

УДК 539.3

EDN: RCHURA DOI: 10.31429/vestnik-20-3-57-65

Моделирование предельных прочностных показателей полимерных композиций, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита

В. И. Колесников¹, В. В. Бардушкин², И. В. Лавров², А. П. Сычев³✉,
В. Б. Яковлев², А. М. Ананко¹

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Ростов-на-Дону, 344038, Россия

² Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, ул. Нагатинская, 16а, корп. 11, Москва, 115487, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр-кт Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

✉ Сычев Александр Павлович; ORCID 0000-0001-6344-108X; e-mail: alekc_sap@mail.ru

Аннотация. Решается задача построения модели и проведения численных расчетов значений предельных прочностных показателей при одноосном сжатии полимерных композиций, модифицированных шарообразными микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита. Модель опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей в варианте метода самосогласования и позволяет учитывать состав, объемные доли компонентов антифрикционных покрытий и характерный размер микрокапсул (отношение толщины оболочки к радиусу жидкого ядра). Для композиций на основе эпоксидного связующего ЭД-20 (отвердитель ПЭПА) с микрокапсулами (полиэфирные оболочки, заполненные растительным маслом и наночастицами магнетита) проведены модельные расчеты их предельных прочностных показателей при одноосном сжатии. Расчеты учитывали изменение характерного размера и неравномерность распределения микрокапсул по толщине антифрикционных покрытий, возникающую в результате воздействия постоянного магнитного поля. Численное моделирование показало, что увеличение объемной доли микрокапсул приводит к снижению значений предельных прочностных показателей полимерных композиций, при этом для используемых на практике процентных содержаний микрокапсул данное снижение не является существенным.

Ключевые слова: моделирование, микрокапсула, эпоксидное связующее, магнетит, оператор концентрации напряжений, прочность при сжатии.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 21-19-00288).

Цитирование: Колесников В. И., Бардушкин В. В., Лавров И. В., Сычев А. П., Яковлев В. Б., Ананко А. М. Моделирование предельных прочностных показателей полимерных композиций, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20, № 3. С. 57–65. EDN: RCHURA. DOI: 10.31429/vestnik-20-3-57-65

Поступила 29 июня 2023 г. После доработки 25 июля 2023 г. Принято 27 июля 2023 г. Публикация 29 сентября 2023 г.

Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2023. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Simulation of Ultimate Strength Characteristics of Polymer Compositions Modified with Lubricant Microcapsules and Magnetite Nanoparticles

V. I. Kolesnikov¹, V. V. Bardushkin², I. V. Lavrov², A. P. Sychev³✉, V. B. Yakovlev², A. M. Ananko¹

¹ Rostov State Transport University, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia

² Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Nagatinskaya st., 16a, build. 11, Moscow, 115487, Russia

³ Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Chekhova, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia

✉ Aleksandr P. Sychev; ORCID 0000-0001-6344-108X; e-mail: alekc_sap@mail.ru

Abstract. The problem of constructing a model and carrying out numerical calculations of the values of ultimate strength indicators under uniaxial compression of polymer compositions modified with spherical microcapsules with a lubricant and magnetite nanoparticles is being solved. The model is based on the generalized singular approximation of the random fields theory in the version of the self-consistency method and makes it possible to take into account the composition, volume fractions of the components of antifriction coatings, and the characteristic size of microcapsules (the ratio of the shell thickness to the radius of the liquid core). For compositions based on epoxy binder ED-20 (PEPA hardener) with microcapsules (polyester shells filled with vegetable oil and magnetite nanoparticles), model calculations of their ultimate strength parameters under uniaxial compression were carried out. The calculations took into account the change in the characteristic size and the uneven distribution of microcapsules over the thickness of antifriction coatings, which occurs as a result of exposure to a constant magnetic field. Numerical modeling has shown that an increase in the volume fraction of microcapsules leads to a decrease in the values of ultimate strength parameters of polymer compositions, while for the percentages of microcapsules used in practice, this decrease is not significant.

Keywords: simulation, microcapsule, epoxy binder, magnetite, stress concentration operator, compressive strength.

Funding. This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-19-00288).

Cite as: Kolesnikov, V. I., Bardushkin, V. V., Lavrov, I. V., Sychev, A. P., Yakovlev, V. B., Ananko, A. M., Simulation of ultimate strength characteristics of polymer compositions modified with lubricant microcapsules and magnetite nanoparticles. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 57–65. DOI: 10.31429/vestnik-20-3-57-65

Received 29 June 2023. Revised 25 July 2023. Accepted 27 July 2023. Published 29 September 2023.

The authors contributed equally. The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2023. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Микрокапсулы широко используются в различных отраслях промышленного производства — машиностроении, медицине, сельском хозяйстве, химической промышленности и др. [1, 2]. В частности, они применяются при металлообработке (подача смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в виде микрокапсул при резании металлов) [3] и разработке адаптивных самозалечивающихся материалов [4]. Полимерные покрытия (лаки), в состав которых входят наполненные жидким смазочным материалом шарикообразные микрокапсулы, в последние годы также находят все более широкое применение в триботехнике. Микрокапсулы таких покрытий могут выделять смазку при механическом разрушении (например, в результате нагрузок, возникающих на поверхностях трения), что приводит к повышению износостойкости деталей машин и механизмов [5, 6].

Владение технологиями, позволяющими влиять на распределение микрокапсул в объеме материала, важно при решении задачи улучшения его физико-механических характеристик. В работе [3] показано, что функционализация оболочек микрокапсул магнитными наночастицами Fe_3O_4 позволяет управлять их локализацией в зоне контакта при лезвийном резании материалов, снижая при этом техногенные риски и улучшая экологию металлообработки. В работе [7] показано, что, используя микрокапсулы с наночастицами магнетита, можно с помощью магнитного поля управлять их распределением в объеме полимерного композита. В работе [8] указывается, что основным методом получения подобных капсул является ионная сборка.

Для реализации возможности управления распределением микрокапсул магнитным полем в капсулированных покрытиях антифрикционного назначения авторами настоящей статьи был разработан метод синтеза магниточувствительных капсул со смазочным материалом и наноразмерными частицами магнетита Fe_3O_4 , предварительно размолотыми при помощи планетарной мельницы до размеров 20–100 нм. Полиэфирные оболочки микрокапсул являлись результатом химического взаимодействия себацил хлорида и этиленгликоля, а в качестве

жидкого ядра микрокапсул использовалось растительное масло. Полученные микрокапсулы вводились в эпоксидную матрицу ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Аминный отвердитель ПЭПА помимо своей основной функции — отверждения эпоксидной смолы, позволяет также устранить агрегацию микрокапсул, препятствуя их слипанию и обеспечивая необходимое распределение в объеме полимерного покрытия. До начала процесса отверждения эпоксидной матрицы микрокапсулы со смазкой и наночастицами магнетита перемещали к поверхности трения, воздействуя на неоднородный материал постоянным магнитным полем.

Экспериментальные методы разработки и создания полимерных композиций, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита, являются довольно дорогостоящими. Поэтому при решении проблемы подбора состава и оптимизации содержания компонентов подобных материалов все большее значение приобретают теоретические методы прогнозирования их физико-механических свойств [5, 6, 9, 10].

Целью работы является построение модели и проведение численных расчетов значений предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) полимерных композиций, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита. При этом модель должна учитывать неравномерность распределения микрокапсул с наночастицами магнетита по толщине антифрикционного полимерного покрытия, возникающую в результате воздействия магнитного поля (чем ближе к поверхности трения, тем выше объемное содержание микрокапсул в материале).

1. Построение модели

Предлагаемый в работе подход позволяет учитывать структуру включений в оболочке, а также состав и процентные объемные содержания компонентов полимерных композиций. Моделирование опирается на разработанный в статье [11] метод прогнозирования предельных прочностных характеристик матричных композитов при их хрупком разрушении, основанный на использовании оператора концентрации напряжений (тензора четвертого ранга) $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$. Этот оператор связывает локальные значения тензора напряжений $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ с внешними (средними) по материалу напряжениями $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ (\mathbf{r} — радиус-вектор случайной точки неоднородной среды) [9–11]:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3. \quad (1.1)$$

Угловые скобки в (1.1) и далее по тексту определяют процедуру статистического усреднения по объему [12]. С помощью оператора концентрации напряжений $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ можно судить о виде и величине напряжения $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$, возникающего внутри элемента неоднородности любого типа в композите, зная вид внешнего воздействия $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$.

Разработанный в статье [11] метод прогнозирования предельных прочностных характеристик матричных композитов состоит в следующем. В матричных композитах фундаментальную роль играет матрица, т.к. она перераспределяет механические напряжения между всеми элементами неоднородности материала и делает его монолитным. Разрушение матрицы приводит к потере композитом сплошности и, как следствие, выходу из строя изделий из рассматриваемых материалов. Поэтому, согласно [11], считается, что приложенная к композиту нагрузка (например, сжатие в определенном направлении) становится разрушающей, когда внутреннее напряжение в матрице начинает превышать предел ее прочности. При этом величина внутреннего напряжения, возникающего в матрице при внешнем воздействии на композит, сравнивается с известным значением предела прочности матрицы. Значение предела прочности матрицы должно соответствовать внешней нагрузке (например, сжатию, совершаемому в том же направлении, что и для рассматриваемого композита), приложенной к однородному телу, состоящему только из материала матрицы.

В настоящей работе вычисление всех тензорных величин, используемых для решения поставленной задачи, основывается на обобщенном сингулярном приближении теории случайных

полей (ОСП) [12]. В ОСП выражение для оператора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ имеет следующий вид [9–11]:

$$\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \langle \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}. \quad (1.2)$$

В формуле (1.2) и далее по тексту: $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ — тензор модулей упругости элемента неоднородности; $\mathbf{c}''(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) - \mathbf{c}^c$, где \mathbf{c}^c — тензор модулей упругости однородного тела сравнения (специально вводимый вспомогательный тензор); \mathbf{I} — единичный тензор четвертого ранга; $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ — сингулярная составляющая второй производной тензора Грина уравнений равновесия [12].

Рассматриваемые в работе трибоматериалы представляют собой композиции на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 (отвердитель ПЭПА) с наполнителем в виде шарообразных микрокапсул (полиэфирные оболочки, заполненные растительным маслом и наночастицами магнетита). Учет влияния на предельные прочностные характеристики (при одноосном сжатии) полимерных композиций геометрических размеров микрокапсул приводит к значительному усложнению расчетов. В разработанной модели они выполняются в два этапа.

На первом этапе вычисляются эффективные модули упругости материала, состоящего из заполненных растительным маслом сферических полостей в полиэфирной матрице. При этом не учитывается влияние на указанные модули наночастиц магнетита ввиду их незначительной объемной доли в рассматриваемой неоднородной среде.

Эффективные упругие характеристики определяются с помощью тензора четвертого ранга \mathbf{c}^* , связывающего средние значения напряжений $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle$ и деформаций $\langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ в неоднородном материале [12]:

$$\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle = c_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3.$$

Выражение для \mathbf{c}^* в ОСП имеет следующий вид [12]:

$$\mathbf{c}^* = \langle \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle \langle (\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}. \quad (1.3)$$

Проведение расчетов на первом этапе позволяет определить эффективные модули упругости неоднородного материала, из которого затем «вырезаются» шарообразные включения, имитирующие заполненные растительным маслом микрокапсулы с полиэфирной оболочкой. Эти «вырезанные» шарообразные включения затем «погружаются» в эпоксидную матрицу ЭД-20 + ПЭПА. Выполнение первого этапа дает возможность учитывать характерный геометрический размер микрокапсул (безразмерный структурный параметр) — отношение толщины оболочки к радиусу жидкого тела (ядра).

На втором этапе вначале осуществляется расчет по формуле (1.2) оператора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ для матричного композита, включениями которого служат сферические микрокапсулы с эффективными модулями упругости, вычисленными на первом этапе. А затем, согласно [11], используя рассчитанные значения компонент тензора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$, осуществляется численное моделирование значений предельных прочностных показателей указанного матричного композита.

Опишем более подробно основные пункты первого этапа моделирования. Вначале для микрокапсул вводится безразмерный структурный параметр (характерный геометрический размер). Для этого рассматривается статистически однородный двухкомпонентный матричный композит с полиэфирной матрицей, являющейся материалом стенок микрокапсул средней толщины h . Полагается, что в этой полиэфирной матрице случайным образом расположены «включения», представляющие собой заполненные растительным маслом сферические пустоты среднего радиуса R . Далее определяется среднее расстояние $2h$ между двумя соседними заполненными маслом сферическими полостями (рис. 1а). Затем рассматривается так называемая тетраэдрическая укладка микрокапсул среднего радиуса $R + h$ (рис. 1б). Указанная структура соответствует двухкомпонентному матричному композиту с полиэфирной матрицей и шарообразными «включениями» жидкой смазки, рассмотрение которой позволяет ввести безразмерный структурный параметр h/R и установить его связь с объемным содержанием жидкого тела (ядра) v_T микрокапсулы (или объемным содержанием оболочки $v_{об}$), решив

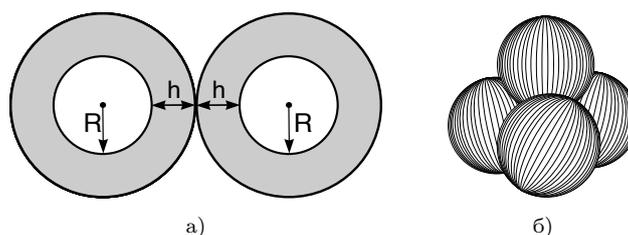


Рис. 1. Модель первого этапа прогнозирования предельных прочностных характеристик полимерных композиций, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита: а) введение безразмерного структурного параметра h/R ; б) тетраэдрическая укладка микрокапсул

Fig. 1. Model of the first stage of prediction of ultimate strength characteristics of polymer compositions modified with microcapsules with lubricant and magnetite nanoparticles: a) introduction of dimensionless structural parameter h/R ; б) tetrahedral stacking of microcapsules

следующую систему уравнений:

$$v_T + v_{об} = 1, \quad \frac{v_{об}}{v_T} = \frac{(4\pi(R+h)^3/3) - (4\pi R^3/3)}{4\pi R^3/3} = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^3 - 1.$$

Отсюда объемное содержание жидкого тела v_T выражается через характерный размер h/R с помощью формулы

$$v_T = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3}.$$

И наоборот, характерный размер h/R выражается через объемное содержание жидкого тела v_T с помощью соотношения

$$\frac{h}{R} = \frac{1}{\sqrt[3]{v_T}} - 1. \quad (1.4)$$

Отметим, что авторами настоящей статьи экспериментально было установлено, что диаметр микрокапсул может варьироваться в пределах от 2 до 30 мкм, при этом безразмерный параметр h/R может изменяться в пределах от 0,04 до 0,64.

2. Проведение численных расчетов

При проведении расчетов полагалось, что полимерная композиция представляет собой антифрикционное покрытие, наносимое на плоскую горизонтальную поверхность некоторого изделия, используемого в узле трения. Толщина покрытия не превышает 500 мкм. Полагалось также, что объемные содержания микрокапсул уменьшаются послойно при удалении от поверхности трения (толщину каждого слоя принимали приблизительно равной 80 мкм). Было выделено шесть слоев с уменьшающимся по мере удаления от поверхности трения процентным объемным содержанием микрокапсул. При расчетах эти процентные значения от первого до шестого слоя полагались равными соответственно 5%, 3%, 1%, 0,5%, 0,1% и 0,001%.

Все численные расчеты с тензорами на обоих этапах моделирования выполнялись в матричной форме [12]. Для нахождения значений ненулевых элементов матриц тензора модулей упругости для каждого из изотропных компонентов полимерных композиций использовались следующие данные об их упругих характеристиках [13, 14]:

- растительное масло: объемный модуль — 1,84 ГПа, сдвиговый модуль — 0 ГПа;
- полиэфирная оболочка: модуль Юнга — 2,85 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,38;
- эпоксидное связующее ЭД-20 + ПЭПА: модуль Юнга — 3,8 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,39.

Отметим, что на первом этапе моделирования при вычислениях по формуле (1.3) значений компонент тензора c^* применялся дифференциальный метод самосогласования [15]. Идея этого

метода состоит в пошаговом добавлении малыми порциями шарообразных включений растительного масла в эквивалентную (эффективную) среду, образованную полиэфирной матрицей и всеми шарообразными включениями растительного масла, внедренными на предыдущих шагах. Для вычисления эффективных упругих характеристик каждой из вновь образованных на очередном шаге неоднородных сред (с добавленной порцией растительного масла) применялся метод самосогласования с выбором в качестве начальных значений параметров тела сравнения \mathbf{c}^c модулей упругости, вычисленных в приближении Фойгта [12]. Выбор нулевого приближения Фойгта был обусловлен тем, что в этом случае не требуется обращение вырожденной матрицы тензора модулей упругости для такого компонента материала как наполненные маслом шарообразные включения. Выход из итерационной процедуры происходил, когда максимальная разница между соответствующими элементами матрицы тензора \mathbf{c}^c составляла менее 0,01 ГПа.

В настоящей работе включения растительного масла добавлялись 5%-ми (по объему) порциями в полученную на предыдущем шаге эквивалентную неоднородную среду. Затем на каждом шаге, зная для указанной среды объемную долю v_T , по формуле (1.4) определялась величина структурного параметра h/R микрокапсул и эффективные модули упругости неоднородного материала.

На втором этапе метода моделирования по соотношению (1.2) проводились численные модельные расчеты тензора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ в композиции на основе эпоксидной матрицы ЭД-20 + ПЭПА со сферическими микрокапсулами (эффективные модули упругости микрокапсул при $0,04 \leq h/R \leq 0,64$ были вычислены на первом этапе). Для получения параметров тела сравнения, как и на первом этапе, применялся метод самосогласования [9, 12, 16]. С этой целью при каждом значении параметра h/R и объемных содержаниях микрокапсул организовывалась итерационная процедура, в которой для параметров \mathbf{c}^c тела сравнения выбирались значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брались упругие характеристики в приближении Хилла [12]. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями \mathbf{c}^c составляла менее 0,01 ГПа.

В конце второго этапа (после вычисления тензора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ в эпоксидном связующем ЭД-20 + ПЭПА) выполнялись расчеты предела прочности полимерной композиции с помощью разработанного в [11] метода. При этом использовали данные о разрушающем напряжении при сжатии $\sigma_p = 113$ МПа для связующего ЭД-20 + ПЭПА [17]. Внешнее сжимающее воздействие $\langle \sigma \rangle$ (МПа), направленное перпендикулярно поверхности антифрикционного покрытия (т.е. параллельно оси z прямоугольной системы координат), задавалось в виде (3×3) -матрицы с единственным положительным ненулевым элементом B , расположенным в третьей строке и третьем столбце $\langle \sigma \rangle$.

Вычислительная процедура была организована следующим образом. Вначале для полимерной композиции (при фиксированных значениях параметра h/R и объемного содержания микрокапсул) по формуле (1.2) вычислялся оператор $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ в связующем ЭД-20 + ПЭПА. Затем, опираясь на определение (1.1) $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$, вычислялись элементы σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) матрицы тензора напряжений для связующего ЭД-20 + ПЭПА. После этого вычисленное значение σ_{33} сравнивалось с σ_p (для ЭД-20 + ПЭПА). Если выполнялось условие $\sigma_{33} < \sigma_p$, то значение B увеличивалось на 0,001 МПа и вычисления элементов σ_{ij} матрицы тензора напряжений для связующего ЭД-20 + ПЭПА повторялись заново. Вычислительная процедура останавливалась сразу, как только выполнялось условие $\sigma_{33} \geq \sigma_p$, а последнее значение B принималось в качестве предела прочности $\sigma_{сж}$ для всей полимерной композиции при одноосном сжатии. Затем фиксировались новые значения параметра h/R и/или объемного содержания микрокапсул, и вычисления $\sigma_{сж}$ повторялись заново.

Результаты расчетов значений предельных прочностных показателей для модельных полимерных композиций приведены на рис. 2, 3. Кривые, представленные на рис. 2, описывают зависимости пределов прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ (МПа) от изменения значений структурного параметра h/R и фиксированных процентных объемных содержаниях мик-

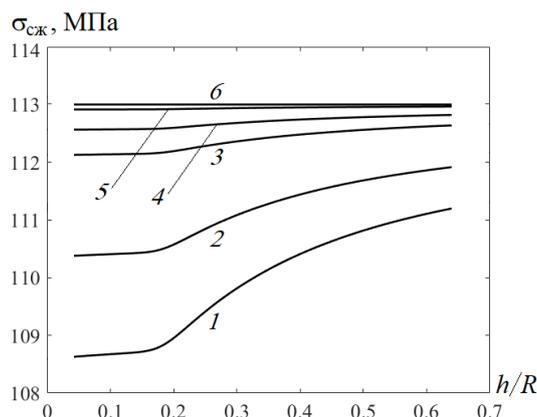


Рис. 2. Зависимости $\sigma_{сж}$ полимерных композиций от изменения h/R при фиксированных значениях процентного объемного содержания микрокапсул: 1 – $V_{капс} = 5\%$; 2 – $V_{капс} = 3\%$; 3 – $V_{капс} = 1\%$; 4 – $V_{капс} = 0,5\%$; 5 – $V_{капс} = 0,1\%$; 6 – $V_{капс} = 0,001\%$

Fig. 2. Dependences of $\sigma_{сж}$ of polymer compositions on changes in h/R at fixed values of the percentage volume content of microcapsules: 1 – $V_{капс} = 5\%$; 2 – $V_{капс} = 3\%$; 3 – $V_{капс} = 1\%$; 4 – $V_{капс} = 0.5\%$; 5 – $V_{капс} = 0.1\%$; 6 – $V_{капс} = 0.001\%$

рокапсул $V_{капс}$ в выделенных шести слоях антифрикционного покрытия (при удалении от поверхности трения).

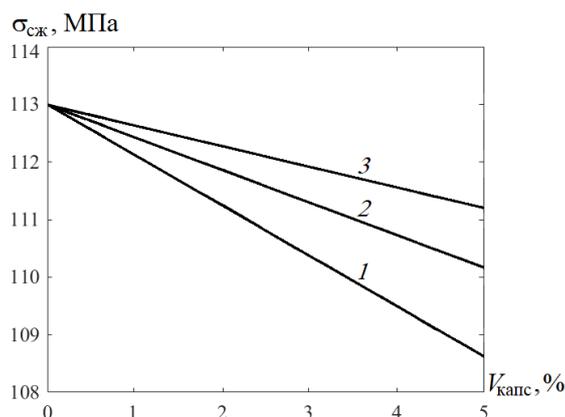


Рис. 3. Зависимости $\sigma_{сж}$ полимерных композиций от изменения $V_{капс}$ при различных значениях структурного параметра: 1 – $h/R = 0,04$; 2 – $h/R = 0,35$; 3 – $h/R = 0,64$

Fig. 3. Dependences of $\sigma_{сж}$ of polymer compositions on the change in $V_{капс}$ for different values of the structural parameter: 1 – $h/R = 0.04$; 2 – $h/R = 0.35$; 3 – $h/R = 0.64$

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования значений разрушающего напряжения при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ (МПа) для рассматриваемых антифрикционных покрытий от изменения процентного объемного содержания микрокапсул $V_{капс}$ при различных значениях структурного параметра h/R .

Заключение

В настоящей работе получены следующие результаты.

1. Построена модель прогнозирования предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) полимерных композиций, модифицированных шарообразными микрокапсулами

со смазочным материалом и наночастицами магнетита. Модель опирается на ОСП в варианте метода самосогласования и позволяет учитывать состав, объемные доли компонентов трибо-материалов и характерный размер микрокапсул (отношение толщины оболочки к радиусу жидкого ядра).

2. Для композиций на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (отвердитель ПЭПА) с микрокапсулами (полиэфирные оболочки, заполненные растительным маслом и наночастицами магнетита) проведены численные модельные расчеты значений пределов прочности при сжатии. Моделирование учитывало изменение характерного размера и неравномерность распределения шарообразных микрокапсул по толщине трибоматериалов, возникающую в результате воздействия на рассматриваемые полимерные композиции постоянного магнитного поля.

3. Модельные расчеты показали, что при уменьшении процентного содержания микрокапсул значения $\sigma_{сж}$ увеличиваются, приближаясь (при $V_{капс} \rightarrow 0$) к значению прочности на сжатие $\sigma_p = 113$ МПа для связующего ЭД-20 + ПЭПА [17]. Это согласуется с априорными представлениями об изменении предельных прочностных показателей связующего ЭД-20 + ПЭПА при добавлении в него микрокапсул рассматриваемого в данной работе состава компонентов.

4. Численный анализ значений $\sigma_{сж}$ показал, что в рассматриваемых антифрикционных покрытиях увеличение процентного объемного содержания микрокапсул от 0 до 5% (т.е. при приближении к поверхности трения) не приводит к значимым изменениям (в сторону уменьшения) значений предельных прочностных показателей полимерных композиций. Аналогичный вывод (только в сторону увеличения) относится к значениям $\sigma_{сж}$ при изменении структурного параметра h/R в диапазоне от 0,04 до 0,64. Поэтому управление распределением микрокапсул по толщине антифрикционных покрытий с помощью магнитного поля не приводит к значительному ухудшению их прочностных характеристик, что дает возможность улучшения износных характеристик узлов трения, использующих подобные капсулированные полимерные композиции.

Литература [References]

1. Солодовник, В.Д., *Микрокапсулирование*. Химия, Москва, 1980. [Solodovnik, V.D., *Mikrokapsulirovaniye = Microencapsulation*. Khimiya, Moscow, 1980. (in Russian)]
2. Лопанов, А.Н., Тихомирова, К.В., *Физико-химические аспекты инженерии капсулирования*. Изд-во Белгородского государственного технического университета, Белгород, 2015. [Loponov, A.N., Tikhomirova, K.V., *Fiziko-khimicheskiye aspekty inzhenerii kapsulirovaniya = Physical and chemical aspects of encapsulation engineering*. Belgorod State Technical University Publ., Belgorod, 2015. (in Russian)]
3. Наумов, А.Г., Новиков, В.В., Раднюк, В.С., Наумова, О.А., О возможности использования микрокапсулированных СОТС при лезвийном резании материалов. *Известия ВолгГТУ*, 2017, № 9, с. 47–50. [Naumov, A.G., Novikov, V.V., Radnyuk, V.S., Naumova, O.A., On the possibility of using microencapsulated lubricating and cooling technological means in blade cutting of materials. *Izvestiya VolgGTU = Izvestiya VSTU*, 2017, no. 9, pp. 47–50. (in Russian)]
4. Wang, Y, Pham, D.T., Ji, Ch., Self-healing composites: A review. *Cogent Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, art. 1075686. DOI: [10.1080/23311916.2015.1075686](https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1075686)
5. Kolesnikov, I.V., Bardushkin, V.V., Myasnikov, Ph.V., Calculation of stress-deformed condition in polymer nanocomposites filled with microcapsules with lubricant. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, vol. 47, no. 4, pp. 37–47. DOI: [10.1515/jtam-2017-0019](https://doi.org/10.1515/jtam-2017-0019)
6. Колесников, В.И., Бардушкин, В.В., Колесников, И.В., Мясников, Ф.В., Сычев, А.П., Яковлев, В.Б., Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств трибокомпозигов с микрокапсулами, заполненными жидкой смазкой. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, т. 18, № 9, с. 398–403. [Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Kolesnikov, I.V., Myasnikov, F.V., Sychev, A.P., Yakovlev, V.B., Forecasting the operational elastic properties of tribocomposites with microcapsules filled with liquid lubricant. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii = Assembling in mechanical engineering, instrument-making*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 398–403. (in Russian)]
7. Бурмистров, И.А., Трушина, Д.Б., Бородина, Т.Н., Веселов, М.М., Клячко, Н.Л., Зайцев, В.Б., González-Alfaro, Y., Букреева, Т.В., Влияние низкочастотного магнитного поля на полиэлек-

- тролитные микрокапсулы с наночастицами магнетита. *Журнал технической физики*, 2020, т. 90, № 9, с. 1428–1434. DOI: [10.21883/JTF.2020.09.49672.405-19](https://doi.org/10.21883/JTF.2020.09.49672.405-19) [Burmistrov, I.A., Trushina, D.B., Borodina, T.N., Bukreeva, T.V., Veselov, M.M., Klyachko, N.L., Zaitsev, V.B., González-Alfaro, Y., The influence of a low-frequency magnetic field on polyelectrolyte capsules with magnetite nanoparticles. *Technical Physics*, 2020, vol. 65, no. 9, pp. 1370–1376. DOI: [10.1134/S1063784220090108](https://doi.org/10.1134/S1063784220090108)]
8. Ященко, А.М., Иноземцева, О.А., Горин, Д.А., The nanocomposite microcapsules containing gold and magnetite nanoparticles in the shell: preparation and characterization. *Российские нанотехнологии*, 2009, т. 4, № 5–6, с. 85–88. [Yaschenok, A.M., Inozemtseva, O.A., Gorin D.A., Nanocomposite microcapsules containing nanoparticles of colloidal gold and magnetite: Their preparation and characterization. *Nanotechnologies in Russia*, 2009, vol. 4, no. 5–6, pp. 349–353. DOI: [10.1134/S1995078009050127](https://doi.org/10.1134/S1995078009050127)]
 9. Сычев, А.П., Лавров, И.В., Бардушкин, В.В., *Физические и механические свойства неоднородных сред с вложенной микроструктурой (теория и моделирование)*. Изд-во ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, 2022. [Sychev, A.P., Lavrov, I.V., Bardushkin, V.V., *Fizicheskie i mekhanicheskie svoystva neodnorodnykh sred s vlozhennoy mikrostrukturou (teoriya i modelirovanie) = Physical and mechanical properties of inhomogeneous media with embedded microstructure (theory and modeling)*. SSC RAS Publ., Rostov-on-Don, 2022. (in Russian)]
 10. Колесников, В.И., Бардушкин, В.В., Кочетыгов, А.А., Сычев, А.П., Прогнозирование предельных значений прочностных показателей трибокомполитов с наполненными жидкой смазкой сферическими микрокапсулами. *Наука Юга России*, 2018, т. 14, № 3, с. 3–11. [Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Kochetygov, A.A., Sychev, A.P., Predicting the ultimate strength indices of tribocomposites with spherical microcapsules filled with liquid lubricant. *Nauka Yuga Rossii = Science in the South of Russia*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)] DOI: [10.7868/S25000640180301](https://doi.org/10.7868/S25000640180301)
 11. Колесников, В.И., Бардушкин, В.В., Яковлев, В.Б., Сычев, А.П., Кириллов, Д.А., Сорокин, А.И., О методе прогнозирования предельных прочностных характеристик матричных композитов, основанном на использовании оператора концентрации напряжений. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2014, № 1, с. 45–51. [Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Yakovlev, V.B., Sychev, A.P., Kirillov, D.A., Sorokin, A.I., About a method of predicting of ultimate strength characteristics of the matrix composites, based on use of the operator of stresses concentration. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2014, no. 1, pp. 45–51. (in Russian)] EDN: [SBEEUR](https://www.edn.ru/SBEEUR)
 12. Шермергор, Т.Д., *Теория упругости микroneоднородных сред*. Наука, Москва, 1977. [Shermergor, T.D., *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred = Micromechanics of inhomogeneous medium*. Nauka, Moscow, 1977. (in Russian)]
 13. Григорьева, И.С., Мейлихова, Е.З. (под ред.), *Физические величины: Справочник*. Энергоатомиздат, Москва, 1991. [Grigor'ev, I.S., Meilikhov, E.Z. (eds.), *Fizicheskie velichiny = Physical Quantities: Handbook*. Energoatomizdat, Moscow, 1991. (in Russian)]
 14. Лапицкий, В.А., Крицук, А.А., *Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков*. Наукова думка, Киев, 1986. [Lapitsky, V.A., Kricuk, A.A., *Fiziko-mekhanicheskiye svoystva epoksidnykh polimerov i stekloplastikov = Physical and mechanical properties of the epoxy polymers and fiberglasses*. Naukova Dumka, Kiev, 1986. (in Russian)]
 15. Салганик, Р.Л., Механика тел с большим числом трещин. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*, 1973, № 4, с. 149–158. [Salganik, R.L., Mechanics of solids with a large number of cracks. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of Solids*, 1973, no. 4, pp. 149–158. (in Russian)]
 16. Паньков, А.А., *Методы самосогласования механики композитов*. Изд-во ПГТУ, Пермь, 2008. [Pan'kov, A.A., *Metody samosoglasovaniya mekhaniki kompozitov = Methods of self-consistency mechanics of composites*. Perm State Technical University Publ., Perm, 2008. (in Russian)]
 17. Эпоксидно-диановые смолы ЭД-8, ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22, YD-128, Э-40, Э-41, YD-011H (дата обращения 29.06.2023). [Epoxy resins ED-8, ED-16, ED-20, ED-22, YD-128, E-40, E-41, YD-011H (accessed 29.06.2023)]. URL: https://www.chimexltd.com/content/data/store/images/f_815_49102_1.pdf