

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ PHYSICS. MATHEMATICAL MODELING

УДК 620.174
MSC 74E30, 74R10
Краткое сообщение

DOI 10.52575/2687-0959-2026-58-3-291-298
EDN JBTKDA

Моделирование и прочностные свойства при изгибе эпоксидных композитов с вискерами сульфата кальция

Никулин И. С. , Милостной Д. Н. , Кунгурцев М. С. , Воропаев В. С. , Никуличева Т. Б. , Ядута А. З. 
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
nikulicheva@bsuedu.ru

Аннотация. Работа посвящена комплексному теоретико-экспериментальному исследованию влияния дискретного армирования нитевидными кристаллами сульфата кальция (CaSO_4) на механические свойства двухкомпонентной эпоксидной смолы при статическом изгибе. Методами оптической микроскопии и статистического логнормального анализа определены геометрические параметры вискеров в объеме полимера: средний диаметр составил $d \approx 1.86$ мкм, средневзвешенная $\langle l \rangle = 44.8$ мкм, что соответствует аспектному отношению $\langle l/d \rangle \approx 24.1$. Установлен немонотонный характер зависимости прочностных свойств композита от степени наполнения с экстремумом при 10% масс., обеспечивающим трехкратный прирост модуля упругости (до 180 МПа) и увеличение предела прочности в 2.8 раза (до 6.2 МПа). Для количественного описания упругого поведения привлечена микромеханическая модель Халпина – Цая, модифицированная функцией эффективного объема $V_{eff} = V_f \cdot \exp(-k \cdot V_f)$. Извлеченный коэффициент интенсивности агломерации $k = 15.6$ строго обосновывает падение жесткости при 20% наполнении скручиванием нитевидных кристаллов в изолированные конгломераты. С использованием модели Келли – Тайсона рассчитано соотношение критической и геометрической длины кристаллов $l_c/l \sim 1.63$, доказывающее субкритический характер армирования системы. Установлено, что диссипация механической энергии и упрочнение матрицы при изгибе протекают по механизму вязкого выдергивания (*pull-out*) микрокристаллов из полимерной матрицы. Полученные результаты открывают перспективы использования вискеров сульфата кальция для направленного конструирования высокопрочных конструкционных композитов.

Ключевые слова: эпоксидная смола, нитевидные кристаллы, сульфат кальция, прочность при изгибе, модель Халпина – Цая, теория Келли – Тайсона, агломерация, вязкое выдергивание

Финансирование: статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме: «Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки» (FZWG-2024-0001). Все исследования выполнены с использованием научного оборудования научного центра «Технологии и материалы» НИУ «БелГУ».

Для цитирования: Никулин И.С., Милостной Д.Н., Кунгурцев М.С., Воропаев В.С., Никуличева Т.Б., Ядута А.З. Моделирование и прочностные свойства при изгибе эпоксидных композитов с вискерами сульфата кальция. *Прикладная математика & Физика*. 2026;58(3):291–298. DOI 10.52575/2687-0959-2026-58-3-291-298 EDN JBTKDA

Short Communication

Modeling and Flexural Strength Properties of Calcium Sulfate Whisker / Epoxy Resin Composites

Ivan S. Nikulin , Daniil N. Milostnoy , Maksim S. Kungurtsev , Valery S. Voropaev ,
Tatiana B. Nikulicheva , Anna Z. Yaduta 
Belgorod National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
nikulicheva@bsuedu.ru

Abstract. This work is devoted to a comprehensive theoretical and experimental study of the effect of discrete reinforcement with calcium sulfate (CaSO_4) whiskers on the mechanical properties of a two-component epoxy resin under static flexural loading. Using optical microscopy and statistical log-normal analysis, the geometric parameters of the whiskers within the polymer bulk were determined: the average diameter was $d \approx 1.86 \mu\text{m}$, and the weight-average length was $\langle l \rangle = 44.8 \mu\text{m}$, corresponding to an aspect ratio of $\langle l/d \rangle \approx 24.1$. A non-monotonic dependence of the composite's strength characteristics on the filler content was established, exhibiting an extremum at 10 wt.%, which provided a threefold increase in the elastic modulus (up to 180 MPa) and a 2.8-fold enhancement in the flexural strength (up to 6.2 MPa). To quantitatively describe the elastic behavior, the micromechanical Halpin-Tsai model was applied, modified by an effective volume function $V_{eff} = V_f \cdot \exp(-k \cdot V_f)$.

The extracted agglomeration intensity coefficient $k = 15.6$ strictly justifies the degradation of stiffness at 20 wt.% filling by the avalanche-like clustering of the whiskers into isolated conglomerates. Using the Kelly-Tyson model, the ratio of critical to geometric crystal length was calculated $l_c/l \sim 1.63$, proving the subcritical nature of the system's reinforcement. It was established that mechanical energy dissipation and matrix toughening during bending proceed via the viscous pull-out mechanism of the microcrystals from the polymer matrix. The results obtained open up clear prospects for using calcium sulfate whiskers in the targeted design of high-strength structural compounds.

Keywords: Epoxy Resin, Whiskers, Calcium Sulfate, Flexural Strength, Halpin-Tsai Model, Kelly-Tyson Theory, Agglomeration, Viscous Pullout

Funding: This article was prepared as part of the state assignment to establish new laboratories in 2021, including those under the supervision of promising young researchers, under the national project «Science and Universities», on the research topic: «Development and advancement of scientific and technological foundations for the creation of an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises and the search for new ways to use processed products» (FZWG-2024-0001). All studies were conducted using the scientific equipment of the «Technologies and Materials» research center of the National Research University «BelSU».

For citation: Nikulin IS., Milostnoy DN., Kungurtsev MS., Voropaev VS., Nikulicheva TB., Yaduta AZ. Modeling and Flexural Strength Properties of Calcium Sulfate Whisker / Epoxy Resin Composites. *Applied Mathematics & Physics*. 2026;58(3):291–298. (In Russ.). DOI 10.52575/2687-0959-2026-58-3-291-298EDN JBTKDA

1. Введение. Эпоксидные полимеры представляют собой термореактивные соединения, функциональная активность которых определяется наличием реакционноспособных эпоксидных (оксирановых) групп, имеющих форму напряженного трехчленного гетероцикла. Формирование густосетчатой трехмерной макромолекулярной структуры — процесс отверждения — протекает по механизму полиприсоединения при взаимодействии олигомеров с соединениями, содержащими лабильный (подвижный) атом водорода (алифатическими и ароматическими аминами, спиртами, фенолами). В зависимости от химической природы и кинетических особенностей применяемого отверждающего агента данный процесс может протекать как при комнатной температуре (сопровождаясь выраженным экзотермическим эффектом), так и требовать термической активации. Наиболее широкое коммерческое и лабораторное применение для полимеризации эпоксидных матриц находят аминокислоты различной функциональности [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Несмотря на комплекс ценных эксплуатационных характеристик (высокая адгезия к различным подложкам, малая усадка при отверждении, химическая стойкость), немодифицированные эпоксидные полиматрицы обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение в конструкционных материалах, в частности – повышенной хрупкостью и низким сопротивлением к изгибающим нагрузкам. Для направленного регулирования и усиления физико-механических параметров эпоксидных компаундов традиционно используются различные модифицирующие добавки. Одним из наиболее эффективных и технологически обоснованных способов повышения жесткости и прочности полимерных материалов является их наполнение дискретными армирующими элементами.

Введение наполнителей игольчатой или волокнистой морфологии приводит к качественной перестройке напряженно-деформированного состояния полимерной матрицы, обеспечивая существенный прирост прочностных характеристик получаемых эпоксидных композитов при различных типах механических испытаний [8, 9].

По геометрическим признакам применяемые в материаловедении минеральные наполнители классифицируют на дисперсно-партнерские (изометрические частицы) и дискретно-армирующие (волокна и нитевидные кристаллы). Эффективность их воздействия на полимерную матрицу во многом определяется топологией и анизотропией формы: так, частицы мела имеют зернистую структуру, каолин и тальк представлены в виде чешуек и гексагональных пластинок, диоксид титана – тетрагональных полиэдров, а фракции мрамора имеют форму, близкую к сферической. В то время как изометрические и обтекаемые мелкодисперсные частицы в основном способствуют снижению себестоимости компаунда и регулированию его плотности (зачастую приводя к некоторому снижению предела прочности), наполнители с высоким аспектным отношением ($l/d \gg 1$) способны эффективно перераспределять внутренние механические напряжения. Твердость и монокристаллическое совершенство структуры внедряемых фаз имеют определяющее значение: вовлечение высокомодульных анизотропных микрокристаллов позволяет кардинально повысить жесткость и сопротивление композита к разрушению при статических и динамических нагрузках. Перспективным и экологически доступным представителем дискретно-армирующих наполнителей являются нитевидные микрокристаллы (вискеры) сульфата кальция (CaSO_4), сочетающие высокую теоретическую прочность с развитой удельной площадью поверхности.

Целью настоящей работы являлось установление взаимосвязи между концентрацией введения нитевидных микрокристаллов сульфата кальция и комплексом механических свойств получаемых эпоксидных композитов при испытаниях на статический изгиб, а также верификация экспериментальных данных с привлечением классических микромеханических моделей Хальпина – Цая и Келли – Тайсона.

2. Получение и характеристика образцов. Для получения композиционного материала на основе эпоксидной смолы и дисперсного наполнителя были выбраны двухкомпонентная эпоксидная смола, в качестве матрицы материала, и наполнитель – нитевидные кристаллы сульфата кальция, представляющие собой порошок белого цвета с формой частиц в виде вытянутых в нить кристаллов, получаемый из цитрогипса. Остаточная влажность армирующего наполнителя влияет на свойства итогового эпоксидного композита, т. к. при смешивании двухкомпонентной эпоксидной смолы и кристаллов сульфата кальция, не прошедших осушение, имеется неоднородность в структуре и воздушные полости вокруг частиц наполнителя, что приводит к ухудшению механических свойств материала. Поэтому все эксперименты проводились с предварительной просушкой нитевидных кристаллов сульфата кальция при температуре $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$ в течение 2–3 ч в муфельной печи «Nabertherm P 1200».

Также важным параметром является равномерность распределения наполнителя в матрице. Любые неоднородности композиционного материала снижают его прочность, т. к. она определяется самой слабой его частью, в которой начинается разрушение. Таким образом, композит должен быть однородным. Для равномерности распределения частиц наполнителя в объеме эпоксидной смолы была использована ультразвуковая ванна. Во время смешения слипшиеся кристаллы дробятся на отдельные частицы и равномерно распределяются по всей массе, за счет перемешивания и диспергирования, образуя однородную смесь эпоксидной смолы и нитевидных кристаллов сульфата кальция.

Полимерный композит, наполненный дискретными кристаллами, рассматривается как двухфазная гетерогенная система. Комплекс его механических свойств базируется на характеристиках непрерывной эпоксидной среды, тогда как дисперсная фаза выполняет роль армирующего каркаса, влияние которого транслируется через объем вмещающей полимерной матрицы.

Равномерность распределения кристаллов сульфата кальция в эпоксидной смоле была подтверждена при помощи оптического микроскопа Olympus GX41 (рис. 1).

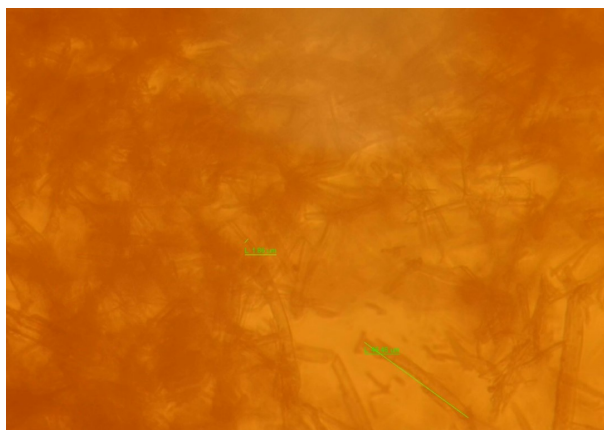


Рис. 1. Распределение кристаллов сульфата кальция в объеме эпоксидной смолы
Fig. 1. Distribution of calcium sulfate crystals in the volume of epoxy resin

Готовый раствор эпоксидной смолы, наполненный нитевидными кристаллами сульфата кальция, заливали в промаркированные силиконовые формы, формы с залитыми образцами выдерживаются при температуре $25 - 30^\circ\text{C}$ в течение 72 часов. После отверждения все полученные образцы (рис. 2)



Рис. 2. Фотография образцов для проведения механических испытаний на трехточечный изгиб
Fig. 2. Photograph of samples for mechanical testing under three-point bending

подвергались механической шлифовке с последовательной сменой шлифовальной бумаги следующей зернистости: P220 → P320 → P500 → P800 для снятия неровного слоя, возникшего в результате изготовления. Для статистики подготавливалась партия образцов по каждому содержанию наполнителя из 5 штук.

3. Испытание на изгиб. Испытания на трехточечный изгиб проводили по ГОСТ 4648 – 2014 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб». Сущность метода заключается в изгибе плоского образца постоянного прямоугольного сечения, свободно лежащего на двух опорах, с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения образца или до того момента, когда деформация растяжения на внешней поверхности образца достигнет предварительно заданного значения. Образец помещают на опоры широкой стороной. Расстояние между опорами испытательной машины устанавливают $64 \pm 0,5$ мм. Нагружение образца производят плавно, без толчков, посередине между опорами со скоростью 1 мм/мин. Предел прочности при изгибе рассчитывают по формуле

$$R_b = \frac{3Pl}{2bh^2} [0,1 \text{ МПа}],$$

где P – разрушающая нагрузка, кгс; l – расстояние между опорами, см; b – ширина образца, см; h – толщина образца, см.

Возникающее при изгибе напряженно-деформируемое состояние является неоднородным, регистрируемые показатели интегрально содержат информацию о растяжении, сжатии и межслоевом сдвиге.

Из рис. 3 следует, что отвержденные образцы эпоксидной смолы, наполненные кристаллами сульфата кальция, обладают более высокой прочностью на изгиб по сравнению с образцами из ненаполненной эпоксидной смолы.

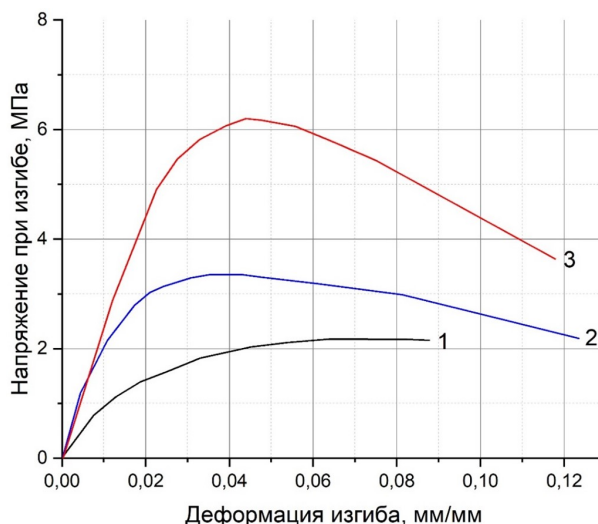


Рис. 3. Диаграмма изгиба образцов из эпоксидной смолы с добавлением кристаллов сульфата кальция (1 – чистая эпоксидная смола; 2 – эпоксидная смола + 20% наполнителя; 3 – эпоксидная смола + 10% наполнителя)

Fig. 3. Bending diagram of samples made of epoxy resin with the addition of calcium sulfate crystals (1 – pure epoxy resin; 2 – epoxy resin + 20% filler; 3 – epoxy resin + 10% filler)

Однако при превышении содержания наполнителя 10% наблюдается снижение прочности. Наилучшие характеристики с точки зрения прочности при изгибе у эпоксидной смолы с содержанием 10% кристаллов сульфата кальция, и они имеют умеренную деформацию прогиба.

Приведенные выше закономерности упрочнения эпоксидной смолы справедливы до определенной степени наполнения. При приближении концентрации кристаллов сульфата кальция в эпоксидном полимере к некоторой критической точке наблюдается снижение прочностных свойств композита независимо от размера диспергированных частиц. Такое поведение в литературе называют «обратимостью» упрочняющего действия наполнителей. Вероятнее всего это происходит из-за того, что деформирование эпоксидного композита сопряжено с перемещением частиц наполнителя. Плотная упаковка частиц наполнителя препятствует их перемещению. В результате при деформировании высоконаполненного композита в его матрице возникают большие внутренние перенапряжения, что и вызывает снижение прочности композита.

4. Микромеханическое моделирование модуля упругости композитов. Для количественной оценки эффективности армирования полимерной матрицы нитевидными кристаллами сульфата кальция и объяснения немоного характера изменения упругих свойств был проведен численный расчет в рамках микромеханической модели Хальпина – Цая [10, 11, 12, 13].

Экспериментальные значения модулей упругости при изгибе, определенные как тангенс угла наклона начальных прямолинейных участков диаграммы деформирования (рис. 3), составили $E_m = 60$ МПа для чистой эпоксидной смолы, $E_{c10} = 180$ МПа и $E_{c20} = 140$ МПа для композитов с массовой долей наполнителя 10% и 20% соответственно. Массовые доли наполнителя (ω) были пересчитаны в истинные объемные доли (V_f) по стандартной методике с учетом плотности матрицы ($\rho_m = 1.2$ г/см³) и монокристаллических вискоз ангидрита ($\rho_f = 2.96$ г/см³):

$$V_f = \frac{\frac{\omega}{\rho_f}}{\frac{\omega}{\rho_f} + \frac{1-\omega}{\rho_m}}.$$

Полученные значения составили $V_{f10} = 0.043$ и $V_{f20} = 0.092$. Базовое уравнение Хальпина – Цая для прогнозирования эффективного модуля упругости коротковолокнистых композитов имеет вид:

$$E_c = E_m \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right), \quad (1)$$

где $\xi = 2(l/d)$ – фактор формы, отражающий аспектное отношение длины кристалла к его диаметру.

Для определения геометрических параметров наполнителя было исследовано дисперсное распределение нитевидных кристаллов сульфата кальция в объеме отвержденной эпоксидной матрицы методом оптической микроскопии (рис. 1). Прямые замеры геометрических характеристик отдельных изолированных вискоз CaSO_4 показали, что их средняя толщина (диаметр) составляет $d \approx 1.86$ мкм, а характерная длина лежит в диапазоне от 20 до 90 мкм.

На основании статистической обработки массива экспериментальных данных ($N = 50$) была построена гистограмма дифференциального распределения кристаллов по длинам (рис. 4). Аппроксимация гистограммы логнормальной функцией позволила определить средневзвешенную длину вискоз, составившую $\langle l \rangle = 44.8$ мкм. Таким образом, среднее аспектное (форм-факторное) отношение исследуемого наполнителя составляет $\langle l/d \rangle \approx 24.1$, $\xi = 48.2$.

Коэффициент эффективности передачи механического напряжения η рассчитывался через соотношение модулей упругости фаз ($E_f = 178$ ГПа):

$$\eta = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi} \approx 0.980.$$

Классический расчет по формуле (1) показал, что при идеальном хаотическом распределении наполнителя модули упругости систем должны составлять 221 МПа и 422 МПа при массовой доле наполнителя 10% и 20% соответственно. Существенное экспериментальное падение модуля упругости при 20% наполнении (до 140 МПа) указывает на крах классической модели из-за структурной неоднородности.

Для математического описания реальной структуры в модель была введена поправка на пространственную агломерацию нитевидных кристаллов [14, 15]. Истинная объемная доля V_f была заменена на функцию эффективного объема наполнителя V_{eff} , учитывающую исключение части вискоз из работы при их слипании в плотные конгломераты:

$$V_{eff} = V_f \cdot \exp(-k \cdot V_f). \quad (2)$$

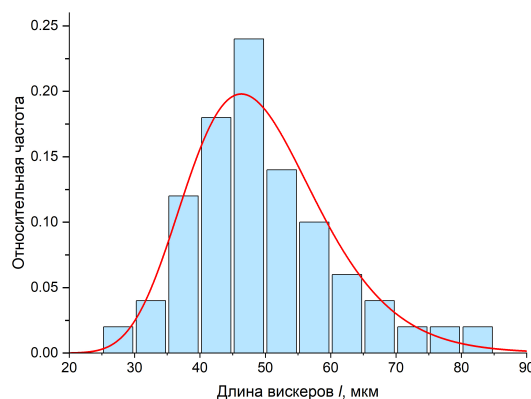


Рис. 4. Гистограмма дифференциального распределения кристаллов по длинам
Fig. 4. Histogram of differential distribution of crystals by length

Численное решение системы уравнений относительно экспериментальной точки $E_{c20} = 140$ МПа позволило извлечь полуэмпирический коэффициент интенсивности агломерации, который составил $k = 15.6$. Это указывает на то, что при избыточном наполнении ($V_{f20} = 0.092$) эффективный объем изолированных, воспринимающих нагрузку вискероов падает до $V_{eff} \approx 0.022$. Разработанная модифицированная модель (1)–(2) обеспечивает высокую степень сходимости с экспериментом и строго доказывает, что лимитирующим фактором жесткости композита выше 10% наполнения выступает лавинообразное структурирование наполнителя в объеме эпоксидной смолы.

5. Микромеханическое моделирование предела прочности при изгибе. Для глубокого понимания механизмов разрушения и оценки адгезионного взаимодействия на межфазной границе «эпоксидная матрица / наполнитель» экспериментальные данные предела прочности при изгибе были проанализированы с использованием модифицированной модели Келли – Тайсона для дискретно армированных сред [16, 17, 18].

Согласно экспериментальным диаграммам изгиба (рис. 3), введение 10% масс. нитевидных кристаллов сульфата кальция ($V_f = 0.043$) обеспечивает экстремальный подъем прочности композита от базовых $\sigma_m = 2.2$ МПа до максимальных $\sigma_{fc} = 6.2$ МПа. Прогнозирование предела прочности при изгибе коротковолокнистых систем осуществлялось по уравнению:

$$\sigma_{fc} = \eta_0 \cdot \sigma_{ff} \cdot V_f \cdot \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + (1 - V_f) \cdot \sigma_m,$$

где $\sigma_{ff} = 2600$ МПа – теоретическая прочность бездефектных вискероов CaSO_4 [19, 20], а $\eta_0 = 0.2$ – коэффициент ориентации, соответствующий их трехмерному хаотичному распределению.

Численная подстановка экспериментальных параметров для точки экстремума (10% наполнителя) позволила извлечь коэффициент эффективности длины, составивший $(1 - l_c/(2l)) \approx 0.183$, откуда было определено соотношение критической и реальной длины кристаллов: $l_c/l \approx 1.63$. То, что критическая длина превышает геометрическую длину вискероов ($l < l_c$), строго доказывает субкритический характер армирования системы. При деформировании композита изгибающим моментом разрушение происходит не за счет перелома самих кристаллов CaSO_4 , а по механизму их вязкого выдергивания (*pull-out*) из полимерной матрицы [21, 22]. Высокая удельная поверхность игольчатого наполнителя обеспечивает эффективное рассеяние энергии трения при выдергивании, что обуславливает почти трехкратный рост прочности компаунда.

Снижение предела прочности при переходе к 20% наполнению (до 3.35 МПа) связано с нарушением сплошности межфазного контакта. Образование плотных пространственных конгломератов иголок сульфата кальция приводит к дефициту связующего на границах раздела. Это выключает внутренние области агломератов из процессов восприятия сдвиговых напряжений, превращая сегрегированный наполнитель в макродефекты структуры, инициирующие преждевременное хрупкое разрушение полимера.

6. Заключение. На основании проведенных теоретико-экспериментальных исследований механических свойств эпоксидных композитов, армированных нитевидными кристаллами сульфата кальция, можно сформулировать следующие основные выводы:

- установлен выраженный немонотонный характер зависимости прочностных и деформационных свойств разработанных композитов от концентрации игольчатого наполнителя. Оптимальным является введение 10% масс. микрокристаллов CaSO_4 , обеспечивающее экстремальный подъем предела прочности при изгибе в 2.8 раза (с 2.2 до 6.2 МПа) и рост модуля упругости в 3 раза (с 60 до 180 МПа) относительно немодифицированной эпоксидной матрицы;
- с привлечением статистической обработки массива экспериментальных данных ($N = 50$) и логнормальной аппроксимации верифицированы геометрические параметры наполнителя в объеме полимера: средняя толщина составила $d \approx 1.86$ мкм, длина – $\langle l \rangle = 44.8$ мкм, что определяет аспектальное отношение $\langle l/d \rangle \approx 24.1$;
- адекватность упругого поведения композита успешно описана в рамках микромеханической модели Хальпина – Цая. Математически доказано, что падение модуля упругости при 20% наполнении (до 140 МПа) обусловлено пространственной сегрегацией иголок с падением их эффективного рабочего объема до $V_{eff} \approx 0.022$ из-за лавинообразной агломерации (полуэмпирический коэффициент интенсивности агломерации составил $k = 15.6$);
- на основе извлеченного из модели Келли – Тайсона коэффициента эффективности длины ~ 0.183 определено соотношение критической и реальной длины кристаллов ($l_c/l \approx 1.63$). Установлено, что армирование носит субкритический характер ($l < l_c$), а разрушение композита при изгибе протекает по механизму вязкого выдергивания (*pull-out*) вискероов из смолы, обеспечивающего эффективное рассеяние механической энергии.

Полученные результаты доказывают высокую технологическую эффективность использования нитевидных кристаллов сульфата кальция в качестве дискретных армирующих элементов для создания высокопрочных конструкционных полимерных композитов.

References

1. Haeri Z., Ramezanzadeh B., Ramezanzadeh M. Recent progress on the metal-organic frameworks decorated graphene oxide (MOFs-GO) nano-building application for epoxy coating mechanical-thermal/flame-retardant and anti-corrosion features improvement. *Progress in Organic Coatings*. 2020;163:106645.
2. Kollu P., Veeramalai C.P., Manickam S. Thermal properties of nanoscale polymer-based coatings. *Polymer-Based Nanoscale Materials for Surface Coatings*. 2023:275–289.
3. Hamerton I., Howlin B.J., Jepson P. Metals and coordination compounds as modifiers for epoxy resins. *Coordination Chemistry Reviews*. 2002;224:67–85.
4. Pham HQ., Marks MJ. Epoxy resins. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. 2000.
5. Wang S., Liang Z., Liu T., Wang B., Zhang C. Effective amino-functionalization of carbon nanotubes for reinforcing epoxy polymer composites. *Nanotechnology*. 2006;17(6):1551–1557.
6. Zhu J., Peng H., Rodriguez-Macias F., Margrave J.L., Khabashesku V.N., Imam A.M., Lozano K., Barrera E.V. Reinforcing epoxy polymer composites through covalent integration of functionalized nanotubes. *Advanced functional materials*. 2004;14(7):643–648.
7. Aziz T., Haq F., Farid A., Cheng L., Chuah L.F., Bokhari A., Mubashir M., Tang D.Y., Show P.L. The epoxy resin system: function and role of curing agents. *Carbon Letters*. 2024;34(1):477–494.
8. Papageorgiou D.G., Li Z., Liu M., Kinloch I.A., Young R.J. Mechanisms of mechanical reinforcement by graphene and carbon nanotubes in polymer nanocomposites. *Nanoscale*. 2020;12(4):2228–2267.
9. Dorozhkin S.V. Calcium orthophosphate (CaPO₄) containing composites for biomedical applications: formulations, properties, and applications. *Journal of Composites Science*. 2024;8:218.
10. Halpin J.C., Kardos J.L. The Halpin-Tsai equations: a review. *Polymer Engineering & Science*. 1976;16(5):344–352.
11. Shokrieh M.M., Moshrefzadeh-Sani H. On the constant parameters of Halpin-Tsai equation. *Polymer*. 2016;106:14–20.
12. Fuchs C., Bhattacharyya D., Friedrich K., Fakirov S. Application of Halpin-Tsai equation to microfibril reinforced polypropylene/poly (ethylene terephthalate) composites. *Composite Interfaces*. 2006;13:331–344.
13. Ghafaar M.A., Mazen A.A., El-Mahallawy N.A. Application of the rule of mixtures and Halpin-Tsai equations to woven fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Engineering Sciences*. 2006;34:227–236.
14. Wang J., Gong L., Xi S., Li C., Su Y., Yang L. Synergistic effect of interface and agglomeration on Young's modulus of graphene-polymer nanocomposites. *International Journal of Solids and Structures*. 2024;292:112716.
15. Pan J., Liu J., Gao M., Liu X., Zhang L. Ellipsoidal carbon nanotube agglomeration impact on composite elastic modulus. *Journal of Mechanics*. 2025;41:377–391.
16. Kelly A., Tyson W.R. Tensile properties of fibre-reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1965;13(6):329–350.
17. Thodsaratpreeyakul W., Uawongsuwan P., Kataoka A., Negoro T., Hamada H. The determination of interfacial shear strength in short fiber reinforced poly ethylene terephthalate by Kelly-Tyson theory. *Open Journal of Composite Materials*. 2017;7(4):218–226.
18. Migneault S., Koubaa A., Erchiqui F., Chaala A., Englund K., Wolcott M.P. Application of micromechanical models to tensile properties of wood-plastic composites. *Wood Science and Technology*. 2011;45(3):521–532.
19. Qiao R., Zhong Z., Liu Q., Liu J., He W. Effects of Calcium Sulfate Whiskers on the Mechanical Properties and Light Transmittance of PE Greenhouse Films. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2160:012004.
20. Nikulin I., Ivanov O., Nikulicheva T., Mishunin M., Vyugin A., Alfimova N., Vyazmin V., Saenko M. Mechanical strength measurement of needle-shaped CaSO₄ microcrystals by a three-point bend test. *Measurement Science and Technology*. 2024;35(5):055603.
21. Inal O., Katnam K.B., Potluri P., Soutis C. Progress in interlaminar toughening of aerospace polymer composites using particles and non-woven veils. *The Aeronautical Journal*. 2022;126(1295):222–248.
22. Bilge K., Papila M. Interlayer toughening mechanisms of composite materials. *Toughening Mechanisms in Composite Materials*. 2015:263–294.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 01.06.2026

Received June 1, 2026

Поступила после рецензирования 10.07.2026

Revised July 10, 2026

Принята к публикации 14.07.2026

Accepted July 14, 2026

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Никулин Иван Сергеевич – заведующий лабораторией физико-химических методов исследования растений, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Милостной Даниил Николаевич – лаборант-исследователь лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Кунгурцев Максим Сергеевич – старший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Воропаев Валерий Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Никуличева Татьяна Борисовна – заведующий лабораторией перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Ядута Анна Зауровна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерного моделирования, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan S. Nikulin – Head of the Laboratory of Physical and Chemical Methods of Plant Research, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Daniil N. Milostnoy – Laboratory Research Assistant, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Maksim S. Kungurtsev – Senior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Valery S. Voropaev – Junior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Tatiana B. Nikulicheva – Head of the Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Anna Z. Yaduta – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Modeling, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

К содержанию