-epoxy composites: process development and material evaluation*. London, Imperial College London, 2016. 175 p.
- [8] Teufl D., Zaremba S. 2.45 GHz microwave processing and its influence on glass fiber reinforced plastics. *Materials*, 2018, vol. 11, no. article 838, doi: 10.3390/ma11050838.
- [9] Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S., Basu D. Prospects of microwave processing: An overview. *Bulletin of Materials Science*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 1–13, doi: 10.1007/s12034-009-0001-4
- [10] Guzeva T.A. *Sovershenstvovaniye tekhnologicheskikh rezhimov otverzheniya zagotovok detaley iz organoplastikov pod deystviyem SVCH-izlucheniya*. Kand. Diss. [Improvement of technological modes of curing of workpieces from organoplastics under the action of microwave radiation. Cand. Diss.]. Moscow, 2013. 163 p.
- [11] Reznik S.V., Rummyantsev S.A. A heat mathematical model of polymer composite cylinder during microwave treatment. *Science and Education of BMSTU*, 2014, no. 1, pp. 6–21, doi: 10.7463/0114.0658448
- [12] Mikhaylovskiy K.V., Reznik S.V. Prediction of temperature conditions of the curing process of the binder in the preparation of parts of polymer composite materials using microwave radiation. *Тепловые процессы в технике*, 2014, vol. 6, no. 8, pp. 378–384 (in Russ.).

- [13] Zong L., Zhou S., Sgriccia N., Hawley M.C., Sun R., Kempel L.C. Dielectric properties of an epoxy-amine system at a high microwave frequency. *Polymer Engineering and Science*, 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1576–1580, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.20345>
- [14] Dvorko I.M. Production of polymeric materials and products by curing thermosetting compositions under the influence of electric fields. *Plasticheskie massy*, 1998, no. 8, pp. 16–21 (in Russ.).
- [15] Bankov S.E., Kurushin A.A. *Raschet antenn i SVCH struktur s pomoshch'yu HFSS Ansoft* [Calculation of antennas and microwave structures using HFSS Ansoft]. Moscow, ZAO “NPP “Rodnik” publ., 2009. 256 p.
- [16] Emets Yu.P. Electrical characteristics of three-component dielectric medium. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1998, vol. 87, is. 3, pp. 612–620, doi: 10.1134/1.558701

Статья поступила в редакцию 23.10.2018

Информация об авторах

ПРОСУНЦОВ Павел Викторович — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: prosuntsov@tochka.ru).

РЕЗНИК Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

МИХАЙЛОВСКИЙ Константин Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: konst_mi@mail.ru).

БЕЛЕНКОВ Евгений Сергеевич — инженер-исследователь, АО «Российские космические системы» (111250, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 53 м, e-mail: volna_e@mail.ru).

Information about the authors

PROSUNTSOV Pavel Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Space-Rocket Composite Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: prosuntsov@tochka.ru).

REZNIK Sergey Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Space-Rocket Composite Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

MIKHAILOVSKIY Konstantin Valerievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Space-Rocket Composite Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: konst_mi@mail.ru).

BELENKOV Evgeniy Sergeevich — Research Engineer, AO Russian Space Systems (111250, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53 m, e-mail: volna_e@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Просунцов П.В., Резник С.В., Михайловский К.В., Беленков Е.С. Моделирование прогрева связующего полимерных композиционных материалов с использованием СВЧ-излучения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с., doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-83-92

Please cite this article in English as:

Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsiy K.V., Belenkov E.S. Modeling the Heating of the Binder of Polymeric Composite Materials Using Microwave Radiation. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 12, pp. 83–92, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-83-92