

УДК 67.09.55

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-108-118

Оптимальное моделирование композитных материалов с заданными свойствами

В. И. Кучерюк, кандидат технических наук, профессор,
Тюменский государственный институт культуры, Тюмень, Россия
И. В. Шаптала, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
Н. А. Спиридонова, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Сферы применения композиционных материалов становятся всеобъемлющими: от товаров народного потребления до космической индустрии. В то же время вопрос разработки способов проектирования композиционных материалов различного назначения является актуальным и в настоящее время. Область совершенствования проектирования, по мнению авторов, лежит в возможности более широкого применения компьютерных программ на этапе математического моделирования материала, проведенного с учетом всех его особенностей. В данной статье предложен вариант моделирования процесса создания композитного материала (КМ). Моделирование основано на многофакторной оптимизации. Учтены следующие факторы: назначение элемента конструкции, геометрические размеры, технологические и эксплуатационные требования, а также различные виды ограничений и воздействий. Компьютерная реализация выполняется в программной среде «MATLAB+Simulink». Представлен краткий обзор литературы с анализом применяемых материалов, технологий изготовления КМ, оценки адгезии компонентов КМ, приведены формулы оценки прочности, подтвержденные экспериментом; вводится оценка срока эксплуатации, основанная на кинетической теории прочности. Моделирование композита осуществлено с помощью стратифицирования, при котором высшей стратой является микроуровень, а низшей – макроуровень. Составлена формула, управляющая моделированием КМ. По структурной схеме моделирования даны рекомендации по работе в среде MATLAB в диалоговом режиме и в блочном варианте Simulink. Использование систем компьютерной математики для описания модели композиционного материала позволит уменьшить объем экспериментальных работ как по стоимости, так и по времени. В моделировании может быть полностью учтена специфика производства и эксплуатации изделия из композиционного материала.

Ключевые слова: композитный материал, моделирование композитного материала, многофакторная оптимизация, MATLAB, Simulink.

Введение

Создание КМ связано с трудоемкостью и затратами как по времени, так и по стоимости работы. Целью нашей работы является математическое моделирование КМ с компьютерной реализацией.

Математическое моделирование, оптимальное проектирование

Свойства материалов определяются характеристиками: механическими: σ_{pr} – предел пропорциональности, σ_e – предел упругости, σ_y – предел текучести, σ_{ut} – предел прочности при растяжении, σ_{uc} – предел прочности при сжатии, σ_{adm} – допускаемое напряжение, σ_p – предел выносливости, $\frac{\sigma_{ut}}{\gamma}$, $\frac{\sigma_{uc}}{\gamma}$, $\frac{\sigma_p}{\gamma}$ – удельная прочность, где γ – удельный вес, ϵ_r – остаточная деформация, ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, G – модуль сдвига, τ_B – предел прочности при срезе, τ_1 – предел выносливости при кручении, HB – твердость по Бри-

неллю; физическими: ρ – плотность, α – температурный коэффициент линейного расширения, λ – теплопроводность, c – удельная теплоемкость, $T_{пл}$ – температура плавления, R – электрическое сопротивление, B – максимальная магнитная индукция, μ_B – магнитная проницаемость возврата.

Предельные рабочие температуры для разных материалов приведены в [1]. Для климатических зон с низкими температурами имеет значение хладостойкость металлов. В [2] приведена таблица для сталей с рабочими отрицательными температурами. Пластмассы с позиции воздействия температур делятся на термопласты и реактопласты. Реактопласты применяют при температурах до +130 °С. Рабочие температуры для термопластов от –60 до +180 °С. В [3] приведены рабочие температуры для пластмасс от «–» до «+».

Коррозия – разрушение материалов под химическим или электрохимическим воздействием окружающей среды. Коррозия металлов – окислительно-восстановительная реакция.

Коррозия имеет три признака: химический процесс (окислительно-восстановительный); неустойчивость термодинамической системы – металл и компоненты окружающей среды; процесс, развивающийся на поверхности металла. Оксидные пленки (сплошные) частично защищают металл от коррозии.

Сплошность пленки оценивают по величине фактора Пиллинга – Бэдвордса:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2}, \quad (1)$$

где V_1 – объем образовавшегося оксида, V_2 – объем металла, израсходованного на образование оксида.

При $\alpha < 1$ пленки не являются сплошными. При $1 < \alpha < 2,5$ пленка сплошная и защищает от коррозии. При $\alpha > 2,5$ условие сплошности не соблюдается.

В работе [4] представлена таблица для металлов с коэффициентом α при химической коррозии. Кислотостойкими в различной степени являются углеродистые стали, чугуны, содержащие больше 2,5 % углерода, титан, кварцит, каменное литье из диабаза и базальтов, силикатное стекло (за исключением плавиковой кислоты), легированные стали, содержащие молибден, хром, никель, марганец, благородные металлы.

В разной степени стойкими к щелочным средам являются чугуны, углеродистая сталь, сплавы меди. Стойкость нержавеющей сталей при температуре 10–70 °С к щелочным средам указана в (Юсеф Хелми, А. Обработка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов: традиционные и нетрадиционные методы. Египет, Александрия. Александрийский университет, 2016. 278 с.). Стойкость керамических изделий к щелочным средам указана в [5]. В горячих и холодных щелочных растворах устойчивы полипропилен, фторопласт, полиэтилен, полиизобутилен. Также устойчивы к этим средам кварцевые и многокомпонентные стекла, содержащие окись цинка.

Величина водопроницаемости определяется формулой

$$K_B = \frac{O_B \delta}{FZ}, \quad (2)$$

где O_B – количество воды, фильтрующейся через образец за время Z , δ – толщина образца, F – площадь образца. Большинство материалов водо- и воздухонепроницаемы. Проницаемость материалов связана с пористостью, которая определяется по формуле

$$П = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_v}\right) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где ρ_t – истинная плотность образца, $\rho_v = \frac{m}{v}$, m – масса образца с порами, v – объем образца с порами.

При длительном механическом нагружении в материалах происходят физико-химические процессы, приводящие к ползучести и релаксации. Ползучесть в пластмассах проявляется уже при комнатной температуре, а в металлах при повышенной. В результате ползучести снижаются механические характеристики. Ползучесть и релаксация отрицательно проявляются в статически неопределимых системах. К снижению механических характеристик также приводит старение материала.

КМ представляют собой сплошное неоднородное вещество, состоящее из двух или более компонентов с четкой границей раздела между ними. Последним этот материал отличается от сплавов.

Классическое представление композита, состоящего из двух компонентов: матрица и наполнитель (упрочнитель). Матрица занимает больший объем всего композита. В настоящее время это понятие имеет смысл расширить, так как матрица может быть составной. Обычно матрицу или упрочнитель первое время представляли в виде одного элемента, например углерода, железа, пластмассы и т. д. Наполнитель может иметь различную геометрическую форму (шар, цилиндр и т. д.).

Классификации КМ по различным признакам (структуре, технологии изготовления, методам расчета и т. д.) представлены в работах [6] и (Кучерюк В. И., Шатайлова Н. В. Классификация и оптимизация управляемых композитных материалов // Сборник докладов IX Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. СПб, 2015. С. 142–147).

На свойства и характеристики существенное влияние оказывают технологические процессы изготовления как компонентов, так и композита в целом.

Из вышеприведенной информации следует, что композит представляет многофакторную систему, поэтому воспользуемся терминологией работы (Бормотов А. Н., Кузнецова М. В., Колобова Е. А. Методологические принципы математического моделирования композиционных материалов // Вестник Брянского государственного технического универ-

ситета. 2013. Т. 2, № 38. С. 85–94) при моделировании композитных материалов – стратифицирование, при котором высшей стратой является микроуровень, а низшей – макроуровень. Одним из важных вопросов прочности является адгезия.

Адгезией называется сцепление поверхностей двух тел. Она обусловлена межмолекулярным взаимодействием (Ван-дер-Вальсовым, полярным, иногда диффузией) и характеризуется удельной работой для разделения поверхностей.

Сцепление внутри вещества называется когезией. Связь между однородными конденсированными телами при молекулярном контакте называют аутогезией. Адгезия определяется термодинамической работой сил, направленных на отрыв поверхностей на границе раздела двух соседних компонентов КМ.

Адгезионная прочность зависит от смачиваемости/несмачиваемости жидкостью компонентов при изготовлении, поверхностного натяжения, сил трения, различных дефектов, остаточных напряжений.

Известны следующие теории адгезионной прочности: механическая – жидкий компонент затекает в поры твердого компонента, образуя аналог «заклепочного» соединения; адсорбционная; электрическая; электронная; диффузионная; релаксационная; химическая.

Существуют два варианта смачивания: имерсионное и контактное. Имерсионное смачивание происходит при упрочнении матрицы порошком – это дисперсно-упрочненные КМ. Контактное смачивание определяют краевым углом θ [7], $0 < \theta < 90^\circ$ – твердая поверхность смачивается; $\theta > 90^\circ$ – плохая смачиваемость; $\theta \rightarrow 0^\circ$ – растекание.

Смачивание происходит с выделением тепла. Результатом анализа первой страты является работа (потенциальная энергия) по разъединению элементов в пограничной области – энергия Гиббса. Многие предлагаемые формулы для определения работы разделения соответствуют напряжениям в граничной области только при практически статической нагрузке.

Перейдем к низшей страте – макроуровню КМ. В [8] рассмотрен феноменологический подход к разрушению КМ. Приводим формулу из этого источника для оценки прочности КМ (по теории тах напряжений):

$$\sigma_x \leq \min \left[\begin{array}{c} \frac{X}{\cos^2(\theta) - \nu_{12} \sin^2(\theta)}; \\ \frac{Y}{\sin^2(\theta) - \nu_{21} \cos^2(\theta)}; \\ \frac{S}{\sin(\theta) \cos(\theta)} \end{array} \right], \quad (4)$$

где σ_x – действующее напряжение; X, Y – предел прочности при растяжении в направлении осей симметрии КМ; S – предел прочности при сдвиге; ν_{12}, ν_{21} – коэффициенты поперечной деформации; θ – угол направления нагрузки с осью симметрии. Также в данном источнике приведены графики сопоставления результатов по формуле (4) и эксперимента. Отмечено хорошее согласование для КМ, армированных волокнами в одном направлении. В работе [9] приведен анализ различных критериев прочности для волокнистых композиционных материалов.

Существует значительное количество монографий и статей, в которых используется феноменологический подход к расчету конструкций из КМ, в частности по допускаемым напряжениям. Представляет интерес работа [10] по моделированию напряженно-деформированного состояния строительного элемента, усиленного КМ.

Важной эксплуатационной характеристикой для материала является долговечность. При этом имеет значение не большая долговечность, а плановая с учетом прогноза развития науки и техники; например, легковые автомобили рекомендуется использовать 5–7 лет. Значительное развитие получила кинетическая прочность, основанная на термофлуктуационном явлении в связях при рассмотрении микроуровня вещества. Представляет интерес для определения срока службы изделия τ в зависимости от действующего нормального напряжения σ и температуры T формула, приведенная в (Регель В. Р., Слущкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М. : Наука, 1974. 560 с.):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \right), \quad (5)$$

где τ_0, γ – характеристики прочностных свойств твердого тела; U_0 – начальная энергия активации разрушения; R – постоянная Больцмана. Из (5) можно получить напряжение

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left[U_0 - RT \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right]. \quad (6)$$

Для твердых тел $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с. Поскольку экспериментальные исследования показывают, что разрушения происходят в пограничном (адгезионном) слое, τ_0, U_0, γ определяют экспериментально на образцах для уточнения долговечности τ и напряжений σ в формулах (5), (6). Также в указанном источнике отмечено, что отклонения от (5), (6) происходят при малых σ , при нестабильном состоянии, при очень низких температурах. В последнем случае необходимо использование квантовой теории разрушения.

Приводим формулу оптимизации

$$k_k = \frac{\sigma_B}{\gamma}, \quad (7)$$

где σ_B – предел прочности КМ, γ – стоимость КМ с учетом транспортных расходов, γ – удельный вес КМ. Выбрав по условию $k_k = \min$ два – четыре варианта, уточняем свойства и характеристики экспериментально на образцах из КМ.

Оптимальный выбор структурного варианта КМ также зависит от вида конструкционной системы – стержневая, тонкостенная, массивное тело.

Классические структуры вариантов КМ: дисперсно-упрочненные, волокнистые, многослойные, комбинированные. Выбор зависит от характера напряженно-деформированного состояния. Дисперсно-упрочненные целесообразнее использовать при трехмерном напряженном состоянии. Для этого варианта КМ усредненный модуль упругости определяется по формуле из (Кучерюк В. И., Иванов В. А., Белова О. Ю., Чемакин Н. П. Расчет тонкостенных конструкций объектов нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра, 1996. 288 с.) и (Kucheryuk V.Y., Umanskaya O. Y., Krivchun N. A. Mathematical modeling of the calculation of the stiffness characteristics of composite materials // Function Materials and Processing Technologies II. Key Engineering materials. Edited by Ha-sing-Kong. 2018. 771 p.):

$$E = \frac{E_M V_M + E_y V_y}{V_M + V_y}, \quad (8)$$

где E_M, V_M, E_y, V_y – модули упругости, объем матрицы и упрочнителя соответственно.

Упрочнение выполняется различными по геометрической форме частицами. В зависимости от разматов частиц КМ может быть с нано-, микро- и макроупрочнением. 3d-технологии с применением аддитивных машин позволяют создавать материал с помощью функции, управляющей распределением частиц согласно фор-

мулы (8) и характера напряженно-деформированного состояния. Такой подход позволяет получить изделия с высокой удельной прочностью. Основную нагрузку, как правило, воспринимает матрица. К этому материалу можно применять различные технологии: прессование, механическая обработка, термообработка, композиционное покрытие.

Следующая группа КМ – волокнистые. В матрицу внедряются волокна, имеющие различную геометрическую форму: поперечное сечение – круглое, треугольное, прямоугольное, полые. Также используются волокна в виде нити и ленточные, длинные волокна и прерывистые. По расположению волокна могут быть одноосные, двухосные, трехосные (сетки); плоские, пространственные, хаотичные. В зависимости от используемых материалов, соотношения объемов материала основную нагрузку может воспринимать как матрица, так и волокна.

Матрица обеспечивает совместную работу волокон. Механические свойства волокнистых КМ определяются тремя основными параметрами: прочностью волокон, жесткостью матрицы и прочностью адгезии на границе матрицы и волокон.

Адгезия может нарушаться при температурном воздействии в силу существенного различия коэффициентов линейного расширения матрицы и волокон, а также при усадке компонентов КМ. Разрушения чаще начинаются с нарушения связей на границе компонентов. Модуль упругости E для КМ в первом приближении можно определить по формуле (8) либо при изгибе и кручении элементов конструкции более точно по формулам из (Расчет тонкостенных конструкций объектов нефтяной и газовой промышленности / В. И. Кучерюк, В. А. Иванов, О. Ю. Белова, Н. П. Чемакин. М.: Недра, 1996. 288 с.).

Положительные стороны волокнистых КМ целесообразно использовать для тонкостенных систем, как плоских, так и пространственных в сравнении с дисперсно-упрочненными. К отрицательным сторонам относится во многих случаях механическая обработка, которая ухудшает механические характеристики. В качестве исключения можно привести ДВП и ДСП. Температурные воздействия и циклические нагрузки для многих КМ приводят к появлению разрушения в зоне контакта матрицы и волокон. Получили распространение слоистые (многослойные) КМ. Слоистые КМ классифицируют по следующим признакам: геометрическим (листы толщиной 10 мм и более, фольга – 0,5–1 мм,

пленка 0,05 мм), по назначению, по технологии изготовления. Для изготовления слоистых КМ применяют дерево, полимеры, металлы, керамику, клеи – фенолоформальдегидные, эпоксидные и другие. Эти КМ получили распространение в тонкостенных конструкциях, они хорошо сопротивляются усталостным разрушениям, что экспериментально подтверждено в работе (Сухарев И. П., Кучерюк В. И. Никитина Л. И. Усталостная прочность при изгибе плоских двухслойных клееных обшивок из алюминиевого сплава АК-1-Т1 с имитацией повреждения в одном слое // Вопросы прочности, надежности и механики машин, процессов и изделий текстильной и легкой промышленности : сборник трудов РЗИТЛП. Вып. 3. М., 1992. С. 16–24). Трещины, возникшие в каком-либо слое, мгновенно не растут, а прерываются на клеевом соединении. Для многих деталей и конструкций представляют интерес комбинированные КМ, в которых используются упрочненные матрицы, волокна и слои.

Главную роль в прочности КМ играет пограничная адгезия. Ранее уже было описано, от чего зависит качество адгезии, тем не менее приведем результаты работы [11]. Межфазное взаимодействие на границе сред зависит от термодинамической, кинематической, химической и механической совместимостей. Термодинамическое взаимодействие – свойство матрицы, армирующих элементов и других компонентов находиться в термодинамическом равновесии в процессе формирования и эксплуатации КМ. Кинетическая совместимость – свойство компонентов находиться в метастабильном (равновесном регулируемом) протекании процессов, адсорбции, диффузии или химической реакции между компонентами КМ. Механическая совместимость характеризуется деформационными процессами, в том числе ползучестью и релаксацией, коэффициентами расширения компонентов, степенью близости параметров так, чтобы не нарушилась целостность КМ при изготовлении и эксплуатации.

Связи бывают механические, физические и химические. Механические связи возникают при трении от созданных неровностей контактирующих поверхностей, внедрения в другой элемент шпилек, например сталебетон. Физические связи – межмолекулярное взаимодействие двух соседних сред: электрическое, магнитное, гравитационное. Химические связи обусловлены соединением атомов и ионов в молекулы, кристаллы, дислокации соседних компонентов. Химические связи бывают следующих видов:

металлические, ковалентные и молекулярные. В реальных КМ могут в разной степени быть все три вида. Смачивание упрочнителя расплавом или раствором связующего (матрицы) играет существенную роль при изготовлении композиционных материалов (КМ).

В [12] приведен критерий термодинамического смачивания:

$$W_a - \sigma_{ЖТ} > 0, \quad (9)$$

где W_a – работа по разрушению связей, $\sigma_{ЖТ}$ – поверхностное натяжение на границе.

Выбор технологии влияет на стоимость изготовления КМ, его прочность, вес, стойкость против внешних воздействий и эксплуатационные качества.

Технологию изготовления изделий из КМ разделим на три группы: изготовление компонентов КМ, изготовление КМ и доработка сформированного изделия из КМ. Рассмотрим технологии изготовления компонентов КМ: матрицы, порошков, волокон и наполнителей разной геометрии. Матрицы могут быть металлические, полимерные, керамзитовые, углеродные, стеклянные. Матрицы, в отличие от других компонентов КМ, изготавливаются чаще одновременно с изготовлением КМ и изделия. В некоторых случаях КМ изготавливают отдельно, например бетон.

Для металлических матриц чаще используют следующие металлы: черные, цветные, легкие сплавы. В жаропрочных КМ для матриц применяют алюминий и его сплавы, сплавы магния, титан, сплавы на основе никеля. Титановые и магниевые сплавы уступают по технологичности алюминию. В работе [13] приведены варианты технологий изготовления матриц совместно с другими компонентами КМ.

Применяются следующие методы технологий для матриц с компонентом: химические и электрохимические; газовые и паровые; жидкофазные; твердофазные; 3D-печати; порошковая металлургия.

После изготовления КМ используют прессование и термообработку как по всему объему, так и по поверхности, например для нанесения покрытий. Для многослойных КМ применяется напыление.

Широкое распространение получили полимерные матрицы. Исходными для полимерных матриц являются полимеры в виде порошков, гранул, препрега рулонного или пакетов.

При изготовлении полимерных матриц применяют следующие технологии: литье, осаждение, напыление, контактно-вакуумное и автоклавное формование, смешение порошкообраз-

ных и гранулированных полимеров с последующим прессованием, инъекцию, добавление для изменения свойств эластомеров, пластификаторов, отвердителей, красок, инициаторов полимеризации, стабилизаторов, ингибиторов, растворителей.

КМ с керамзитовой матрицей являются термостойкими, химически инертными и достаточно прочными. Исходным материалом для керамзитовых матриц являются природные, искусственные и техногенные (отходы производства) материалы. Используют глинистые грунты, морской и речной песок, кремний-органические полимеры (силикон), высококремнеземные стекла, состав «золь-гель» типа SiC-SiC и C-SiC, порошки SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, отходы при переработке и обогащении руд. Для изготовления керамзитовых матриц применяют следующие технологии: изготовление порошков, таблетирование и прессование с последующей термообработкой, изготовление гранул в полимерной оболочке, химические технологии, добавление полимерных материалов, например эластомеров для снижения хрупкости, пиролиз. Более подробно изложены технологии и свойства КМ с керамзитовыми матрицами в работах (Столбоушкин А. Ю. Керамические стеновые материалы матричной структуры на основе неспекающегося малопластичного техногенного и природного сырья // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 19–23) и [14].

Нашли применение углеродные матрицы, обладающие термостойкостью и сравнительно небольшим удельным весом и прочностью. Технологии с углеродной матрицей делят на твердофазные, жидкофазные, осаждения, напыления. В качестве исходного материала чаще используют каменноугольные и нефтяные пеки. Различными способами получают пироуглерод и кокс. Твердофазный метод связан с порошковой металлургией. Этот метод сочетается с пропиткой связующих материалов, чаще формальдегидными смолами.

Жидкофазный метод включает пропитку углеродного волокнистого каркаса связующими, а после отверждения карбонизируют при температуре 2000 °С. При необходимости пропитку повторяют. Такая матрица может работать при температуре до 3000 °С. Вследствие выделения летучих соединений при карбонизации после пропитки матрицу уплотняют давлением.

В строительстве и машиностроении в качестве матрицы используют древесину с пропиткой смолами под давлением (Кучерюк В. И., Шапала И. В. Моделирование напряженно-

деформированного состояния композитных систем // Вестник Тюменского государственного университета. 2011. № 7. С. 166–171). В отличие от матрицы, упрочняющие элементы изготавливают отдельно и затем при изготовлении матрицы при соответствующем ее физико-химическом состоянии вводят наполнители.

Следует иметь в виду два момента. При выборе материала для введения упрочнителя в матрицу необходимо обратить внимание на наличие адгезии между материалами матрицы и упрочнителя, так как в противном случае появятся микротрещины – очаги разрушения. Также, с одной стороны, увеличение количества вводимых элементов повышает модуль упругости КМ (смотреть формулу (8)), но с другой – увеличивается количество граничных дефектов, то есть объемное соотношение материалов должно быть оптимальным. На адгезионную прочность влияют уровень смачивания вводимого компонента (смотреть выше), остаточные напряжения при остывании и полимеризации.

При существенной разнице коэффициента расширения, модуля упругости и параметров ползучести используется технология пропитки для снижения градиента в пограничной зоне.

При изготовлении упрочнителя для дисперсно-упрочненного КМ применяются следующие технологии: порошковая металлургия, механическое легирование, внутреннее окисление, азотирование, выделение наночастиц из пересыщенного твердого раствора. Поскольку матрица изготавливается одновременно с КМ, эти технологии должны учитывать технологии введения упрочнителя.

Для упрочнения используется в зависимости от необходимых свойств КМ весь спектр естественных и искусственных материалов. Применяют следующие нанонаполнители: нанотрубки, фибриллы (нанотрубки с закрытыми концами), фуллерены, нанопластины, нанопорошки металлов и их оксидов.

Волокнистые КМ предпочтительны для тонкостенных конструкций. Волокна, так же как наполнители для дисперсно-упрочненных КМ, изготавливают отдельно от матриц. Для волокон используют естественные и искусственные материалы: металлы и их сплавы, полимеры, углеродные, керамика, дерево. По геометрической форме применяют волокна разных диаметров и длины, поперечных сечений, нановолокна, скрученные в жгуты, сетчатые и тканые. Технологии изготовления волокон: протяжка волокон через устройства, для полимеров протяжка с целью создания линейно ориентированных

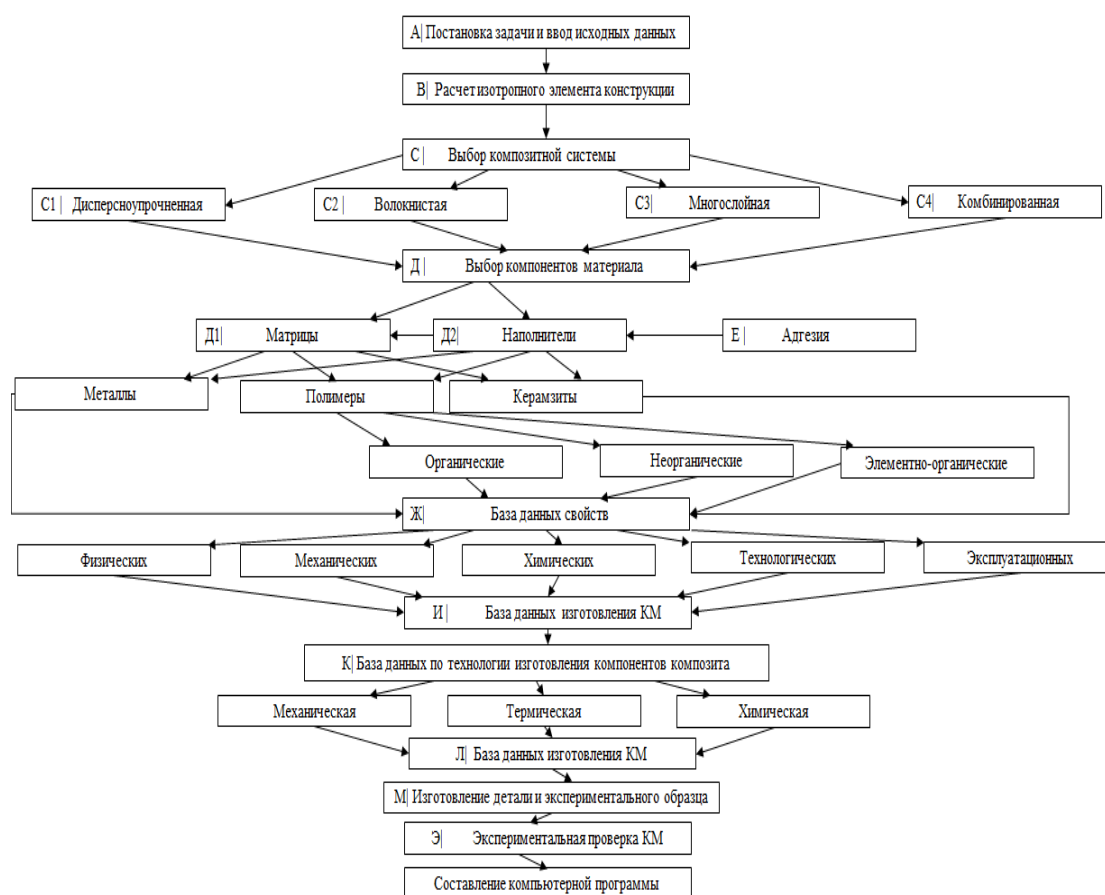
(фибриллы), получение тонких волокон из расплавленного материала, покрытие металлических волокон защитной пленкой, например никелем или полимером, получение волокон из растворов и гелей. Из волокон создают жгуты и сетки, тканые системы. При укладке волокон их пропитывают составом, обеспечивающим хорошую адгезию волокон с матрицей, например, углеродные волокна пропитывают фенолформальдегидной смолой. Укладка или намотка волокон может быть различной ориентации в зависимости от конфигурации изделия и напряженно-деформированного состояния.

Применяют программированную намотку по эпюрам напряжений. Для исключения пустот и газов изделие спрессовывают.

Технологии смешанных КМ включают все ранее описанные. Представляют интерес многослойные КМ, составленные из дисперсно-упрочненных и волокнистых слоев. При этом каждый слой обладает определенными свой-

вами, например термостойкостью, кислотостойкостью или щелочной стойкостью, несущей способностью и т. д.

Переходим к алгоритму моделирования в виде структурной схемы. Моделирование производится с использованием работ [15] и (Кучерюк В. И., Маа О. Н. К оптимизации многослойных композитных пластин и оболочек при изгибе // Проблемы оптимального проектирования сооружений : доклады IV Всероссийского семинара в 2 т. Новосибирск: НГАСУ. Т. 2. 2002. С. 234–243) и ранее изложенного материала в основном в детерминированной постановке, поскольку возможности компьютерной техники и программирование позволяют обрабатывать большие массивы данных в такой постановке. При построении структурной схемы моделирования композита используем способ ранжирования. Структурная схема моделирования представлена на рисунке.



Структурная схема моделирования

Modeling block diagram

Составление компьютерной программы удобно производить по математической модели, которую при использовании векторов и матриц целесообразно составлять в среде MATLAB,

Simulink. Постановка задачи (блок А, рисунок) включает: назначение элемента конструкции, геометрические размеры, воздействия (статические, динамические, механические, физические,

химические), требования – технологические (необходимость обработки после изготовления композитной детали), эксплуатационные (цвет, долговечность, транспортировка), ограничения (биологические, весовые, стоимостные). В MATLAB реализовано визуально-ориентированное программирование, позволяющее работать в диалоговом режиме. Более сложной является полностью автоматическая программа, целесообразно использовать блочное программирование Simulink.

Для реализации блока В (рис. 1) можно использовать программные пакеты ASIS, NASTRAN, COSMOS/M метода конечных элементов или дифференциальные уравнения для эле-

ментов типа пластин и оболочек с интегрированным приложением к MATLAB. При этом применить заданную нагрузку и геометрические размеры из постановки задачи, модули упругости E и G можно принять любые для однородного и изотропного материала. Полученный результат в виде тензора деформаций или внутренних усилий используется в качестве управляющей функции ориентацией волокон или плотностью, упрочняющего порошка, слоев КМ. Управляющая функция в матричном виде вводится в буфер обмена MATLAB.

Управляющую функцию всем процессом моделирования с использованием обозначений и операторов MATLAB можно представить в виде:

$$Y = \text{fun} \left(\begin{matrix} A = \text{ones}(n, [m, p, \dots]) \\ Z = \text{zeros}(n, [m, p, \dots]) \end{matrix} \right) \left\{ \begin{matrix} V1 \rightarrow V4 \\ V2 \rightarrow V5 \\ V3 \rightarrow V6 \end{matrix} \right\} \rightarrow M2 \rightarrow M3 \rightarrow M5 \rightarrow M8 \rightarrow M11 \left\{ \begin{matrix} M4 \rightarrow M7 \rightarrow M10 \\ M6 \rightarrow M9 \rightarrow M12 \end{matrix} \right\} \rightarrow \begin{matrix} M14 \\ M13 \rightarrow M15 \\ M16 \end{matrix} \quad (10)$$

где $M1$ – матрица блока Е (рис. 1), формируемая из элементов и веществ в виде таблицы.

Таблица 1

Table 1

№	1	2	3	...
1	1	0	0	
2	0	1	0	
3	0	0	1	
...				

В табл. 1 N по горизонтали и вертикали обозначения элементов и веществ согласно периодической системе Д. И. Менделеева. Например: 1 – Li (литий), 2 – Be (бериллий) и т. д.

При этом последовательно расположены металлы, сплавы металлов, полимеры (органические, неорганические, элементно-органические), керамзиты в соответствии со схемой на рисунке. В ячейках табл. 1 заполнено: 1 – смачиваемые компоненты, 0 – не смачиваемые. Матрица $M1$, сформированная по табл. 1, хранится в буфере обмена. Далее матрица $M1$ трансформируется в две: A – с единичными элементами, Z – с нулевыми элементами, согласно формуле (11). Химические элементы и вещества из матрицы Z являются нежелательными для дисперсно-упрочненных КМ, а для волокнистых, многослойных и комбинированных необходимо покрыть волокна и слои аппретом.

Следующим этапом проверяется химическая активность элементов и веществ создаваемого КМ. Составляется табл. 2 по форме табл. 1, но по строкам номера элементов и веществ из матрицы A для дисперсно-упрочненных КМ, а

из матриц A и Z для остальных. По столбцам номера соответствуют: 1 – коррозионная стойкость, 2 – кислотостойкость, 3 – щелочная стойкость. В ячейках таблицы заполняется: 1 – стойкий, 0 – не стойкий. Из полученной таблицы формируются векторы, характеризующие стойкость: $V1$ – коррозионную, $V2$ – кислотную, $V3$ – щелочную. Из векторов $V1, V2, V3$ выделяются векторы $V4, V5, V6$ с единичными элементами.

В соответствии с блоками Ж и З (рис. 1) составляется табл. 3 по форме табл. 1 с физико-механическими характеристиками элементов и веществ. При этом верхняя строка табл. 1 заменяется номерами характеристик: 1 – модуль упругости E , 2 – модуль сдвига G , 3 – коэффициент Пуассона ν , 4 – плотность материала ρ ,

5 – коэффициент удельной прочности $k_y = \frac{\sigma_B}{\gamma}$,

6 – предел прочности σ_B , 7 – удельный вес γ , 8 – коэффициент теплопроводности C_t , 9 – коэффициент температурного линейного расширения, 10 – коэффициент ударной вязкости, 11 – предельная деформация ползучести, 12 – коэффициент светопрозрачности, 13 – электрическое сопротивление, 14 – магнитная проницаемость, 15 – температура плавления и др. В левом столбце табл. 3 остаются наименования элементов и веществ из векторов $V4, V5, V6$ в соответствии с постановкой задачи. По табл. 3 формируется матрица $M2$, в которой элементы имеют значение «0» при наличии ограничений по постановке задачи физико-механических ха-

рактических, например по модулю упругости, удельному весу, температуре плавления, электрическому сопротивлению и т. д., а при отсутствии ограничений значение «1».

Далее по матрице М2 составляется табл. 4 по сочетанию компонентов КМ в соответствии с блоком С при учете деформативности по линейному расширению и предельной ползучести (см. процесс формирования табл. 3). Табл. 4 по форме аналогична табл. 1, но с заменой содержания левого столбца. В данном случае в левом столбце номера соответствуют: 1 – матрица дисперсно-упрочненного КМ, 2 – упрочнитель (порошок) для дисперсно-упрочненного КМ, 3 –

Таблица 5

Table 5

№	Порошки				Волокна				Слои			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	11200	....	....	....	8800	....	....	....	5500	....	....	....
2	....				....				....
....			

В табл. 5 пронумеровано: по горизонтали – технологии, с учетом геометрических параметров (см. выше), по вертикали – элементы и вещества. В ячейках табл. 5 проставлена стоимость изготовления в рублях единицы веса компонента. Формируются три матрицы: М4 – элементы с минимальным значением, М5 – с максимальным, М6 – со средним. Далее все элементы матрицы М4, М5, М6 сначала делятся на предел прочности, формируя матрицы М7, М8, М9, затем последние на удельный вес, формируются матрицы М10, М11, М12. Элементы матриц М7, ..., М12 представляют критерии оптимизации КМ.

Поскольку матрица КМ изготавливается одновременно с созданием детали, оптимизируем технологии в соответствии с блоками Л и М. Составляется табл. 6 стоимости изготовления детали из КМ. Табл. 6 по форме аналогична табл. 5 с заменой верхней строки на «дисперсно-упрочненный», «волокнустый», «комбинированный» КМ. Левый столбец тот же, что и в табл. 5. В ячейки табл. 6 записывается стоимость изготовления композитной детали.

Для критерия выбора варианта формируются матрицы делением элементов матрицы М13 на удельный вес, предел прочности или предел выносливости, которые определяют экспериментально на образцах.

матрица волокнистого КМ, 4 – волокна, 5 – слой многослойного КМ.

Элементы табл. 4 следующие: «1» – соизмеримые деформации компонентов КМ, «0» – существенная разница в деформациях. По табл. 4 формируется матрица М3 с единичными элементами. При этом для мелкодисперсного упрочнения можно допускать значительную разность деформаций. Табл. 2–4 по форме своей идентичны, поэтому их не приводим.

Следующим этапом готовим табл. 5 стоимости изготовления компонентов – упрочнителей для КМ, которую составляем по следующей форме.

Следующим этапом производится расчет композитной детали методом конечных элементов или аналитически.

Окончательный результат получим, накладывая ограничения по формулам (4)–(6).

Выводы

Предложенный вариант моделирования создания КМ с заданными свойствами, основанный на многофакторном подходе в детерминированной постановке, позволит уменьшить объем экспериментальных работ как по стоимости, так и по времени. Использование программы MATLAB с матричными элементами «1» и «0» позволяет обрабатывать достаточно большой массив данных в диалоговом режиме. Приведенная формула, управляющая процессом моделирования, является удобной при блочном программировании в среде Simulink.

Библиографические ссылки

1. Бондаренко Г. Г., Кабанова Т. А., Рыбалко В. В. Основы материаловедения : учебник. 3-е изд., электрон. М. : Лаборатория знаний, 2020. 763 с. ISBN 978-5-00101-755-4.
2. Солнцев Ю. П. Хладостойкие стали и сплавы : учебник для вузов. СПб. : ХИМИЗДАТ, 2020. 476 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. URL: <https://www.iprbookshop.ru/67358.html>. ISBN: 978-5-93808-299-1.

3. Баур Э., Освальд Т. А., Рудольф Н. Настольная книга переработчика пластмасс : Справочник по полимерным материалам. М. : Профессия, 2021. 672 с.
4. Сафонов В. А., Чоба М. А. Коррозия и защита металлов учебник. Вологда : Инфа-Инженерия, 2023. 184 с.
5. Baino F. Ceramics, Glass and Glass-Ceramics: From Early Manufacturing Steps Towards Modern Frontiers// F. Baino, M. Tomalino, D. Tulyaganov (eds.). Springer, 2021. 348 p.
6. Гуреева М. А., Овчинников В. В. Композиционные материалы и их соединения : учебник. М. : Литрес, 2024. 321 с.
7. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волоконно – матрица» в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном / А. И. Гуляев, П. Н. Медведев, С. В. Сбитнев, А. А. Петров // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 80–86.
8. Гриневиц Д. В., Яковлев Н. О., Славин А. В. Критерии разрушения композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2019. № 7.
9. Обзор критериев прочности материалов / Е. И. Орешко, В. С. Ерасов, А. В. Гриневиц, П. В. Шершак // Труды ВИАМ. 2019. № 9.
10. Лазовский Д. Н., Бадалова Е. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных железобетонных элементов, усиленных композитным материалом // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. 2024. № 1 (36). С. 21–27.
11. Редькин В. Е., Капитонов А. М. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства : монография. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2019. 532 с.
12. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие. М. : Профессия, 2023. 712 с.
13. Коберник В. И., Шиганов И. Н. Композиционные материалы с металлической матрицей: сварные соединения и покрытия : монография. М. : Изд. КноРус, 2022. 351 с.
14. Шестаков А. М. Керамика на основе кремнийорганических полимеров – прекурсоров: способы получения и свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1.
15. Кучерюк В. И., Шаптала И. В., Спиридонова Н. А. Оптимальное проектирование композитных коробчатых конструкций // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 3. С. 66–75.
2020. 476 p. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/67358.html>. ISBN: 978-5-93808-299-1 (in Russ.).
3. Baur E., Oswald T.A., Rudolph N. *Nastol'naya kniga pererabotchika plastmass : Spravochnik po polimernym materialam* [Plastics Processor's Handbook. Handbook of polymer materials]. Moscow: TsOP Profession, 2021. 672 p. (in Russ.).
4. Safonov V.A., Choba M.A. [Corrosion and protection of metals]. Vologda: Infa-Engineering, 2023. 184 p. (in Russ.).
5. Baino F., Tomalino M., Tulyaganov D. (eds.). [Ceramics, Glass and Glass-Ceramics: From Early Manufacturing Steps Towards Modern Frontiers]. Springer, 2021. 348 p.
6. Gureeva M.A., Ovchinnikov V.V. *Kompozitsionnye materialy i ikh soedineniya* [Composite materials and their compounds]. Moscow: Litres, 2024. 321 p. (in Russ.).
7. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitnev S.V., Petrov A.A. [Experimental study to assess the adhesive strength of “fiber-matrix” in carbon fiber reinforced plastics based on an epoxy binder modified with polysulfone]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2019. No. 47. Pp. 80-86.
8. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. [Criteria for destruction of composite materials]. Proceedings of VIAM. 2019. No. 7 (in Russ.).
9. Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich A.V., Shershak P.V. [Review of criteria for strength of materials]. Proceedings of VIAM. 2019. No. 9 (in Russ.).
10. Lazovsky D.N., Badalova E.N. [Modeling the stress-strain state of prestressed reinforced concrete elements reinforced with composite material]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo*. 2024. No. 1. Pp. 21-27 (in Russ.).
11. Redkin V.E., Kapitonov A.M. *Fiziko-mekhanicheskie svoistva kompozitsionnykh materialov. Uprugie svoistva : monografiya* [Physico-mechanical properties of composite materials. Elastic properties: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019. 532 p. (in Russ.).
12. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoistva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. Moscow: TsOP Profession, 2023. 712 p. (in Russ.).
13. Kobernik V.I., Shiganov I.N. *Kompozitsionnye materialy s metallicheskoj matritsei: svarnye soedineniya i pokrytiya : monografiya* [Composite materials with a metal matrix: welded joints and coatings. Monograph]. Moscow: Publishing house. KnoRus, 2022. 351 p. (in Russ.).
14. Shestakov A.M. [Ceramics based on organosilicon polymers – precursors: methods of preparation and properties (review)]. Proceedings of VIAM. 2020. No. 1 (in Russ.).
15. Kucheryuk V.I., Shaptala I.V., Spiridonova N.A. [Optimal design of composite box structures]. *Intellektual'nyyesistemy v proizvodstve*. 2022. Vol. 20, no. 3. Pp. 66-75 (in Russ.).

References

1. Bondarenko, G.G., Kabanova T.A., Rybalko V.V. *Osnovy materialovedeniya : uchebnik* [Fundamentals of materials science]. 3rd ed., electronic. Moscow: Knowledge Laboratory, 2020. 763 p. (in Russ.).
2. Solntsev Yu.P. *Khladoistoikiye stali i splavy : uchebnik dlya vuzov* [Cold-resistant steels and alloys: textbook for universities]. St. Petersburg: KHIMIZDAT,

Optimal Modeling of Composite Materials with Specified Properties

V.I. Kucherjuk, PhD in Engineering, Professor, Tyumen State Institute of Culture, Tyumen, Russia

I.V. Chaptala, Lecturer, Tyumen State University, Tyumen, Russia

N.A. Spiridonova, Lecturer, Industrial University of Tyumen (IUT), Tyumen, Russia

The areas of application of composite materials are becoming comprehensive: from consumer goods to the space industry. At the same time, the issue of developing methods for designing composite materials for various purposes is still relevant today. The area for improving design, according to the authors, lies in the possibility of wider use of computer programs at the stage of material mathematical modeling, carried out with regard to all its features. This article proposes a variant of process modeling to design a composite material (CM). The simulation is based on multi-factor optimization. The following factors are taken into account: the purpose of the structural element, geometric dimensions, technological and operational requirements, as well as various types of restrictions and effects. Computer implementation is carried out in the MATLAB+Simulink software environment. A brief review of literature is presented with an analysis of the materials used, CM manufacturing technologies, CM components adhesion assessment, formulae for assessing strength, confirmed by experiment, are given; an assessment of the service life is introduced, based on the kinetic theory of strength. The composite modeling was carried out using stratification with the highest stratum on the micro level, and the lowest on the macro level. A formula has been compiled that runs the CM modeling. Based on the modeling block diagram, recommendations are given for working in the MATLAB environment in interactive mode and in the block version of Simulink. The use of computer mathematics systems to describe a model of a composite material will reduce the amount of experimental work both in cost and time. The modeling can fully take into account the specifics of product production and operation made from a composite material.

Keywords: composite material; composite material modeling; multifactorial optimization; MATLAB; Simulink.

Получено: 28.11.24

Образец цитирования

Кучерюк В. И., Шантала И. В., Спиридонова Н. А. Оптимальное моделирование композитных материалов с заданными свойствами // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 1. С. 108–118. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-108-118.

For Citation

Kucherjuk V.I. I. V. Chaptala N. A. Spiridonova [Optimal modeling of composite materials with specified properties]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 108-118. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-108-118.