

УДК 629.78

Расчетно-теоретическое определение диэлектрической проницаемости полимерных композиционных материалов методом многомасштабного моделирования. Часть 1. Стеклопластик

П.В. Просунцов, П.В. Польский

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Theoretical and numerical determination of the polymer composite material permeability by the multiscale simulation approach. Part 1. GFRP

P.V. Prosuntsov, P.V. Polskiy

Bauman Moscow State Technical University

Сформулированы этапы гомогенизации полимерного композиционного материала на основе стекловолокна и эпоксидного связующего с использованием многомасштабного моделирования. Разработана математическая модель переноса электромагнитного излучения в полимерном композиционном материале. Сформулированная математическая модель позволяет анализировать влияние стекловолокна на изменение напряженности электрического поля по мере прохождения электромагнитной волны через тело заготовки. Описана математическая модель решения обратной задачи определения гомогенных характеристик материала. Разработана расчетная модель прохождения электромагнитного излучения через представительный элемент объема нити и многослойного пакета стеклопластика. Приведены результаты моделирования напряженности электрического поля в представительном элементе объема пропитанной нити и многослойного пакета стеклопластика. Методом решения обратной задачи определены гомогенные характеристики представительного элемента объема нити и многослойного пакета стеклопластика. Показана достоверность расчетных характеристик путем сравнения с экспериментальными данными (различие не превышало 3 %).

EDN: PBDALZ, <https://elibrary/pbdalz>

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, гомогенные характеристики стеклопластика, диэлектрические характеристики, представительный элемент объема, многомасштабное моделирование, электромагнитное излучение

The paper formulates homogenization stages of a polymer composite material based on fiberglass and epoxy binder using the multiscale simulation. It develops mathematical model of the electromagnetic radiation transfer in a polymer composite material. The formulated mathematical model allows analyzing the fiberglass effect on alteration in the electric field strength, as the electromagnetic wave passes through the workpiece body. The paper describes a mathematical model in solving the inverse problem of determining the material homogeneous characteristics. Calculation model is developed for electromagnetic radiation

passing through the thread volume representative element and the multilayer fiberglass package. Results of simulating the electric field strength in the representative element of the impregnated thread and a multilayer fiberglass package volume are presented. Homogeneous characteristics of the thread volume representative element and the multilayer fiberglass package are determined by solving the inverse problem. The paper demonstrates reliability of the calculated characteristics by comparing them with the experimental data (difference not exceeding 3%).

EDN: PBDALZ, <https://elibrary/pbdalz>

Keywords: polymer composite material, fiberglass homogeneous characteristics, dielectric characteristics, representative volume element, multiscale simulation, electromagnetic radiation

В аэрокосмической промышленности требуются материалы с малой плотностью, способные выдерживать высокие механические и тепловые нагрузки. Такими материалами являются полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1], однако высокая стоимость производства изделий из ПКМ препятствует их широкому применению.

Снизить стоимость производства деталей из ПКМ можно переходом на новые принципы термообработки их заготовок, например, на микроволновое отверждение. Для выбора технологических параметров отверждения необходимы точные модели протекающих теплофизических и электромагнитных процессов. Одной из сложных проблем является определение электрофизических характеристик ПКМ и прежде всего диэлектрической проницаемости, которая тесно связана с его структурой [2].

Цель работы — повышение качества и сокращение времени изготовления изделий из стеклопластика при их отверждении под действием микроволнового излучения на основе многомасштабного мультифизического моделирования процессов распространения электромагнитных волн.

Микроволновые технологии в производстве ПКМ. Полимерные композиционные материалы, армированные стеклянными волокнами, находят все более широкое применение в авиационной технике [3]. По сравнению с традиционными материалами полимерные композиты обладают высокими показателями усталостной и коррозионной стойкости, а также имеют высокое отношение прочности к весу, что позволяет экономить топливо. Как правило, волокна диаметром 6...10 мкм воспринимают основную несущую нагрузку, а окружающая их полимерная матрица действует как среда передачи

нагрузки и удерживает волокна в желаемом положении [4].

Одним из важных этапов производства деталей из ПКМ является тепловая обработка, необходимая для ускорения процесса отверждения связующего и повышения качества детали. Такая обработка, как правило, протекает при высоких температурах в сушильных камерах, если деталь малогабаритная, или в печах для крупногабаритных деталей. Несмотря на простоту, данный метод отверждения связующего имеет недостатки. Во-первых, процесс сопровождается неравномерным нагревом заготовки, что может привести к короблению. Во-вторых, он может длиться десятки часов, потребляя большое количество электроэнергии, тем самым увеличивая стоимость изделия.

Для снижения стоимости производства деталей из ПКМ необходимо перейти на принципиально новые методы отверждения связующего. Одним из перспективных методов является микроволновое излучение сверхвысокой частоты для объемного нагрева связующего с последующим отверждением.

Отечественные и зарубежные исследователи показали [5–12], что использование энергии микроволнового излучения позволяет проводить этап термообработки ПКМ с существенно меньшими затратами времени и энергии, а также улучшить их качество путем повышения однородности температурных полей в заготовках. В литературных обзорах [5–7] приведены достаточно точные физические и математические модели тепловых процессов в заготовке из ПКМ при отверждении под действием микроволнового излучения. В них показано, что процесс отверждения протекает эффективнее на подвижной оснастке.

Большая часть исследований поведения композитов направлена на их напряженно-деформированное состояние, поэтому механи-

ческие характеристики достаточно хорошо изучены.

Среди исследований в области теплофизических процессов, протекающих в заготовках из ПКМ под воздействием микроволнового излучения, следует выделить работу [5], где представлен объемный массив данных, полученных экспериментальным путем, и исследовано влияние ряда технологических параметров на характер отверждения. Описана уникальная установка микроволнового нагрева с рабочей зоной гексаэдральной формы с попеременной схемой включения отдельных магнетронов, что позволяет снизить негативное влияние образующихся в рабочей зоне установки стоячих электромагнитных волн на температурное состояние обрабатываемой заготовки. Однако математические модели поглощения микроволнового излучения и прогрева изделия в работе [5] отсутствуют.

В публикациях [8–10] приведены физические и математические модели процесса микроволнового нагрева изделий из ПКМ, а также результаты экспериментальных исследований их температурного состояния при таком нагреве. Однако необходимо учитывать, что в этих работах принята гипотеза об однородном распределении электромагнитного поля в обрабатываемой заготовке, что не всегда корректно.

На сегодняшний день не разработана универсальная технология отверждения заготовки детали из ПКМ под действием микроволнового излучения, а существующие технологии опираются на опыт и экспериментальные данные. Одна из причин сложности разработки технологии пригодной для широкого применения заключается в том, что композитные заготовки имеют гетерогенную структуру, в каждом конкретном случае отличную от структур других заготовок [13]. Поэтому для повышения точности прогнозирования конечных свойств изделия из ПКМ и отладки технологических параметров тепловой обработки необходимо правильно определить гомогенные характеристики ПКМ.

Для определения гомогенных характеристик материала используют два подхода. Первый основан на результатах эксперимента, второй построен на компьютерном моделировании процесса отверждения заготовки посредством создания физической и математической моделей тепловых и электромагнитных процессов, протекающих в заготовке под действием мик-

роволнового излучения. Первый подход по сравнению со вторым значительно более затратный как по времени, так и финансово, но потенциально получаемые результаты более точны. Второй же требует построения точных физических и математических моделей процессов, протекающих в заготовке, с последующей верификацией результатов.

В простейшем случае гомогенные теплофизические характеристики ПКМ, такие как удельная теплоемкость, определяются с использованием правила смеси и условия равенства количества тепла в гетерогенном представительном элементе объема (ПЭО) ПКМ [13]. Однако как теплопроводность материала, так и электрофизические характеристики ПКМ аналогичным образом получить нельзя ввиду их зависимости от микроструктуры материала.

Поэтому для расчетно-теоретического определения гомогенных диэлектрических характеристик ПКМ использован принцип многомасштабного моделирования с поочередным анализом их изменения при переходе с микроуровня на макроуровень (рис. 1).

По типу взаимодействия с электромагнитным излучением все материалы подразделяют на три группы: поглощающие излучение, отражающие или не взаимодействующие с ним (прозрачные). Однако это разделение условное, так как любой материал в той или иной степени проявляет каждое из описанных свойств. Полимерные связующие относятся к первой группе, т. е. они поглощают электромагнитное излучение и преобразуют его в тепло.

Армирующий компонент ПКМ чаще всего представляет собой угле-, стекло- или органо-волокно. При распространении электромаг-

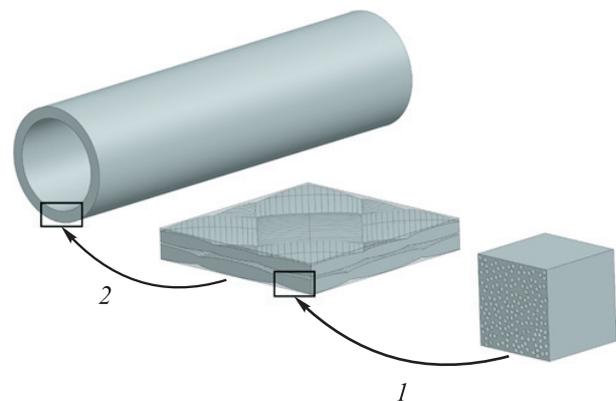


Рис. 1. Уровни анализа ПКМ:
1 — переход с микроуровня на мезоуровень;
2 — переход с мезоуровня на макроуровень

нитного излучения в ПКМ, армированного углеродным волокном, которое является проводником, необходимо учитывать возникающие токи Фуко [14], что усложняет процесс гомогенизации характеристик ПКМ. Поэтому в качестве исследуемого материала выбран ПКМ, армированный стекловолокном. Оно является прозрачным для электромагнитного излучения, а наличие большого количества экспериментальных данных дает возможность верификации получаемых результатов.

Гомогенизация характеристик стеклопластика включает в себя три этапа:

1) определение гомогенных электрофизических характеристик ПЭО нити в виде набора филаментов, окруженных связующим;

2) усреднение характеристик слоя ткани, где каждая из пропитанных нитей представлена однородным материалом с характеристиками из п. 1;

3) определение гомогенных характеристик материала на макроуровне и сравнение их с характеристиками стеклопластика, полученными экспериментальным путем.

Гомогенизация характеристик стеклопластика. Диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемость являются двумя основными параметрами электрофизических характеристик, которые описывают взаимодействие между материалом и электромагнитным полем. Стеклопластик немагнитен, и его магнитная проницаемость равна проницаемости свободного пространства ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г} \cdot \text{м}^{-1}$). В связи с этим наибольший интерес представляет диэлектрическая проницаемость. Так как стеклопластик не электропроводен, его электропроводность принята равной нулю.

Диэлектрические характеристики любого материала можно охарактеризовать комплексной диэлектрической проницаемостью [15]

$$\epsilon = \epsilon'_r(1 - i \operatorname{tg} \delta),$$

где ϵ'_r — действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды; i — мнимая единица; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Диэлектрические характеристики зависят от частоты излучения, проходящего через исследуемый образец материала. В работах отечественных исследователей мало информации о диэлектрических характеристиках стеклопластиков и их компонентов для применяемых в

Таблица 1
Диэлектрические характеристики компонентов стеклопластика

Материал	Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	Тангенс угла диэлектрических потерь
Стекловолокно	6,2000	0,0015
Полимерное связующее	2,7500	0,0167

промышленности частот (2,45 ГГц). При этом зарубежные исследователи приводят эти характеристики для частот X-диапазона (8...12 ГГц). Поэтому для верификации предлагаемой методики определения гомогенных характеристик стеклопластика исследование проводилось для микроволнового излучения с частотой 10 ГГц.

Диэлектрические характеристики компонентов стеклопластика приведены в табл. 1, в качестве матрицы ПКМ рассмотрено эпоксидное связующее [16].

Распространение электромагнитной волны в ПЭО ПКМ описывается уравнениями Гельмгольца [17]

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{H} - \epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \tau^2} &= 0; \\ \nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial \tau^2} &= 0, \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} H_{\tau_1} &= H_{\tau_2}; \quad E_{\tau_1} = E_{\tau_2}; \\ D_{\tau_1} &= \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} D_{\tau_2}; \quad B_{\tau_1} = \frac{\mu_1}{\mu_2} B_{\tau_2}, \end{aligned}$$

где H_{τ_1} и H_{τ_2} — тангенциальные составляющие вектора напряженности магнитного поля связующего (матрицы) и волокна; E_{τ_1} и E_{τ_2} — тангенциальные составляющие вектора НЭП матрицы и волокна; D_{τ_1} и D_{τ_2} — тангенциальные

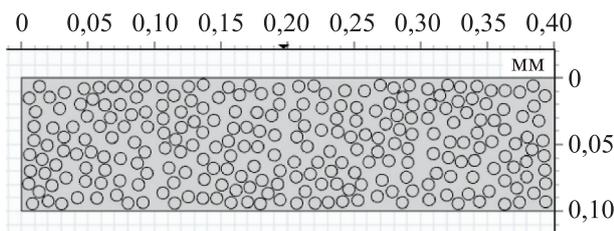


Рис. 2. Распределение филаментов в ПЭО нити стеклопластика, мм

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.

Так как стеклопластик является диэлектрической средой, в уравнении Максвелла плотность электрического тока равна нулю.

Гомогенизация характеристик ПЭО нити. Ввиду того, что вдоль филаментов характер распространения микроволнового излучения практически неизменен, в качестве ПЭО для однонаправленных стеклопластиков применена двумерная модель сечения пучка филаментов диаметром 9 мкм вместе с окружающим его объемом связующего. Для расчетно-теоретического определения характеристик ПЭО стеклопластика необходима информация о количестве филаментов в нити или объемная доля волокна в связующем.

За основу наполнителя выбрана ткань E-Glass производства компании FINAL: именно ее использовали в качестве сырья в работе [16], так как это один из самых распространенных материалов. Объемная доля стеклянных филаментов в нити — 60 %. С помощью программного комплекса Digimat построена геометриче-

ская модель структуры ПЭО. На рис. 2 приведен ПЭО нити размером 400×100 мкм, филаменты в котором распределены в объеме хаотично.

Распространения микроволнового излучения в ПЭО нити можно оценивать по характеру изменения амплитуды волны НЭП. Для отслеживания тенденции ее изменения размер ПЭО вдоль падения волны должен быть больше длины волны. При частоте излучения 10 ГГц достаточно ПЭО высотой 30 мм.

В расчетной модели (рис. 3) до и после ПЭО нити добавлен объем воздушного пространства шириной 30 мм, где отсутствует влияние филаментов на характер изменения микроволнового излучения. Это позволило оценить влияние ПЭО на НЭП. Напряженность входного электрического поля $E = 1 \cdot 10^7$ В/м.

Моделирование распределения НЭП падающей планарной волны проводили в COMSOL Multiphysics. Расчет выполняли с использованием метода конечных элементов (рис. 4).

В результате моделирования распространения распределения НЭП падающей планарной волны получена зависимость, приведенная на рис. 5. Видно, что НЭП меняется скачкообразно вследствие неоднородности структуры ПЭО.

Для нахождения гомогенной диэлектрической проницаемости ПЭО нити использован подход, основанный на решении обратной задачи.

На первом этапе определяли значения НЭП в шести точках, расположенных вне ПЭО. Координаты точек и значения НЭП в них приведены в табл. 2.

Как видно из рис. 5, точки pt1– pt4 расположены в максимумах зависимости НЭП от координаты. Ввиду скачкообразного изменения НЭП в зоне минимумов координаты точек pt1 и pt2 смещены относительно экстремумов.

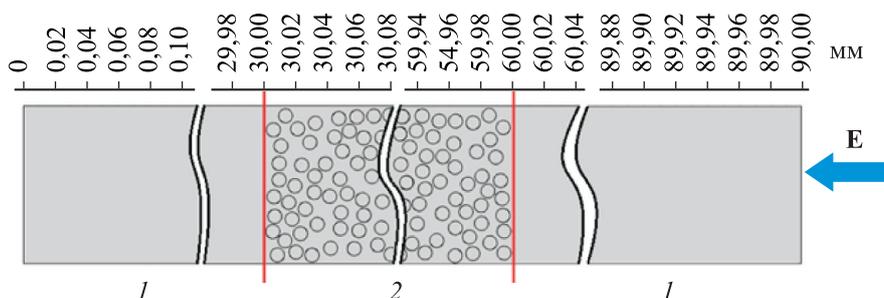


Рис. 3. Расчетная модель ПЭО нити: 1 — воздух; 2 — гетерогенный ПЭО нити

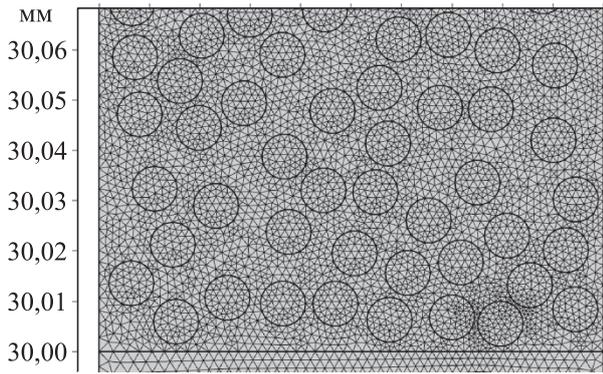


Рис. 4. Фрагмент сетки конечных элементов ПЭО ПКМ

Расчетная модель гомогенного ПЭО нити приведена на рис. 6. Диэлектрическая проницаемость материала представлена в параметрическом виде

$$\epsilon'_r(1 - i \operatorname{tg} \delta).$$

При решении обратной задачи проводили минимизацию суммы квадратов разности значений НЭП, полученных в расчетной модели гомогенного ПЭО нити и по гетерогенной модели (см. табл. 2):

$$S(\epsilon'_r, \operatorname{tg} \delta) = \sum_{i=1}^6 (E_{H_i} - E_{D_i})^2 = \min,$$

где E_{H_i} — расчетные значения НЭП, полученные в модели гомогенного ПЭО нити в точках, координаты которых соответствуют координатам контрольных точек (см. табл. 2), В/м; E_{D_i} — значения НЭП в контрольных точках, В/м.

Искомыми параметрами в обратной задаче являлись параметры ϵ'_r и $\operatorname{tg} \delta$, которые можно определить из уравнения Гельмгольца [17]

$$\epsilon'_r(1 - i \operatorname{tg} \delta) = \frac{\nabla^2 \mathbf{H}}{\epsilon_0 \mu \mu_0 \partial^2 \mathbf{H} / \partial \tau^2};$$

$$\epsilon'_r(1 - i \operatorname{tg} \delta) = \frac{\nabla^2 \mathbf{E}}{\epsilon_0 \mu \mu_0 \partial^2 \mathbf{E} / \partial \tau^2}.$$

При решении обратной задачи для минимизации функционала невязки использован метод Нелдера — Мида.

В результате получены характеристики гомогенного ПЭО нити стеклопластика, приведенные в табл. 3. Изменение НЭП при прохождении гетеро- и гомогенного ПЭО нити стеклопластика показано на рис. 7. Видно, что характер распределения НЭП падающей пла-

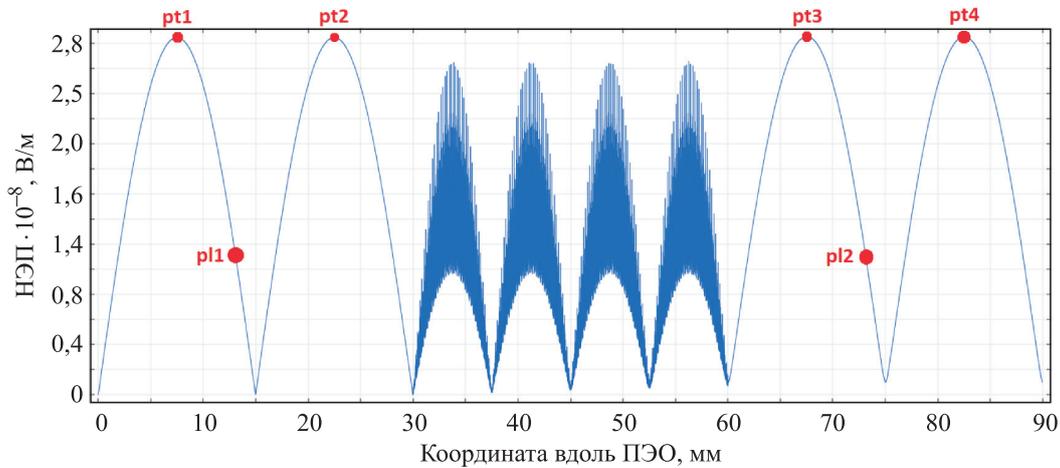


Рис. 5. Изменение НЭП при прохождении гетерогенного ПЭО нити

Таблица 2

Координаты анализируемых точек и значения НЭП в них

Наименование	Координата вдоль ПЭО, мм	НЭП · 10 ⁻⁸ , В/м
pt1	7,5	2,8475
pt2	22,5	2,8475
pt3	72,5	2,8543
pt4	82,5	2,8543
pl1	13,0	1,1533
pl2	73,0	1,1763

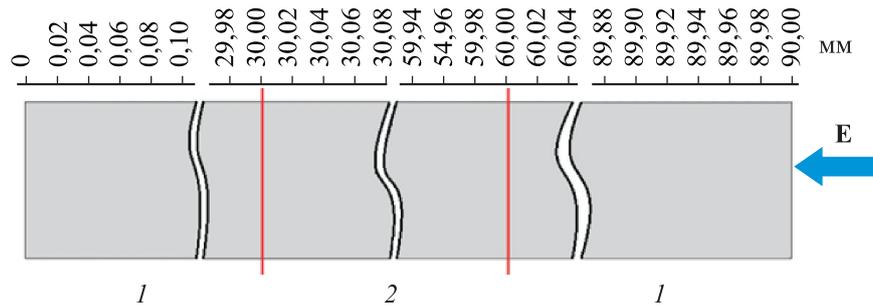


Рис. 6. Расчетная модель гомогенного ПЭО нити:
1 — воздух; 2 — гомогенный ПЭО нити

Таблица 3

Расчетно-теоретические диэлектрические характеристики ПЭО нити гомогенного стеклопластика

Характеристика	Значение
Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	4,02700
Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	0,00930
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,00231

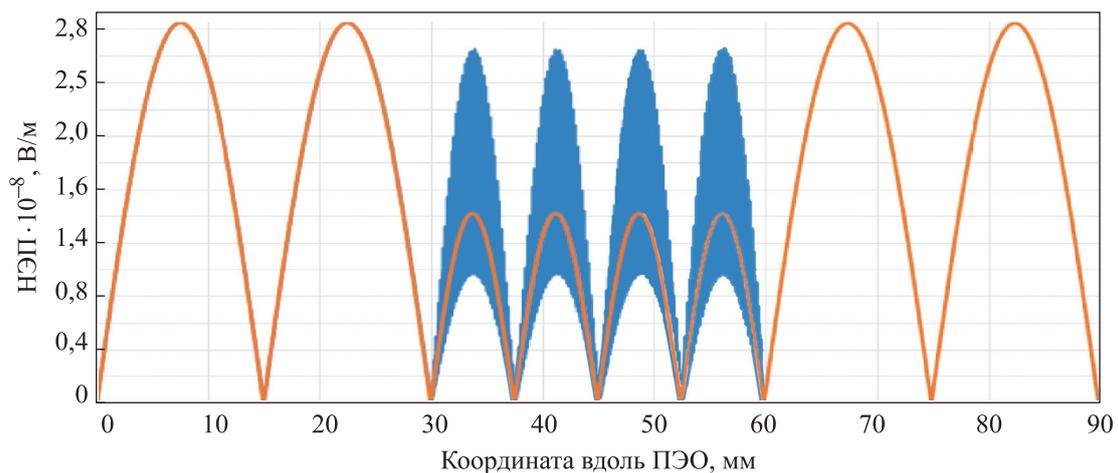


Рис. 7. Изменение НЭП при прохождении гетерогенного (—) и гомогенного (—) ПЭО нити стеклопластика

нарной волны гомогенного материала ПЭО нити с рассчитанными гомогенными диэлектрическими характеристиками стеклопластика в полной мере соответствуют аналогичному распределению для гетерогенного материала.

Гомогенизация характеристик многослойного стеклопластика. При определении эффективной диэлектрической проницаемости многослойного стеклопластика необходимо учитывать влияние полимерного связующего между слоями ткани на характер распространения НЭП.

С помощью программного комплекса Digimat построена геометрическая модель ткани (рис. 8) согласно параметрам материала

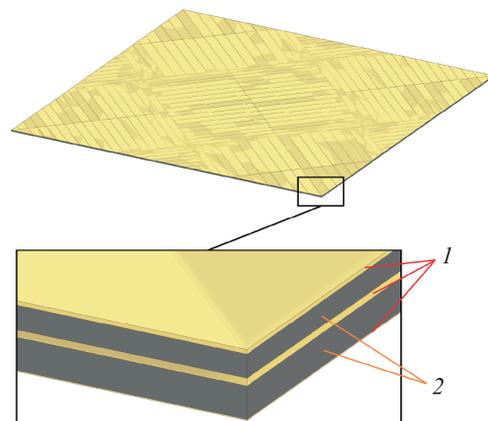


Рис. 8. Геометрическая модель слоев ткани стеклопластика:
1 — полимерное связующее; 2 — слои ткани

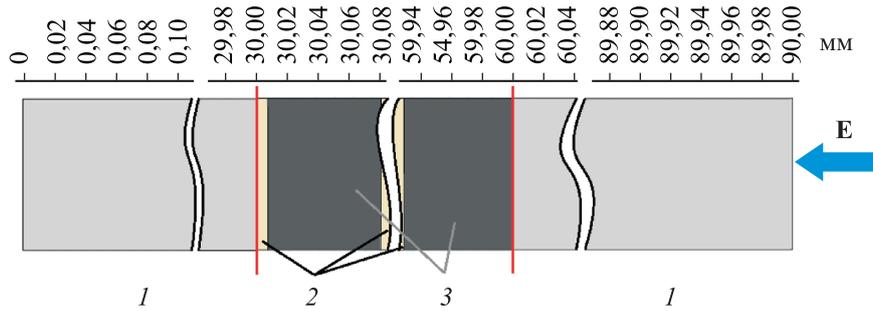


Рис. 9. Расчетная модель ПЭО многослойного стеклопластика:
1 — воздух; 2 — связующее; 3 — стеклоткань

Таблица 4

Диэлектрические характеристики компонентов многослойного стеклопластика

Материал	Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	Тангенс угла диэлектрических потерь
Пропитанная нить	4,02730	0,00231
Полимерное связующее	2,75000	0,01670

E-Glass с габаритными размерами 44×44 мм при ширине утка 22 мм и толщине 0,08 мм. Укладка ткани [+45°, -45°].

Ввиду чрезвычайно малой толщины слоя по сравнению с его длиной разбиение на конечные элементы стало неэффективным. Поэтому модель была переведена в плоскую постановку, а каждый слой ткани и связующего заменен на прямоугольник с рассчитанной средней толщиной для соответствующего слоя (рис. 9).

Два слоя ткани с учетом связующего между ними имеют толщину около 0,17 мм, чего явно недостаточно для отслеживания тенденции изменения в них НЭП. В связи с этим, как и ранее, потребовалось увеличить толщину исследуемой зоны. Поэтому в расчетной модели рассматривался многослойный пакет с чередующейся ориентацией слоев ткани [+45°, 45°, ... , -45°] суммарной толщиной 30 мм. Также были добавлены объемы воздушного пространства высотой 30 мм с каждой из сторон пакета.

Диэлектрические характеристики компонентов многослойного стеклопластика приведены в табл. 4. Рассмотрена композиция из эпоксидного связующего и нитей (см. табл. 3).

В результате моделирования распространения электромагнитной волны через исследуемую модель многослойного стеклопластика построена зависимость НЭП падающей планарной волны в гомогенном материале и многослойном стеклопластике от длины пути (рис. 10). Видно, что полученные данные по ди-

электрическим характеристикам гомогенного стеклопластика соответствуют таковым для многослойного пакета.

С помощью описанного подхода определения эффективных диэлектрических характеристик стеклопластика получены диэлектрические характеристики гомогенного стеклопластика, приведенные в табл. 5.

Для верификации полученных данных использована работа [16], где приведена действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости стеклопластика, найденная экспериментальным путем. Результаты сравнения значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости среды стеклопластика, полученных экспериментальным и расчетно-теоретическим путями, приведены в табл. 6. Видно, что определенная расчетно-теоретическим путем диэлектрическая характеристика стеклопластика незначительно

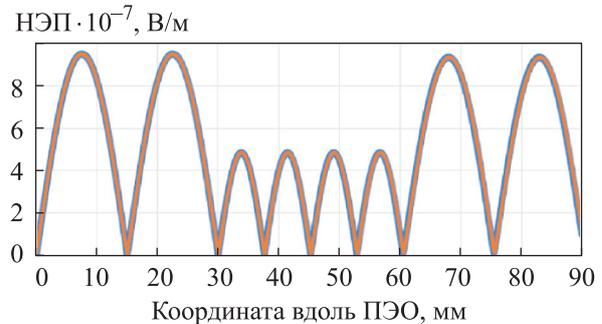


Рис. 10. Изменение НЭП падающей планарной волны при прохождении гетеро- (—) и гомогенного (—) ПЭО стеклопластика

Таблица 5

Диэлектрические характеристики гомогенного стеклопластика

Характеристика	Значение
Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	3,853200
Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	0,014620
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,003794

Таблица 6

Диэлектрические характеристики стеклопластика, полученные разными методами исследования

Метод исследования	Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	Погрешность, %
Экспериментальный	3,75	–
Расчетно-теоретический	3,85	2,7

отличается от данных, полученных экспериментальным путем.

Вывод

Предложена расчетно-теоретическая методика определения диэлектрической проницае-

мости ПКМ методом многомасштабного моделирования, основанная на численном моделировании прохождения электромагнитного излучения через ПКМ и на решении обратной задачи. Выполнена верификация полученных результатов.

Литература

- [1] Zimin V.N., Koloskov I.M., Meshkovsky V.E. et al. Investigation of natural oscillations for self-deployable truss space antennae. *Computational Engineering*, 2001, vol. 30, pp. 497–504.
- [2] Kotik A., Usyukin V., Vinogradov I. et al. Simulation of reflecting surface deviations of centimeter-band parabolic space radiotelescope (SRT) with the large-size mirror. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 105671, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2308118>
- [3] Soutis C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, vol. 412, no. 1–2, pp. 171–176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.064>
- [4] Mallick P.K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC Press, 2007. 638 p.
- [5] Kwak M. *Microwave curing of carbon-epoxy composites: process development and material evaluation*. Doctoral thesis. London, Imperial College London, 2016. 175 p.
- [6] Teufl D., Zaremba S. 2.45 GHz microwave processing and its influence on glass fiber reinforced plastics. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 5, art. 838, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11050838>
- [7] Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S. et al. Prospects of microwave processing: an overview. *Bull. Mater. Sci.*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>
- [8] Гузева Т.А. *Совершенствование технологических режимов отверждения заготовок деталей из органических полимеров под действием СВЧ-излучения*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 166 с.
- [9] Резник С.В., Румянцев С.А. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве. *Наука и образование. Научное издание*, 2014, № 1. URL: <http://engineering-science.ru/doc/658448.html>
- [10] 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.
- [11] Zong L., Zhou S., Sgriccia N. et al. Dielectric properties of an epoxy-amine system at a high microwave frequency. *Polym. Eng. Sci.*, 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1576–1580, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.20345>
- [12] Дворко И.М. Получение полимерных материалов и изделий отверждением терморезактивных композиций под действием электрических полей. *Пластические массы*, 1998, № 8, с. 16–21.
- [13] Просунцов П.В., Резник С.В., Михайловский К.В. и др. Моделирование прогрева связующего полимерных композиционных материалов с использованием СВЧ-излучения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с. 83–92, doi <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-12-83-92>
- [14] Ковтун В.А. Особенности формирования гетерогенной структуры поглотителей энергии СВЧ-излучения на основе полимерных композитов. *Научни известия на НТСМ*, 2016, т. 24, № 1, с. 60–64.
- [15] Krupka J. Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, vol. 17, no. 6, art. R55, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/6/R01>
- [16] Li Z., Haigh A., Soutis C. et al. Dielectric constant of a three-dimensional woven glass fibre composite: analysis and measurement. *Compos. Struct.*, 2017, vol. 180, pp. 853–861, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.061>
- [17] Емец Ю.П. Электрические характеристики трехкомпонентной диэлектрической среды. *ЖЭТФ*, 1998, т. 114, № 3, с. 1121–1136.

References

- [1] Zimin V.N., Koloskov I.M., Meshkovsky V.E. et al. Investigation of natural oscillations for self-deployable truss space antennae. *Computational Engineering*, 2001, vol. 30, pp. 497–504.
- [2] Kotik A., Usyukin V., Vinogradov I. et al. Simulation of reflecting surface deviations of centimeter-band parabolic space radiotelescope (SRT) with the large-size mirror. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 105671, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2308118>
- [3] Soutis C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, vol. 412, no. 1–2, pp. 171–176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.064>
- [4] Mallick P.K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC Press, 2007. 638 p.
- [5] Kwak M. *Microwave curing of carbon-epoxy composites: process development and material evaluation*. Doctoral thesis. London, Imperial College London, 2016. 175 p.
- [6] Teufl D., Zaremba S. 2.45 GHz microwave processing and its influence on glass fiber reinforced plastics. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 5, art. 838, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11050838>
- [7] Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S. et al. Prospects of microwave processing: an overview. *Bull. Mater. Sci.*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>
- [8] Guzeva T.A. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh rezhimov otverzheniya zagotovok detaley iz organoplastikov pod deystviem SVCh-izlucheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of technological modes of curing of organoplastic parts blanks under the action of microwave radiation. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 166 p. (In Russ.).
- [9] Reznik S.V., Rumyantsev S.A. A heat mathematical model of polymer composite cylinder during microwave treatment. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 1. URL: <http://engineering-science.ru/doc/658448.html> (in Russ.).
- [10] Mikhaylovskiy K.V., Reznik S.V. Prediction of temperature regimes of the process of binder curing at obtaining parts from polymer composite materials with the help of microwave radiation. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2014, vol. 6, no. 8, pp. 378–384. (In Russ.).

- [11] Zong L., Zhou S., Sgriccia N. et al. Dielectric properties of an epoxy-amine system at a high microwave frequency. *Polym. Eng. Sci.*, 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1576–1580, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.20345>
- [12] Dvorko I.M. Production of polymeric materials and products by curing thermosetting compositions under the action of electric fields. *Plasticheskie massy*, 1998, no. 8, pp. 16–21. (In Russ.).
- [13] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhaylovskiy K.V. et al. Modeling the heating of the binder of polymeric composite materials using microwave radiation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2018, no. 12, pp. 83–92, doi <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-12-83-92> (in Russ.).
- [14] Kovtun V.A. Features of formation of heterogeneous structure of energy absorbers of microwave radiation based on the polymeric composites. *Nauchni izvestiya na NTSM* [Scientific Proceedings NDT Days], 2016, vol. 24, no. 1, pp. 60–64. (In Russ.).
- [15] Krupka J. Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, vol. 17, no. 6, art. R55, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/6/R01>
- [16] Li Z., Haigh A., Soutis C. et al. Dielectric constant of a three-dimensional woven glass fibre composite: analysis and measurement. *Compos. Struct.*, 2017, vol. 180, pp. 853–861, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.061>
- [17] Emets Yu.P. Electrical characteristics of three-component dielectric media. *ZhETF*, 1998, vol. 114, no. 3, pp. 1121–1136. (In Russ.). (Eng. version: *J. Exp. Theor. Phys.*, 1998, vol. 87, no. 3, pp. 612–620, doi: <https://doi.org/10.1134/1.558701>)

Статья поступила в редакцию 14.12.2023

Информация об авторах

ПРОСУНЦОВ Павел Викторович — доктор технических наук, 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: pavel.prosuntsov@mail.ru).

ПОЛЬСКИЙ Павел Вадимович — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pvpolskiy@gmail.com).

Information about the authors

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

POLSKIY Pavel Vadimovich — Postgraduate, Department of Aerospace Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pvpolskiy@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Просунцов П.В., Польский П.В. Расчетно-теоретическое определение диэлектрической проницаемости полимерных композиционных материалов методом многомасштабного моделирования. Часть 1. Стеклопластик. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 8, с. 114–124.

Please cite this article in English as:

Prosuntsov P.V., Polskiy P.V. Theoretical and numerical determination of the polymer composite material permeability by the multiscale simulation approach. Part 1. GFRP. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 8, pp. 114–124.