

**ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ЖИДКОЙ ФАЗЫ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДВУХФАЗНОЙ СХЕМОЙ АРМИРОВАНИЯ**

Косенко Е.А.*, Баурова Н.И.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

***KosenkoKate@mail.ru**

***Аннотация.** Обоснование выбора оптимального материала жидкой фазы композитов с двухфазной схемой армирования осуществлялось, исходя из решения многокритериальной задачи оптимизации методами идеальной точки и равномерной оптимизации при использовании в качестве основных критериев оптимальности результатов экспериментальных исследований этих материалов по оценке прочности при растяжении и ударе, а также потерь этих показателей в условиях влияния низких отрицательных температур (–30 и –50 °C).*

Ключевые слова: жидкая фаза, идеальная точка, отрицательные температуры, природоподобие, прочность, равномерная оптимизация

**OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF LIQUID PHASE MATERIAL
IN THE PRODUCTION OF PRODUCTS FROM FIBROUS POLYMER COMPOSITE
MATERIALS WITH TWO-PHASE REINFORCEMENT SCHEME**

Kosenko E.A., Baurova N.I.

Moscow automobile and road construction state technical university (MADI)

***Abstract.** Justification of the choice of the optimal material of the liquid phase of composites with a two-phase reinforcement scheme was carried out on the basis of solving the multi-criteria problem of optimization by methods of ideal point and uniform optimization when used as the main optimization criteria the results of the experimental studies of these materials on the evaluation of tensile and impact strength, as well as losses of these values under conditions of influence of low negative temperatures (–30 and –50 °C).*

Keywords: liquid phase, ideal point, negative temperatures, nature-likeness, strength, uniform optimization

Введение

Благодаря комплексу уникальных эксплуатационных свойств и широким технологическим возможностям полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в различных отраслях промышленности, в частности авиастроении, автомобилестроении, машиностроении, судостроении, при производстве деталей и конструкций ракетно-космической техники и пр. [1, 2]. Расширение областей применения ПКМ и номенклатуры изготавливаемых из них изделий стимулирует композитное материаловедение к расширению комплекса их функциональных свойств, что в основном реализуется созданием гибридных и полиматричных материалов, а также посредством специальных поверхностных обработок волокнистых наполнителей и модификации матричных материалов [3–7]. Однако существующие методы не позволяют создать ПКМ, обладающие комплексом трудно сочетаемых свойств: высокой прочностью при статических, циклических и ударных нагрузках, а также стабильностью прочностных показателей в условиях низких отрицательных температур. Таким образом, в области технологии переработки ПКМ существует актуальная межотраслевая проблема по созданию

прочных, жестких и долговечных композитов, длительно работоспособных в условиях знакопеременных и ударных нагрузок, в том числе при низких отрицательных температурах. При этом решение данной проблемы должно осуществляться не только на уровне определения оптимального сочетания компонентов, повышающих эксплуатационные характеристики ПКМ, но также разработкой экономически эффективной технологии формования деталей из них.

Одним из направлений создания ПКМ с уникальным комплексом трудносочетаемых свойств является разработка их природоподобной структуры, подобной таким материалам, как живая древесина и некоторые виды минералов, обладающих высокими показателями прочности, благодаря наличию в их структуре промежуточных слоев пониженной прочности или жидкого сока (у древесины). Промежуточные слои пониженной прочности реализуют механизм торможения трещины поверхностью раздела, а жидкий сок в ветвях древесины предотвращает накопление повреждений при деформациях.

Принцип создания ПКМ с природоподобной структурой основан на том, что наряду с традиционными волокнистыми материалами в качестве армирующего состава в структуре композита с предельно высокой анизотропией используется мономерный (эластомерный или олигомерный) материал, не вступающий в химическое и межмолекулярное взаимодействие с материалом и формирующий в структуре ПКМ самостоятельную жидкую фазу. В работе эти материалы получили название ПКМ с двухфазной схемой армирования: одна фаза – это традиционный жесткий армирующий материал (ткани и ленты), вторая – материал жидкой фазы. Основной задачей материала жидкой фазы в ПКМ является предотвращение накопления повреждений при деформациях и осуществление релаксации напряжений.

Технология формования изделий из ПКМ с двухфазной схемой армирования заключается в вакуумформовании пакета тканых препрегов холодного отверждения, в котором на один или несколько слоев (кроме замыкающего) по заданным схемам наносится материал жидкой фазы. Эта технология, по сравнению с вакуумной инфузией, не требует технического переоснащения производства, а дополнительные затраты связаны только с приобретением материалов жидкой фазы, которые во многом компенсируются сокращением затрат на приобретение вспомогательных материалов для формования.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что использование в качестве материалов жидкой фазы диметакрилата триэтиленгликоля (мономера), являющегося основой всех анаэробных клеев, при снижении модуля упругости позволяет повысить прочность при растяжении и ударную прочность, в том числе в условиях влияния низких отрицательных температур (-30 и -50°C), а также прочность при циклическом изгибе и растяжении. Использование в качестве материала жидкой фазы силиконового герметика (эластомера) приводит к некоторому снижению прочности при растяжении, однако обеспечивает минимизацию потери прочностных свойств при переходе в область низких отрицательных температур, позволяет повысить ударную прочность и длительную прочность ПКМ при циклическом растягивающем и изгибном нагружении. Синтетический воск (олигомер) позволяет достигнуть повышения ударной прочности, в том числе при низких отрицательных температурах [8–10]. При этом наилучшие прочностные характеристики достигаются при содержании материала жидкой фазы в ПКМ до 5 мас. ч.

Причинами повышения прочности ПКМ с двухфазной схемой армирования являются: релаксация напряжений, пластичное поведение эпоксидной матрицы при нагружении, увеличение работы разрушения между элементарным волокном и полимерной матрицей и снижение трения между волокнами армирующего наполнителя.

Целью данной работы является оптимизация выбора материала жидкой фазы для производства изделий из ПКМ с двухфазной схемой армирования, работающих в условиях статического и ударного нагружения, в том числе при низких отрицательных температурах.

Определение оптимального материала жидкой фазы осуществлялось на основании решения задач многокритериальной оптимизации двумя методами: идеальной точки и равномерной оптимизации. В качестве численных значений используемых критериев приняты результаты испытаний образцов углепластиков и базальтопластиков (для критериев модуля упругости и температуры стеклования), изготовленных на основе эпоксидных связующих с аминными отвердителями и содержащих минимальное количество материала жидкой фазы (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Экспериментальные данные и результаты оптимизации методом идеальной точки

Показатели	Без материала жидкой фазы	Материал жидкой фазы		
		Диметакрилат триэтиленгликоля	Силиконовый герметик	Воск
$\Delta\sigma^{-30}$, МПа	440	490	300	540
$\Delta\sigma^{-50}$, МПа	530	590	220	545
Δa_n^{-30} , кДж/м ²	16	30	17	2
Δa_n^{-50} , кДж/м ²	-14*	-10*	17	29
$Z_{\text{доп}}$, руб	0	2300	180	90
R	1,1	1,9	0,9	1,7

* знак «-» означает увеличение показателя.

Таблица 2

Экспериментальные данные и результаты оптимизации методом равномерной оптимизации

Показатели	Без материала жидкой фазы	Материал жидкой фазы		
		Диметакрилат триэтиленгликоля	Силиконовый герметик	Воск
\square_{+25} , МПа	1800	1960	1510	710
\square_{-30} , МПа	1360	1470	1210	170
\square_{-50} , МПа	1270	1370	1290	165
a_{+25} , кДж/м ²	96	150	117	105
a_{-30} , кДж/м ²	80	120	100	103
a_{-50} , кДж/м ²	110	160	100	76
E, МПа	36500	25250	36040	33950
T_g , °C	71	71	72	68
Σ	4,86	6,75	5,51	1,52

Многокритериальная оптимизация материала жидкой фазы с использованием метода идеальной точки

При обосновании выбора оптимального материала жидкой фазы с помощью метода идеальной точки в качестве критериев оптимальности принимаемого решения использованы: величина потерь прочности при растяжении при температуре -30 °C ($\Delta\sigma^{-30}$), -50 °C ($\Delta\sigma^{-50}$); величина потерь ударной прочности при температуре -30 °C (Δa^{-30}), -50 °C (Δa^{-50}); величина дополнительных затрат на закупку материалов ПКМ, ($Z_{\text{доп}}$).

Выбранные критерии имеют разную размерность, и поэтому для решения задачи оптимизации они были представлены безразмерными величинами. Преобразование используемых критериев в безразмерную величину для решения задачи оптимизации методом идеальной точки осуществлялось с помощью выражения (1)

$$f_i^j(x) = \frac{f_i^{\min} - f_i(x)}{f_i^{\min} - f_i^{\max}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $f_i^{\max} = \max_{x \in D} f_i(x)$, $f_i^{\min} = \min_{x \in D} f_i(x)$, $f_i^{\min} \neq f_i^{\max}$, D – область допустимых решений модели для j-го состава ПКМ, n – количество используемых критериев.

Функция $f_i^{\min} - f_i(x)$ является метрикой расстояния до идеальной точки. Расстояние до идеальной точки (R) для j-го состава ПКМ описывается выражением

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^j(x)^2} \rightarrow \min, \quad x \in D. \quad (2)$$

Преобразуем уравнение (2) в соответствии с условием решаемой задачи и выбранными критериями:

$$R = \sqrt{f^j(\Delta\sigma^{-30})^2 + f^j(\Delta\sigma^{-50})^2 + f^j(\Delta a^{-30})^2 + f^j(\Delta a^{-50})^2 + f^j(3_{don}^{-30})^2} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Задача определения оптимального материала жидкой фазы решалась как задача определения минимального значения до идеальной точки при условии равной значимости всех критериев. Полученные результаты приведены в табл. 1.

В результате проведенных расчетов установлено, что оптимальным материалом жидкой фазы для выбранных критериев является силиконовый герметик, для которого $R=0,9$.

Многокритериальная оптимизация материала жидкой фазы с использованием метода равномерной оптимизации

При значительном количестве показателей, характеризующих свойства ПКМ, среди которых невозможно выбрать один в качестве критерия оптимальности, прибегают к выбору обобщенного критерия, который определяют как свертку частных критериев исследуемых свойств. Метод свертывания критериев заключается в преобразовании частных критериев в нормализованном виде в один суперкритерий. При аддитивной свертке суперкритерий обычно строится как взвешенная сумма частных критериев. Частным случаем аддитивной свертки является метод равномерной оптимизации, при котором весовые коэффициенты принимаются равными друг другу. Задача определения оптимального материала жидкой фазы методом равномерной оптимизации сформулирована как задача максимизации показателей механических свойств ПКМ.

В качестве критериев оптимальности использованы: среднее значение прочности при растяжении при температуре +25 °C (σ_{+25}), -30 °C (σ_{-30}), -50 °C (σ_{-50}); среднее значение ударной прочности при температуре +25 °C (a_{+25}), -30 °C (a_{-30}), -50 °C (a_{-50}); модуль упругости при изгибе (E); температура стеклования (T_g).

Преобразование критериев в безразмерные величины осуществлялось по формуле

$$f_i^j(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Оптимальным будет являться состав ПКМ, удовлетворяющий следующему условию:

$$E = \sum_{i=1}^n f_i^j(x) \rightarrow \max, \quad x \in D. \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (5) в соответствии с условием решаемой задачи и выбранными критериями:

$$E = f^j(\sigma_{+25}) + f^j(\sigma_{-30}) + f^j(\sigma_{-50}) + f^j(a_{+25}) + f^j(a_{-30}) + f^j(a_{-50}) + f^j(E) + f^j(T_g) \rightarrow \max. \quad (6)$$

В результате проведенных расчетов установлено, что оптимальным материалом жидкой фазы для выбранных критериев является диметакрилат триэтиленгликоля, для которого $\Sigma=6,75$.

Таким образом, результаты оптимизации, полученные двумя разными методами, отличаются между собой.

Заключение

Методами многокритериальной оптимизации (методами идеальной точки и равномерной оптимизации) определен оптимальный материал жидкой фазы. Установлено, что если в качестве критериев оптимальности использовать комплекс показателей, характеризующих потери прочности композита при ударных и статических нагрузках в условиях отрицательных температур, то оптимальным материалом

жидкой фазы является силиконовый герметик. Если в качестве критериев оптимальности использовать средние значения прочности, в том числе в условиях отрицательных температур, то оптимальным материалом жидкой фазы является диметакрилат триэтиленгликоля.

Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FFSM-2024-0001.

Библиография

1. Тимошков П.Н. Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 6. С. 61–68.
2. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29–37.
3. Нелюб В.А., Городецкий М.А., Тун Л.Х., Малышева Г.В. Свойства многослойных полимерных композитов на основе нетканого материала из полиэтилентерефталата // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 24. С. 74–77
4. Беляева Е.А., Косолапов А.Ф., Шацкий С.В., Осипчик В.С., Набиуллин А.Ф. Гибридные композиты на основе волоконных наполнителей из сверхвысокомолекулярного полиэтилена и стеклонанонаполнителей // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. 29, № 10. С. 11–13.
5. Нелюб В.А. Повышение качества формования углепластиков на основе эпоксидных связующих и металлизированных армирующих волокнистых материалов по технологии вакуумной инфузии // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 9. С. 40–43.
6. Костромина Н.В., Олихова Ю.В., Малаховский С.С., Горбунова И.Ю. Разработка эпоксидных связующих, модифицированных термостойкими термопластами, для создания армированных композиционных материалов // Пластические массы. 2022. № 9-10. С. 17–19.
7. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Куперман А.М. Адгезия модифицированных эпоксидных матриц к армирующим волокнам // Высокомолекулярные соединения А. 2016. Т. 58, № 5. С. 439–447.
8. Kosenko E.A., Nelyub V.A., Baurova N.I. A study of the strength properties of carbon-fiber-reinforced plastics with a two-phase reinforcement scheme // Polymer Science. Series D. 2024. V. 17, N 1. P. 106–109.
9. Косенко Е.А., Нелюб В.А., Баурова Н.И. Оценка усталостной прочности полимерных композиционных материалов с двухфазной схемой армирования в условиях циклического растяжения // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26, № 10. С. 75–79.
10. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Нелюб В.А. Оценка усталостной прочности углепластиков с двухфазной схемой армирования при циклическом изгибающем нагружении // Химическая промышленность сегодня. 2023. № 4. С. 37–42.