

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=0}^3 (K^{k1n} + K_{11}^{k1n} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + K_{22}^{k1n} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) u_n + \sum_{n=0}^3 K_{12}^{k2n} \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} v_n + \sum_{n=0}^2 K_1^{k3n} \frac{\partial}{\partial \xi} w_n = K^{kq^+} q_{13}^+ - K^{kq^-} q_{13}^-, \\
& \sum_{n=0}^3 K_{12}^{l1n} \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} u_n + \sum_{n=0}^3 (K^{l2n} + K_{11}^{l2n} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + K_{22}^{l2n} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) v_n + \sum_{n=0}^2 K_2^{l3n} \frac{\partial}{\partial \theta} w_n + \\
& + \sum_{j=1}^N \delta(\xi - \xi_j) \left[\sum_{n=0}^3 (K^{lj2n} + K_{22}^{lj2n} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) v_n + \sum_{n=0}^2 K_2^{lj3n} \frac{\partial}{\partial \theta} w_n + (K^{lj2} + K_{22}^{lj2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) v_1^j \right] = K^{kq^+} q_{23}^+ - K^{kq^-} q_{23}^-, \\
& \sum_{n=0}^3 K_1^{s1n} \frac{\partial}{\partial \xi} u_n + \sum_{n=0}^3 K_2^{s2n} \frac{\partial}{\partial \theta} v_n + \sum_{n=0}^2 (K^{s3n} + K_{11}^{s3n} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + K_{22}^{s3n} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) w_n + \\
& + \sum_{j=1}^N \delta(\xi - \xi_j) \left[\sum_{n=0}^3 K_2^{sj2n} \frac{\partial}{\partial \theta} v_n + \sum_{n=0}^2 (K^{sj3n} + K_{22}^{sj3n} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) w_n + K_2^{sj2} \frac{\partial}{\partial \theta} v_1^j \right] = K^{kq^+} q_{33}^+ - K^{kq^-} q_{33}^-, \\
& \sum_{n=0}^3 (K^{12j2n} + K_{22}^{12j2n} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) v_n + \sum_{n=0}^2 K_2^{12j3n} \frac{\partial}{\partial \theta} w_n + (K^{12j2} + K_{22}^{12j2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}) v_1^j = 0,
\end{aligned} \tag{5}$$

где $k=1...4$; $l=5...8$; $s=9...11$; $j=1...N$; K – переменные величины, зависящие от геометрических параметров, материала оболочки и кольцевых ребер; q – нагрузки, действующие на оболочку.

Построенная система дифференциальных уравнений (5) и соответствующие ей граничные условия приводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений методом разложения искомого перемещения и нагрузок в тригонометрические ряды Фурье по окружной переменной θ . Решение дифференциальных уравнений определяется с помощью операционного метода, основанного на преобразовании Лапласа. В результате на основе уточненной теории можно повысить показатели весового совершенства проектируемого объекта.

Список литературы

- 1 **Васильев, В. В.** К проблеме построения неклассической теории пластин / В. В. Васильев, С. А. Лурье // Изв. АН. МТТ. – 1990. – № 2. – С. 158–167.
- 2 **Фирсанов, В. В.** Энергетически согласованный подход к исследованию упругих оболочек произвольной геометрии / В. В. Фирсанов, Чан Нгюк Доан // Вестник МАИ. – 2011. – Т. 18. – № 1. – С. 194–207.
- 3 **Амбарцумян, С. А.** Теория анизотропных оболочек / С. А. Амбарцумян. – М.: Физматгиз, 1961. – 384 с.

УДК 21-039-419:620.22-419:537.868

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВЧ-НАГРЕВА МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА

М. А. БАРУЛИНА,

*Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН),
г. Саратов,*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация

Д. В. КОНДРАТОВ

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН),
г. Саратов,*

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского, Российская Федерация*

Н. В. БЕКРЕНЕВ

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Российская Федерация*

И. В. ЗЛОБИНА

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация*

Полимерные композиционные материалы армированные волокнами, широко применяются в настоящее время в различных отраслях науки и техники [1–4]. Активное использование полимер-

ных композиционных материалов в различных областях техники делает актуальным изучение их свойств как самостоятельных компонентов устройств и их совместную работу с другими деталями, в контакте с которыми детали из композитов находятся во время работы. Одним из механизмов, препятствующих быстрой передаче тепла, является отсутствие монолитности и однородности полимерных композиционных материалов на микроуровне. Соответственно, методы, направленные на повышение адгезионного взаимодействия связующего и наполнителя, могут способствовать выравниванию распространения тепловых полей внутри объекта из композита [3, 5].

Для выяснения тепловых и волновых эффектов, влияющих на композитный материал, как и ранее [6, 7] будем на первом этапе проводить исследования единичного слоя эпоксидной смолы и нескольких графитовых сердечников и выделять критерии построения математической модели исходя из результатов эксперимента (рисунок 1). Таким образом, будем ставить теоретическую задачу на основе результатов эксперимента.

Результаты эксперимента показали, что СВЧ-нагрев опытного образца происходит почти равномерно. Это обеспечивается именно графитовыми сердечниками, которые дополнительно разогревают каждый слой.

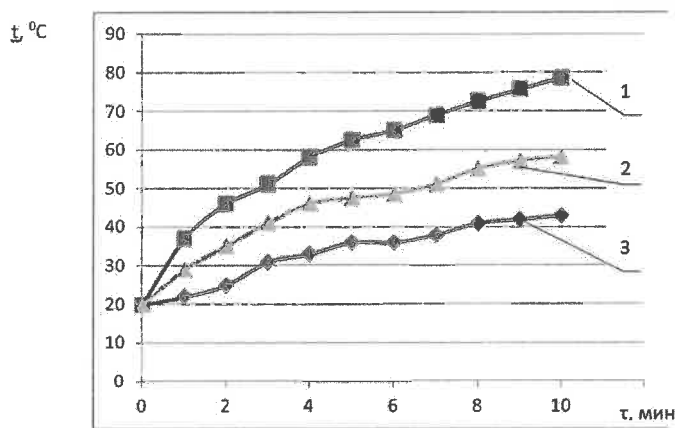


Рисунок 1 – Зависимость температуры поверхности углепластика от времени воздействия СВЧ электромагнитного поля с плотностью потока энергии:

1 – $(45-50) \times 10^4$; 2 – $(17-18) \times 10^4$ 3 – $(10-12) \times 10^4$ мкВт/см²

Исходя из выше сказанного можно сделать следующие выводы для построения математической модели.

1 Единичный слой композитного материала из эпоксидной смолы и нескольких графитовых сердечников может рассматриваться как пластина.

2 Несколько слоев можно рассматривать как соединение пластин, причем ориентация графитовых сердечников пластин может быть под разными углами. Угол может быть задан диапазоне от 0 до 90 градусов.

3 При использовании более двух слоев ориентация сердечников повторяется, а не является хаотичной.

4 Будем считать, что слои имеют идеальный контакт друг с другом.

5 На начальной стадии можно считать мощность СВЧ-излучения постоянной.

6 Разрабатываемая математическая модель может быть построена использованием классических подходов к решению задачи теплопроводности.

7 Распространение тепла по пластине можно считать равномерным.

8 Температура окружающей среды может меняться по заданному закону.

9 На начальной стадии исследования можно не рассматривать процесс плавления или кристаллизации эпоксидной смолы.

Таким образом, на основе результатов эксперимента была предложена математическая модель, которая учитывает предложенные выше принципы, что позволит провести моделирование рассматриваемого композитного материала. Применение композитных материалов повысит надежность и снизит повреждаемость при транспортировке за счет повышения ударной вязкости; повысит долговечность за счет повышенной стойкости к воздействию температурных, химических и механических факторов

внешней среды. Рассматриваемые композитные материалы могут применяться как несущие элементы и внешние панели строительных конструкций (здания и путепроводы, лотки кабелей электроподстанций), каркасные элементы и элементы обшивки авиационной техники; строительные конструкции наземной транспортной инфраструктуры (путепроводы, внешние обшивки сооружений).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-00526.

Список литературы

- 1 Кошкин Р. П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем [Электронный ресурс] / Р. П. Кошкин. – Режим доступа : <http://spmagazine.ru/420>. – Дата доступа : 04.09.2024.
- 2 Каблов, Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е. Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
- 3 Ким, С. Сырье → композиты → углеволокно / С. Ким // The Chemical Journal. – 2014. – С. 64–73.
- 4 Barulina, M. Analytical solution for bending and free vibrations of an orthotropic nanoplate based on the new modified couple stress theory and the third-order plate theory / M. Barulina // Journal of Mathematical and Fundamental Sciences. – 2022. – Vol. 54, no. 1. – С. 11–38. – DOI : 10.5614/j.math.fund.sci.2022.54.1.2.
- 5 Zlobina, I. V. The effect of processing in a SHF electromagnetic field on the parameters of vibro-wave processes generated by the impact of a solid body in cured polymer composite materials under influence of climate factors / I. V. Zlobina // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia. – 2020. – P. 42045.
- 6 Principles of Constructing a Mathematical Model of Thermal Heating of a Composite under Microwave Exposure / D. V. Kondratov [et al.] // II International Scientific and Practical Conference "Technologies, Materials Science and Engineering" AIP Conf. Proc. 2999, 020044-1–020044-6. – DOI : [org/10.1063/5.0158357](https://doi.org/10.1063/5.0158357).
- 7 Study of the Effect of Filler on Heating Kinetics of Polymer Composite Materials in a Mw Electromagnetic Field on a Physical Model of a Unit Cell / I. Zlobina // II International Scientific and Practical Conference "Technologies, Materials Science and Engineering" AIP Conf. Proc. 2999, 020064-1–020064-6. – DOI : [org/10.1063/5.0158848](https://doi.org/10.1063/5.0158848).

УДК 531.383: 532.516

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ВИБРООПОРЫ С ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ

О. В. БЛИНКОВА

Саратовская государственная юридическая академия, Российская Федерация

Д. В. КОНДРАТОВ

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН),
г. Саратов*

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского, Российская Федерация*

Для конструирования современных изделий авиастроения и машиностроения характерно все более частое использование различных слоистых материалов и многослойных упругих конструкций. Многослойные упругие пластины, взаимодействующие с жидкостью, получили свое широкое применение в машино- и агрегатостроении [1–5]. Исследования таких конструкций достаточно широко представлены в современной литературе. Однако большинство исследований ориентировано на описание взаимодействия упругих многослойных конструкций с вязкой несжимаемой или идеальной жидкостью [1, 4, 6, 7]. Следует заметить, что в настоящее время встречаются практические задачи, где жидкость может быть сжимаемой [8]. Данное исследование направлено на моделирование взаимодействия упругой многослойной пластины с вязкой сжимаемой жидкостью.

Рассмотрим физическую модель системы, представленной на рисунке 1. Рассмотрим физическую модель механической системы, состоящую из абсолютно жесткой пластины I (вибратора) и однослойной упругой пластины II (статора), пространство III между которыми заполнено вязкой сжимаемой жидкостью (см. рисунок 1). Внутренняя поверхность вибратора считается плоской и является одной из стенок щелевого канала. Предполагаем, что вибратор имеет упругий подвес. В слое жидкости пульсирует давление, возникают гармонические колебания вибратора в вертикальном направлении относительно статора.