

Механические свойства полимерной композиции на основе эпоксидной смолы при вариации толщины оболочки полилактида на поверхностях дисперсных частиц оксида меди (I)

Epoxy resin mechanical properties in composition with copper (I) oxide particles, encapsulated by polylactide with variable thickness

*Е.А. БОБИНА¹, М.П. ДАНИЛАЕВ¹, Т.Р. ДЕБЕРДЕЕВ², С.В. ДРОБЫШЕВ¹,
С.А. КАРАНДАШОВ¹, М.А. КЛАБУКОВ¹, В.А. КУКЛИН^{1,3}, К.В. ФАЙЗУЛЛИН¹*
*E.A. BOBINA¹, M.P. DANILAEV¹, T.R. DEBERDEEV², S.V. DROBYSHEV¹,
S.A. KARANDASHOV¹, M.A. KLABUKOV¹, V.A. KUKLIN^{1,3}, K.V. FAIZULLIN¹*

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

³ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

² Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia

³ Kazan Federal University, Kazan, Russia

danilaev@mail.com

Обеспечение требуемых функциональных и механических свойств необходимо при создании дисперсно-наполненных полимерных композиций. Варьирование толщины оболочки капсулированных частиц наполнителя позволяет изменять механические свойства такой композиции. В работе показано, что наличие полимерной оболочки полилактида и ее толщина на поверхностях частиц оксида меди (I) существенно влияет на показатели прочности полимерного композиционного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Обосновано, что такое влияние обусловлено повышением взаимодействия между капсулированными частицами и полимером матрицы, в отличие от некапсулированных частиц. Кроме того, изменение размера частиц с ростом толщины оболочки также влияет на прочностные свойства композиции. Показано, что модуль упругости наполненного материала не зависит от толщины оболочки на поверхностях частиц.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, прочность, дисперсные частицы, капсулирование

The required functional and mechanical properties are necessary for design the polymer compositions with dispersed fillers. The mechanical properties of such polymer composition can be changed by encapsulated filler particles shell thickness varying. The paper shows that the presence of polylactide polymer shell and its thickness on the surfaces of copper (I) oxide particles significantly affect the strength of polymer composite material based on ED-20 epoxy resin. That is due to the interaction between encapsulated particles and the matrix polymer, in contrast to noncapsulated particles. In addition, a change in particle size due to increasing shell thickness also affects the strength properties of the composition. It is shown that the elastic modulus of the filled epoxy composite does not depend on the shell thickness on the particle surfaces.

Keywords: polymer composite, strength, dispersed fillers, encapsulated

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-31-34

Введение

Обеспечить воспроизводимость механических характеристик полимерной композиции с дисперсными частицами возможно при условии адгезии частиц к матричному полимеру [1, 2]. Это обусловлено снижением концентрации агломератов частиц наполнителя в полимерном композиционном материале (ПКМ) [4, 5] и повышением однородности распределения дисперсных частиц [6]. Повышения адгезии, вплоть до образования химических связей между макромолекулами полимера и частицами, добиваются путем модификации дисперсных частиц [7, 8]. Следует отметить, что межфазное взаимодействие между частицами и матричным полимером влияет на структуру и подвижность макромолекул полимера, что приводит к изменению механических ПКМ. Так, в работах [9, 10] проведен анализ влияния межфазного взаимодействия дисперсных частиц с матричным полимером на комплекс физико-технических свойств полимерных композитов. Классифицированы типы взаимодействий между составляющими полимерной композиции и рассмотрены методы измерения силы этих взаимодействий. В обзорной работе [11] показано, что модифицированные наночастицы могут являться центрами зародышеобразования надмолекулярных структур в матричном полимере, что существенно

влияет на его механические характеристики. Причем типы надмолекулярных структур определяются степенью взаимодействия наночастиц с макромолекулами полимера и их концентрацией.

Один из подходов к модификации дисперсных частиц основан на формировании полимерной оболочки на их поверхностях [12]. Механические характеристики ПКМ, наполненных капсулированными частицами, определяются, в том числе, следующими факторами: механическими свойствами и толщиной полимерной оболочки на поверхностях частиц [12, 13], ограничением подвижности макромолекул аморфного полимера вследствие их взаимодействия с частицами [14], а также концентрацией и размерами частиц [15, 16]. Варьировать механические характеристики для выбранного типа частиц наполнителя и определенной их концентрации можно за счет изменения толщины полимерной оболочки. Так, исследования АБС-пластика в композиции с капсулированными полистиролом частицами оксида алюминия показали [12], что механические свойства оболочки зависят от толщины оболочки.

Возможность управлять механическими характеристиками особенно важна при создании дисперсно-наполненных ПКМ с комплексом требуемых механических и функциональных свойств.

Так, при армировании полимера натуральными волокнами возможно получить набор практически важных функциональных свойств, например, высокую теплоизоляцию, возможность биодеградаций, эффективное подавление вибраций. Однако натуральные волокна имеют низкую адгезию к некоторым полимерам. Поэтому механические характеристики таких полимерных композиций оказываются ниже, чем у полимеров, наполненных стекловолокном [17]. Обеспечение требуемых механических характеристик необходимо и для полимерных композитов с биоцидным эффектом. В исследовании [18] авторы синтезировали ПКМ, в котором биоцидный эффект обеспечивали за счет использования частиц оксида цинка. Установлено снижение прочностных характеристик такого ПКМ по сравнению с ненаполненным полимером. Причиной этого является низкая адгезия частиц наполнителя к матричному полимеру.

Дисперсные частицы оксида меди, капсулированные полилактидом, могут быть использованы для повышения стойкости к биодеструкции полимеров на основе эпоксидных смол. При этом, с одной стороны, использование полилактида в качестве материала оболочки способствует снижению площади поражения образцов микроорганизмами-деструкторами [19]. С другой стороны, капсулирование частиц позволит повысить их адгезию к матричному полимеру, а изменение толщины оболочки полилактида должно повлиять на механические характеристики композиции.

Цель данной работы состоит в определении влияния толщины оболочки полилактида на механические свойства полимерной композиции на основе эпоксидной смолы ЭД-20, наполненной капсулированными частицами оксида меди (I).

Следует отметить, что величины модуля упругости полимера на основе отвержденной эпоксидной смолы ЭД-20 (3–5 ГПа) и полилактида (2–3 ГПа) [20] имеют близкие значения. В работе [21] показано, что разные значения модуля упругости (E) для полимерной композиции с капсулированными и некапсулированными дисперсными частицами наблюдаются только в случае существенного различия E для матричного полимера и полимера оболочки. Поэтому, по всей видимости, изменение толщины оболочки полилактида будет влиять только на прочностные характеристики ПКМ. Для подтверждения этой гипотезы и достижения цели работы были изготовлены образцы соответствующего ПКМ и проведены исследования их механических характеристик.

Экспериментальные методы и материалы

Формирование оболочки полилактида на поверхностях частиц оксида меди (I)

Оболочку полилактида (производства Natural Works LLC марки PLA 4043D) на поверхностях дисперсных частиц оксида меди (I) (ТУ 6-09-765-76 с квалификацией «ЧДА») получали с использованием коацервации полилактида (ПЛА) из раствора [22]. В основе метода лежит вытеснение ПЛА из его раствора в бензоле путем добавления вытесняющего растворителя (гексана) в присутствии частиц оксида меди (I). По мере добавления гексана (ТУ 2631-158-44493179-13 с квалификацией чистоты «хч») вытесняемые из раствора молекулы ПЛА осаждались, в том числе, на поверхностях частиц. Таким образом получали на них оболочку ПЛА. Введение гексана осуществляли постепенно, после чего суспензию фильтровали для выделения частиц, капсулированных ПЛА. Толщина (h) оболочки ПЛА зависит от таких параметров, как исходная концентрация ПЛА в растворе, температура раствора, скорость и объем добавляемого вытесняющего растворителя. Изменение толщины оболочки ПЛА в данной работе обеспечивали за счет варьирования скорости добавления вытесняющего растворителя в диапазоне от 10 до 60 капель в минуту. Время перемешивания суспензии изменялось соответственно от 20 минут до 100 минут. В экспериментах не изменялись: концентрация ПЛА в растворе на 100 мл бензола, объем добавляемого гексана ($15 \pm 0,5$ мл) и температура раствора $35 \pm 2^\circ\text{C}$.

Получение образцов ПКМ, наполненных частицами с разной толщиной оболочки ПЛА

Образцы ПКМ получали путем введения в эпоксидную смолу ЭД-20 полученных капсулированных ПЛА частиц оксида меди

(I). Массовая концентрация частиц наполнителя во всех образцах составляла ($0,5 \pm 0,05$)%. Значение объемной концентрации частиц наполнителя в образцах составило $\sim 0,1\%$, средний размера частиц оксида меди (I) составлял 500 ± 25 нм. Частицы добавляли в эпоксидную смолу постепенно, со скоростью $0,1 \pm 0,05$ г/мин, при постоянном перемешивании при температуре эпоксидной смолы (35 ± 2) $^\circ\text{C}$. В полученную суспензию при постоянном перемешивании добавляли отвердитель М4 (ISO 7327:1994) в соотношении 1:6 по массе к эпоксидной смоле. После этого материал помещали в емкость, форма которой соответствует цилиндрической форме образца ($\varnothing 9 \pm 1$ мм, высотой 50 ± 2 мм). Форму выдерживали 24 ± 3 часа до полной полимеризации эпоксидной смолы. Выдержку осуществляли в естественных условиях при температуре окружающей среды ($23\text{--}25^\circ\text{C}$) и влажности ($30\text{--}40\%$). Классификация образцов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Классификация образцов.

Наименование образца	Толщина оболочки полилактида на частицах, нм
Образец 0	0
Образец 1	$10 \pm 1,0$
Образец 2	$20 \pm 2,0$
Образец 3	$25 \pm 2,3$
Образец 4	$50 \pm 7,4$
Образец 5	$125 \pm 16,5$

Методы исследования

Изображения частиц, как отдельных, так и в образцах, получали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе Carl Zeiss AURIGA Cross Beam с ЭДВ Inca X-Max 80 мм². Определение толщины h осуществляли путем статистической обработки микрофотографий капсулированных и некапсулированных частиц в программной среде ImageJ. Для получения достоверных результатов использовали выборку не менее 800 частиц [23]. Среднюю толщину оболочки h определяли по формуле $h = (d_2 - d_1)/2$, где d_2 – средний размер капсулированных частиц, d_1 – средний размер некапсулированных частиц, равный 500 ± 25 нм. Определение механических характеристик проводили на универсальной настольной испытательной машине для физико-механических испытаний различных материалов Shimadzu AG-X 50 kN. При проведении испытаний скорость нагружения при сжатии составляла 0,1 мм/мин (с погрешностью не более 10%); температура окружающей среды – $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Результаты и их обсуждение

Толщина оболочки ПЛА определяется вероятностью неупругих столкновений молекул ПЛА с частицами оксида меди (I) в суспензии и частотой столкновений [24]. Толщина оболочки h уменьшается с ростом скорости (ϑ) добавления вытесняющего растворителя в суспензию частиц с раствором ПЛА в бензоле (рис. 1). Это может быть обусловлено уменьшением времени перемешивания суспензии с ростом скорости ϑ . Уменьшение времени перемешивания суспензии приводит к снижению числа соударений, в том числе и неупругих, молекул ПЛА с частицами оксида меди (I). Как следствие – уменьшение толщины оболочки ПЛА.

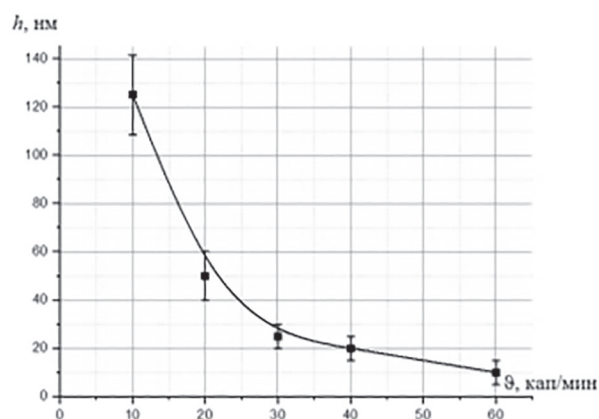


Рис. 1. Зависимость толщины оболочки ПЛА на частицах оксида меди (I) от скорости добавления гексана.

Используемый способ введения капсулированных частиц в полимерную матрицу позволял сохранить оболочку на поверхностях частиц (рис. 2).

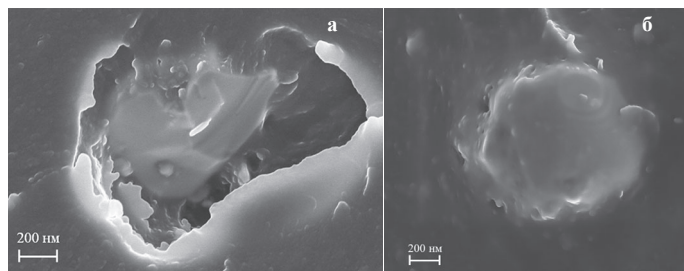


Рис. 2. Микрофотография сколов образцов: а – образца 0; б – образца 4.

По периметру капсулированных частиц отсутствуют пустоты (рис. 2б), в отличие от частиц некапсулированных (рис. 2а), что свидетельствует о хорошей их смачиваемости матричным полимером. Это позволяет предположить повышение взаимодействия между полимерной матрицей и капсулированными частицами по сравнению с частицами некапсулированными, как показано в работах [22, 25, 26].

Модуль упругости при сжатии (E) исследуемого ПКМ не зависит от толщины оболочки ПЛА на поверхностях частиц оксида меди (I) (рис. 3), с учетом погрешности измерений. Модуль упругости полимера на основе смолы ЭД-20, наполненного некапсулированными частицами, в экспериментах составил $E_0 = 3,4 \pm 0,2$ ГПа, модуль упругости ненаполненного полимера – $E_H = 3,1 \pm 0,2$ ГПа. Погрешность измерений не превышала 10%.

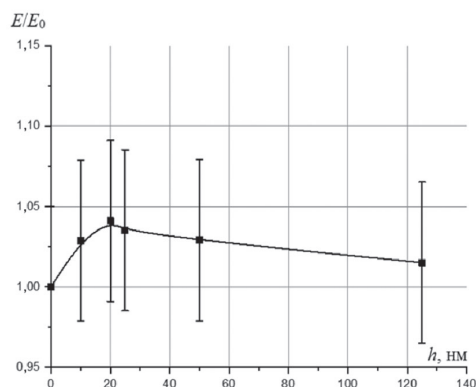


Рис. 3. Зависимость приведенного модуля упругости образцов от толщины оболочки ПЛА на частицах оксида меди (I).

Неизменное значение модуля упругости E для всех образцов (рис. 3) обусловлено следующими причинами. Во-первых, близкими по величине значениями модулей упругости полилактида и полимерной матрицы на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Во-вторых, малой объемной концентрацией дисперсных частиц в ПКМ, которая составляла $\sim 0,1\%$. В работе [21] показано, что при малой концентрации дисперсных частиц в полимерной матрице модуль упругости ПКМ определяется модулями упругости полимера матрицы и оболочки.

Показатели прочностных характеристик ПКМ имеют существенно нелинейную зависимость от толщины оболочки h (рис. 4). Следует отметить, что в экспериментах наблюдалась высокая повторяемость показателей прочностных характеристик ПКМ: среднеквадратичное отклонение не превышало 5%.

Предельная прочность композиций с некапсулированными частицами в экспериментах составила $\sigma_0 = 45,2 \pm 3,5$ МПа, а предельная деформация – $\varepsilon_0 = 5,4 \pm 0,44\%$. Предельные характеристики ненаполненного полимера составили: $\sigma_H = 48,2 \pm 1,5$ МПа и $\varepsilon_H = 3,8 \pm 0,23\%$ ($\sigma_H/\sigma_0 = 1,07$, $\varepsilon_H/\varepsilon_0 = 0,71$). Снижение предела прочности ПКМ с некапсулированными частицами относительно ненаполненного материала может быть обусловлено недостаточной адгезией частиц к полимеру матрицы и образованием вакуолей на границе частица – полимер [18, 27].

Изменение показателей прочностных характеристик ПКМ с капсулированными частицами (рис. 4) обусловлено повышением взаимодействия полимерной матрицы с полимером оболочки, благодаря их химическому сродству. За счет этого капсулированные частицы встраиваются в сетку полимерной матрицы, увеличивая ее плотность. Это способствует росту предела

прочности и снижению предельной деформации ПКМ при малых толщинах оболочки. Однако в силу хорошей адгезии между полимерной матрицей с капсулированными частицами усадка при отверждении эпоксидной смолы приводит к возникновению остаточных напряжений на границе капсулированной частицы – матричного полимера [3, 28]. Известно, что остаточные напряжения являются причиной снижения предела прочности [21]. Благодаря этим двум конкурирующим процессам кривые зависимости предела прочности и предельной деформации имеют экстремум. По всей видимости, при толщинах оболочки более 20 нм преобладающее влияние на прочностные характеристики ПКМ оказывают остаточные напряжения, приводящие к снижению его предела прочности [29].

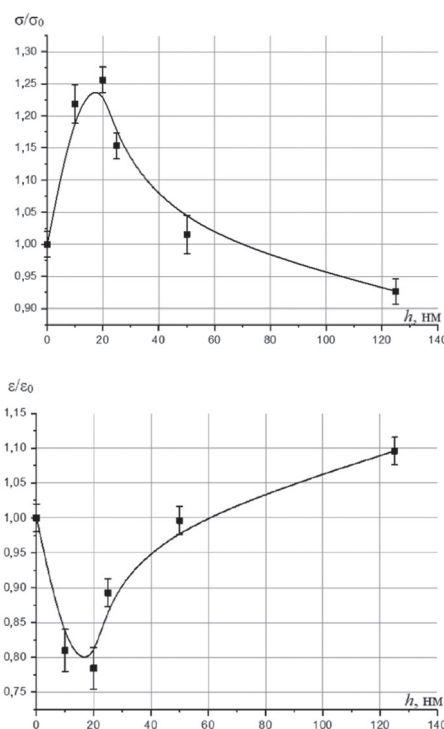


Рис. 4. Зависимости прочностных характеристик от толщины оболочки ПЛА на частицах оксида меди (I): а – предельная прочность; б – предельная деформация.

Следует отметить, что значение предела прочности ПЛА зависит от его плотности. Так, в работе [30] показано изменение предела прочности ПЛА в пределах от 30 МПа до 65 МПа при изменении его плотности соответственно от $0,2\rho$ до ρ , где $\rho = 1,25$ г/см³. Плотность оболочки ПЛА зависит от условий ее формирования. Влияние условий формирования полимерной оболочки на ее плотность с использованием метода коацервации из раствора исследовано в работе [31]. В этой работе показано, что плотность полимерной оболочки возрастает с увеличением времени ее получения. В нашем случае тонкой оболочке ПЛА соответствует малое время перемешивания частиц в суспензии (высокая скорость добавления гексана) и, соответственно, меньшая плотность ПЛА. Однако значения показателей прочностных характеристик ПЛА при плотностях выше $(0,4-0,5)\rho$ сопоставимы и превышают [30] предел прочности используемого в работе матричного полимера. Поэтому, по всей видимости, прочностные свойства ПКМ при большой толщине оболочки определяются только остаточными напряжениями на границе «капсулированная частица – матричный полимер», а не показателями прочности ПЛА.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что наличие полимерной оболочки полилактида и ее толщина на поверхностях частиц оксида меди (I) влияют на показатели прочности (предельная прочность, предельная деформация) полимерного композиционного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Это влияние определяется, по крайней мере, двумя факторами: повышением взаимодействия макромолекул матричного полимера с полимером оболочки и возникающими остаточными напряжениями на границе капсулированной частицы – матричного

полимер. При средней толщине (h) оболочки менее 20 нм преобладает первый фактор, при толщине $h > 50$ нм – второй фактор. Повышение предела прочности (относительно материала, наполненного некапсулированными частицами) на 25% и снижение предельной деформации на 20% наблюдали в экспериментах при толщине оболочки ~20 нм. Следует отметить повышение предела прочности ПКМ, наполненного капсулированными частицами ($\sigma = 55,2 \pm 2,5$ МПа), относительно ненаполненного полимерного композиционного материала ($\sigma_n = 48,2 \pm 1,5$ МПа). Модуль упругости при сжатии исследуемого ПКМ не зависит от толщины оболочки ПЛА на поверхностях частиц оксида меди (I).

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №23-29-00160.

Литература

1. Fu S.-Y., Feng X.-Q., Lauke B., Mai Y.-W. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites // *Compos. Part B Eng.* 2008. V. 39, №6. P. 933–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002>.
2. Kawaguchi T., Pearson R.A. The effect of particle-matrix adhesion on the mechanical behavior of glass filled epoxies: Part I. A study on yield behavior and cohesive strength // *Polymer*. 2003. V. 44, №15. P. 4229–4238. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00371-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00371-9).
3. Сапронов А.А., Бень А.П., Букетова Н.Н. Исследование адгезионных и физико-механических свойств эпоксидных нанокомпози́тов, наполненных фуллереном C 60 // *Пластические массы*. 2015. №9–10. С. 18–21.
4. Kuklin V., Karandashov S., Bobina E. et al. Analysis of Aluminum Oxides Submicron Particle Agglomeration in Polymethyl Methacrylate Composites // *Int. J. Mol. Sci. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2023. V. 24, № 3. P. 2515. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24032515>.
5. Samal S. Effect of shape and size of filler particle on the aggregation and sedimentation behavior of the polymer composite // *Powder Technol.* 2020. V. 366. P. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.054>.
6. Paszkiewicz S., Pypeć K., Irska I. and Piesowicz E. Functional Polymer Hybrid Nanocomposites Based on Polyolefins: A Review // *Processes. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2020. V. 8, №11. P. 1475. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8111475>.
7. Mittal V. Surface Modification of Nanoparticle and Natural Fiber Fillers. John Wiley & Sons, 2015. 242 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527670260>.
8. Ghosh Chaudhuri R., Paria S. Core/Shell Nanoparticles: Classes, Properties, Synthesis Mechanisms, Characterization, and Applications // *Chem. Rev. American Chemical Society*, 2012. V. 112, №4. P. 2373–2433. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr100449n>.
9. Kashfipour M.A., Mehra N., Zhu J. A review on the role of interface in mechanical, thermal, and electrical properties of polymer composites // *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 2018. V. 1, №3. P. 415–439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0022-9>.
10. Jesson D.A., Watts J.F. The Interface and Interphase in Polymer Matrix Composites: Effect on Mechanical Properties and Methods for Identification // *Polym. Rev. Taylor & Francis*, 2012. V. 52, №3. P. 321–354. DOI: <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.710288>.
11. Кахраманов Н.Т., Гулиев А.Д., Аллахвердиева Х.В. Состояние проблемы получения и исследования структуры и свойств нанокомпози́тов на основе полиолефинов и минеральных наполнителей // *Пластические массы*. 2022. Т. 1, №11–12. С. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-11-12-46-52>.
12. Akhmadeev A.A., Bogoslov E.A., Danilaev M.P. et al. Influence of the Thickness of a Polymer Shell Applied to Surfaces of Submicron Filler Particles on the Properties of Polymer Compositions // *Mech. Compos. Mater.* 2020. V. 56, №2. P. 241–248. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09876-4>.
13. Danilaev M.P., Karandashov S.A., Kiyamov A.G. et al. Formation and Behavior of Residual Stresses in Particulate-Filled Polymer Composites with a Partially Crystalline Structure // *Phys. Meso-mech.* 2022. V. 25, № 4. P. 335–343. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1029959922040075>.
14. Valenkov A.M., Gofman I.V., Nosov K.S. et al. Polymeric composite systems modified with allotropic forms of carbon (review) // *Russ. J. Appl. Chem.* 2011. V. 84, №5. P. 735–750. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427211050016>.
15. Lopresti F., Pavia F.C., Vitranio I. et al. Effect of hydroxyapatite concentration and size on morpho-mechanical properties of PLA-based randomly oriented and aligned electrospun nanofibrous mats // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2020. V. 101. P. 103449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103449>.
16. Rodríguez H.A., Kriven W.M., Casanova H. Development of mechanical properties in dental resin composite: Effect of filler size and filler aggregation state // *Mater. Sci. Eng. C*. 2019. V. 101. P. 274–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.03.090>.
17. Takagi H. Review of Functional Properties of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites: Thermal Insulation, Biodegradation and Vibration Damping Properties // *Adv. Compos. Mater. Taylor & Francis*, 2019. V. 28, № 5. P. 525–543. DOI: <https://doi.org/10.1080/09243046.2019.1617093>.
18. Wang Y., Hua H., Li W. et al. Strong antibacterial dental resin composites containing cellulose nanocrystal/zinc oxide nanohybrids // *J. Dent.* 2019. V. 80. P. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.11.002>.
19. Данилаев М.П., Ильинская О.Н. Карандашов С.А. и др. Полимерная композиция с биоцидным эффектом // *Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности, Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием – г. Бийск, 2022. С. 316–318. DOI: 10.25699/tohbipp.2022.60.48.034.*
20. Murariu M., Dechief A.L., Bonnaud L. et al. The production and properties of polylactide composites filled with expanded graphite // *Polym. Degrad. Stab.* 2010. V. 95, № 5. P. 889–900. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.12.019>.
21. Механические свойства дисперсно-армированных полимерных композиционных материалов: коллективная монография / И.Н. Сидоров, М.П. Данилаев, В.А. Куклин, А.И. Энская. – Казань: КНИТУ-КАИ. 160 с.
22. Данилаев М.П., Дорогов Н.В., Дробышев С.В. и др. Капсулирование дисперсных частиц оксида меди (I) полилактидом // *Конденсированные среды и межфазные границы. Т. 25, №1. С. 27–36. DOI: https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/10943.*
23. Danilaev M.P., Drobyshev S.V., Klabukov M.A. et al. Formation of a Polymer Shell of a Given Thickness on Surfaces of Submicronic Particles // *Nanobiotechnology Rep.* 2021. V. 16, №2. P. 162–166. DOI: <https://doi.org/10.1134/S263516762102004X>.
24. Чёрный Г.Г., Лосев С.А. (ред.) Физико-химические процессы в газовой динамике, том 1 [Электронный ресурс]. URL: https://www.studmed.ru/chernyy-gg-losev-sa-red-fiziko-himicheskie-processy-v-gazovoy-dinamike-tom-1_e1dd614af27.html.
25. Osman E., Vakhguel A., Sbarski I. and Mutasher S.A. Mechanical Properties of Kenaf - Unsaturated Polyester Composites: Effect of Fiber Treatment and Fiber Length // *Adv. Mater. Res. Trans Tech Publications Ltd*, 2011. V. 311–313. P. 260–271. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.260>.
26. Gutiérrez-Mejía A., Herrera-Kao W., Duarte-Aranda S. et al. Synthesis and characterization of core-shell nanoparticles and their influence on the mechanical behavior of acrylic bone cements // *Mater. Sci. Eng. C*. 2013. V. 33, №3. P. 1737–1743. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.12.087>.
27. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: https://www.studmed.ru/pobedrya-be-mekhanika-kompozitsionnyh-materialov_a9bfe168ebe.html.
28. Коротков В.Н., Чеканов Ю.А., Розенберг Б.А. Усадочные дефекты при отверждении полимерных композитных материалов (Обзор) // *Высокомолекулярные соединения, Серия А*. 1994. Т. 36, №4. С. 684–693.
29. Свистков А.Л. Моделирование разрушения эластомера с твердым наполнителем зернистого типа с учетом характерных размеров включений // *Высокомолекулярные соединения Серия А*. 1994. Т. 36, №3. С. 412–418.
30. В.М. Петров, С.Н. Безпальчук, С.П. Яковлев. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати // *Вестник государственного университета морского и речного флота им адмирала С. О. Макарова*. 2017. №4 (44). – С. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.
31. Ильющенко Е.В., Киенская К.И., Авраменко Г.В. Микроэмульсионное инкапсулирование гидрохлорида тригексифенидила // *Химическая технология*. 2010. №3. С. 165–169.