

Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2024, Том 7, № 3 / 2024, Vol. 7, Iss. 3 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 678.6-1

DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-120-136

Повышение стойкости к ударным нагрузкам полимерного композиционного материала на основе эпоксидного препрега за счет добавления нетканого материала на основе полиамида 12

¹ Кондратьева А.А. *,

¹ Морозов О.С.,

¹ Эрдни-Горяев Э.М.,

¹ Афанасьева Е.С.,

² Бабкин А.В.,

² Кепман А.В.,

¹ Авдеев В.В.,

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

² ООО «ИТЕКМА», г. Подольск,

* Ответственный автор E-mail: aleksanova.aa@mail.ru

Аннотация: исследовано влияние введения нетканого материала из полиамида ПА 12-Э на механические свойства полимерных композиционных материалов на основе эпоксидного автоклавного препрега Т107. Наличие нетканого материала незначительно снижает температуру стеклования до 171 °С, что не влияет возможность применения материала до максимальной эксплуатационной температуры в 120 °С. Исследование срезов композитов электронной микроскопией выявило равномерное распределение термопластичной фазы между слоями углеродной ткани, а также высокую адгезию полиамида к эпоксидной матрице. Показано, что введение нетканого материала не приводит к снижению механических свойств композитов. Основным преимуществом композитов на основе нетканого материала является повышенное сопротивление к ударным нагрузкам. При свободном ударе с энергией 6,67 Дж на 1 мм образца у образца без нетканого материала наблюдается сквозной пробой с разрушением волокон, в то время как у образца с нетканым материалом разрушение носит характер расслоения без повреждения волокон. Предел прочности при сжатии после удара вырос с 257 до 326 МПа при введении нетканого материала. В итоге, предложенная модификация коммерческого препрега позволит расширить область применения материала и повысить безопасность, в первую очередь, в конструкциях летательных аппаратов.

Ключевые слова: нетканые материалы, полиамиды, препреги, сжатие после удара, термопластичные вуали, эпоксидные смолы

Для цитирования: Кондратьева А.А., Морозов О.С., Эрдни-Горяев Э.М., Афанасьева Е.С., Бабкин А.В., Кепман А.В., Авдеев В.В. Повышение стойкости к ударным нагрузкам полимерного композиционного материала на основе эпоксидного препрега за счет добавления нетканого материала на основе полиамида 12 // Chemical Bulletin. 2024. Том 7. № 3. С. 120 – 136. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-120-136

Поступила в редакцию: 12 мая 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 19 июня 2024 г.; Принята к публикации: 23 сентября 2024 г.

Improving the impact resistance of a polymer composite material based on epoxy prepreg through the addition of nonwoven material based on polyamide 12

¹ Kondratyeva A.A. *,

¹ Morozov O.S.,

¹ Erdni-Goryaev E.M.,

¹ Afanasyeva E.S.,

² Babkin A.V.,

² Kepman A.V.,

¹ Avdeev V.V.,

¹ Lomonosov Moscow State University,

² LLC "ITEKMA", Podolsk,

* Corresponding author: aleksanova.aa@mail.ru

Abstract: the effect of introducing nonwoven material based on polyamide PA 12-E on the mechanical properties of polymer composite materials based on the epoxy autoclave prepreg T107 was investigated. The presence of the nonwoven material slightly lowers the glass transition temperature to 171 °C, which does not affect the feasibility of using the material up to the maximum operating temperature of 120 °C. Electron microscopy studies of the composite's cross-sections revealed uniform distribution of the thermoplastic phase between the layers of carbon fabric as well as high adhesion of polyamide to the epoxy matrix. It was demonstrated that introducing nonwoven material does not lead to a reduction in the mechanical properties of the composites. The main advantage of composites based on nonwoven material is their enhanced resistance to impact loads. Under a free impact with energy of 6.67 J per 1 mm of the specimen, a through penetration with fiber destruction was observed in the sample without the nonwoven material, while for the sample with nonwoven material, the damage was characterized by delamination without fiber damage. The compressive strength after impact increased from 257 to 326 MPa with the introduction of nonwoven material. As a result, the proposed modification of commercial prepreg could expand the range of applications for the material and improve safety, particularly in aircraft structures.

Keywords: nonwoven materials, polyamides, prepregs, compression after impact, thermoplastic veils, epoxy resins

For citation: Kondratyeva A.A., Morozov O.S., Erdni-Goryaev E.M., Afanasyeva E.S., Babkin A.V., Kepman A.V., Avdeev V.V. Improving the impact resistance of a polymer composite material based on epoxy prepreg through the addition of nonwoven material based on polyamide 12. Chemical Bulletin. 2024. 7 (3). P. 120 – 136. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-120-136

The article was submitted: May 12, 2024; Approved after reviewing: June 19, 2024; Accepted for publication: September 23, 2024.

Введение

Тенденции авиакосмического строения направлены на увеличение доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях летательных аппаратов [1]. Это напрямую связано с тем, что они обладают высокими удельными механическими свойствами. Однако, одной из основных проблем замены металлов на ПКМ является низкое сопротивление удару, что ограничивает их применение [2-4].

Современные конструкционные полимерные композиционные материалы содержат в своем составе не только армирующий материал и матрицу, но и специальные добавки, способные задать необходимые свойства конечному материалу [5-9]. Для улучшения ударных характеристик используются различные подходы [10], такие как введение углеродных нанотрубок [5, 11], рубленого и молотого углеродного волокна [12, 13], полимерных пленок [14], рубленых полимерных волокон [15], нетканых добавок на основе термопластичных полимеров [16, 17] и др.

Первой группой гетерогенных модификаторов для эпоксидных реактопластов являются каучуки [18, 19]. Наиболее распространенный вариант модификатора данного класса – бутадиенакрилонитрильный каучук с концевыми амино- или карбоксильными группами. Использование эластомерных модификаторов сопряжено с рядом про-

блем. Параллельно с повышением ударо- и трещиностойкости снижаются другие эксплуатационные характеристики: модуль упругости, прочность при растяжении, химстойкость и т.д. Модификация эластомерами также, как правило, снижает характеристики при испытаниях при сжатии после влагонасыщения. Перспективный способ повышения эффективности эластомерного модификатора – частичная вулканизация каучука. В работе [20] показано, что при этом достигается существенное повышение стойкости к ударным нагрузкам по сравнению с традиционной модификацией каучуками (без вулканизации); при этом такие свойства, как модуль упругости и прочность при растяжении, остаются на уровне немодифицированного эпоксидного реактопласта. Повышение стойкости к ударным нагрузкам в данном случае связывают с формированием взаимопроникающих сеток на границе раздела матрица – модификатор, что способствует возрастанию межфазной адгезии.

Улучшение ударных характеристик без значительного снижения термических и механических свойств в эпоксидных композиционных материалах удастся достичь, преимущественно, за счет добавления инженерных термопластов в конечную структуру ПКМ [21, 22]. Для введения контролируемой взаимопроникающей сетки термопласта используют нетканый материал на основе термопластичных полимеров. Кроме того, термопла-

стичные нетканые материалы имеют значительную удельную площадь поверхности, которая способствует повышению адгезии с фазой полимерной матрицы. Свойства конечного ПКМ напрямую зависят от поверхностной плотности и химической природы нетканого материала, а также от армирующего наполнителя и способа изготовления ПКМ [23, 24]. Многие другие факторы, такие как адгезия между нетканым материалом и матрицей, растворимость термопласта во время отверждения при повышенной температуре в эпоксидной смоле с последующим фазовым разделением при отверждении, а также режим формования ПКМ значительно влияют на поведение изделия из ПКМ при ударных нагрузках [25].

Обычно оценку влияния введения термопластов в структуру эпоксидной матрицы на хрупкие свойства композита определяют по результатам испытаний на трещиностойкость [26, 27]. Такие испытания позволяют оценить устойчивость композита к хрупкому разрушению при сдвиге, отрыве или комбинированной нагрузке [15, 28, 29]. Однако с практической точки зрения более интересны свойства после удара, поскольку такое испытание лучше имитирует повреждения при реальных авиационных инцидентах, например, вследствие падения инструмента на крыло, столкновения с птицами или другими транспортными средствами.

Ранее было описано влияние ударной нагрузки на прочность при сжатии ПКМ, изготовленного на основе эпоксидного автоклавного препрега T107 [30]. Предел прочности при сжатии после удара с энергией 6,7 Дж на 1 мм образца композита на основе однонаправленного безуткового препрега с армирующим наполнителем Formosa 12K в термоактивной матрице на эпоксидной основе T107 составил 169 МПа.

Данная работа нацелена на улучшение ударных характеристик ПКМ на основе эпоксидного препрега T107 путем внедрения в матрицу нетканого материала на основе полиамида-12.

Материалы и методы исследований

Полимерные композиционные материалы были изготовлены методом автоклавного формования. Были изготовлены образцы из эпоксидного препрега T107 компании ООО «ИТЕКМА» (Россия) на основе углеродной ткани 22502 (саржа 2x2, 200 г/м², UMT42S-3K) и образцы эпоксидного препрега T107 с добавлением между каждым слоем полиамидного нетканого материала производства МГУ им. М.В. Ломоносова, полученного непрерывным экструзионным формованием из расплава полиамида-12 [31]. Нетканые термопластичные материалы были получены с поверхностной плотностью 5-8 г/м², с диаметром волокон 10-35 мкм. В качестве исходного сырья для производства нетканого термопластичного материала использовали полиамид ПА 12-Э производства НП ООО «АНИД» (Россия).

Методика изготовления образцов ПКМ методом автоклавного формования из эпоксидного препрега T107 и препрега T107 с добавлением нетканого материала.

Для проведения испытаний изготовили по три пластины каждого состава с выкладкой [0]₁₀ размером 300×300 мм и толщиной 2 мм и по одной пластине каждого состава с выкладкой [+45/-45/0/90]_{3s} размером 350×350 мм и толщиной 5 мм.

При изготовлении образцов ПКМ с нетканым материалом слои полиамида укладывались до и после слоя препрега.

Единый технологический режим автоклавного формования пластин ПКМ в автоклаве эпоксидно-

го препрега T107 и препрега T107 с добавлением нетканного материала:

- Нагрев КТ \rightarrow 55 °C со скоростью 1 °C/мин
- Выдержка при 55 °C в течение 15 мин
- Нагрев 55 \rightarrow 125 °C со скоростью 1 °C/мин
- Выдержка при 125 °C в течение 15 мин
- Нагрев 125 \rightarrow 180 °C со скоростью 1 °C/мин

- Выдержка при 180 °C в течение 180 мин
- Оборудование и методики для определения свойств образцов ПКМ.*

Ультразвуковой контроль (УЗК) осуществляли при 25 °C согласно стандартной методике на лазерно-ультразвуковом дефектоскопе УДЛ-2М с преобразователем ПЛУ-6П-02. Для контроля использовали продольно-поперечную схему сканирования (скорость сканирования \leq 50 мм·с⁻¹) с шагом \leq 4 мм и частотой 2.7–13.6 МГц.

Динамический механический анализ (ДМА) выполняли согласно стандартной методике на динамо-механическом анализаторе TA Instruments DMA Q800 путем сканирования образцов (55 × 5 × 2 мм) при температуре 50–250 °C, с частотой 1 Гц, в атмосфере N₂ (скорость потока 100 мл/мин), скорость нагрева 5 °C/мин. Образцы вырезали под углом 0° относительно оси армирования.

Дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) проводили на приборе NETZSCH DSC 204 Phoenix. Для проведения измерения навеску образца (10-20 мг) в алюминиевом тигле помещали в прибор. Точность взвешивания – 10-5 г. Измерение проводили относительно пустого тигля в атмосфере аргона, объемная скорость потока газа – 100 мл/мин. Измерение проводили в интервале температур от 50 до 350 °C. Скорость нагрева составляла 10 °C/мин. Температуру плавления опре-

деляли как точку перегиба при изменении теплового потока на начальном участке кривой ДСК.

Кажущийся предел прочности при межслойном сдвиге определяли на приборе Tinius Olsen 50ST при 25 °C (6 образцов 20 × 10 мм). Метод заключается в нагружении свободно лежащего на двух опорах образца с постоянной скоростью 1,0 мм/мин в середине между опорами до его разрушения при межслойном сдвиге. Измеряемый параметр – величина прилагаемой нагрузки.

Предел прочности при растяжении ПКМ определяли с помощью прибора Instron 5985 при 25 °C. Образец (6 образцов 180 × 25 мм) устанавливают в захваты прибора и нагружают с постоянной скоростью 5 мм/мин, фиксируя максимальное значение нагрузки до разрушения образца и характер разрушения.

Предел прочности при сжатии ПКМ и предел прочности при сжатии ПКМ после удара определяли с помощью прибора Instron 5985 при 25 °C. Метод заключается в кратковременном испытании образцов из ПКМ на сжатие с постоянной скоростью деформации 1 мм/мин. Образец устанавливали в оснастку, которую помещали между плитами разрывной машины. Предел прочности при сжатии определяли как отношение максимальной нагрузки перед разрушением к начальной площади поперечного сечения образца.

Сдвиговые характеристики образцов определяли по методу Иосипеску. Образцы с V-образным надрезом изготавливались методом прецизионной резки на фрезерном станке с ЧПУ. Испытания проводили на разрывной универсальной испытательной машине Tinius Olsen серии ST, модификации 300ST при скорости перемещения нагружающей плиты 2 мм/мин при комнатной температуре. Деформацию сдвига определяли по двум взаимно

перпендикулярным тензодатчикам, наклеенным в рабочей зоне. Исследования с помощью РЭМ выполнялись на микроскопе Vega 3 (Tescan) с использованием детектора вторичных и обратно отраженных электронов при рабочем напряжении 20 кВ. Образцы ПКМ фиксировались в цилиндрической форме и заливались эпоксидной смолой, и затем шлифовались и полировались. Перед съемкой отполированную поверхность покрывались тонким слоем золота (10-20 нм).

Испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом проводили в соответствии с ГОСТ 33496-2015 на вертикальном копере Удар-Тестер ООО «Градиент-Техно». Масса бойка составила 5 кг, диаметр шарика бойка 16 мм. Оценку воздействия проводили по глубине пробития и виду разрушения ПКМ.

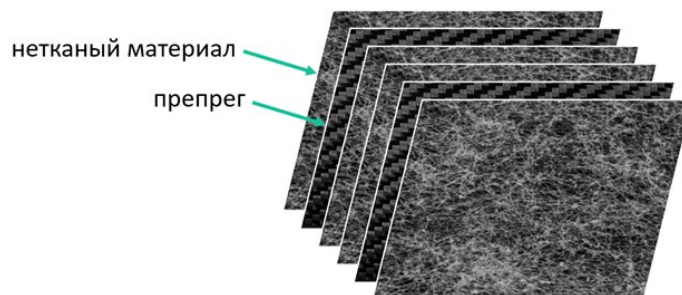


Рис. 1. Схема выкладки слоев препрега с чередованием нетканого материала на примере двух слоев для изготовления ПКМ при выкладке $[0]_{10}$.

Fig. 1. Scheme of laying out prepreg layers with alternating nonwoven material using the example of two layers for the production of PCM when laying out $[0]_{10}$.

Для проведения механических испытаний и определения температуры стеклования были изготовлены образцы с выкладкой $[0]_{10}$ методом автоклавного формования. Как видно из ДМА-кривых, у образца ПКМ на основе препрега T107 температура стеклования составляет 178°C (рис. 2а), а у образца ПКМ, содержащего нетканый полиамидный материал, температура стеклования составля-

Результаты и обсуждения

Нетканый материал был изготовлен из гранул полиамида ПА 12-Э производства НП ООО «АНИД» (Россия) с поверхностной плотностью 5-8 г/м², с диаметром волокон 10-35 мкм методом экструзионного формования в диапазоне температур 290-310 °C [31].

Для оценки вклада нетканого материала на свойства ПКМ были изготовлены образцы из препрега T107 производства ООО «ИТЕКМА» (Россия) и образцы с добавлением полученного нетканого материала производства МГУ им. М.В. Ломоносова. Полученный нетканый материал прокладывали с двух сторон от каждого слоя препрега (рис. 1).

ет 171 °C (рис. 2б). Это связано с тем, что температура начала плавления полиамида ПА 12-Э, согласно кривой ДСК (рис. 3), составляет 168 °C. Поскольку температура эксплуатации препрега T107 не превышает 120 °C, то такое падение температуры стеклования не сказывается на эксплуатационных характеристиках конечного материала.

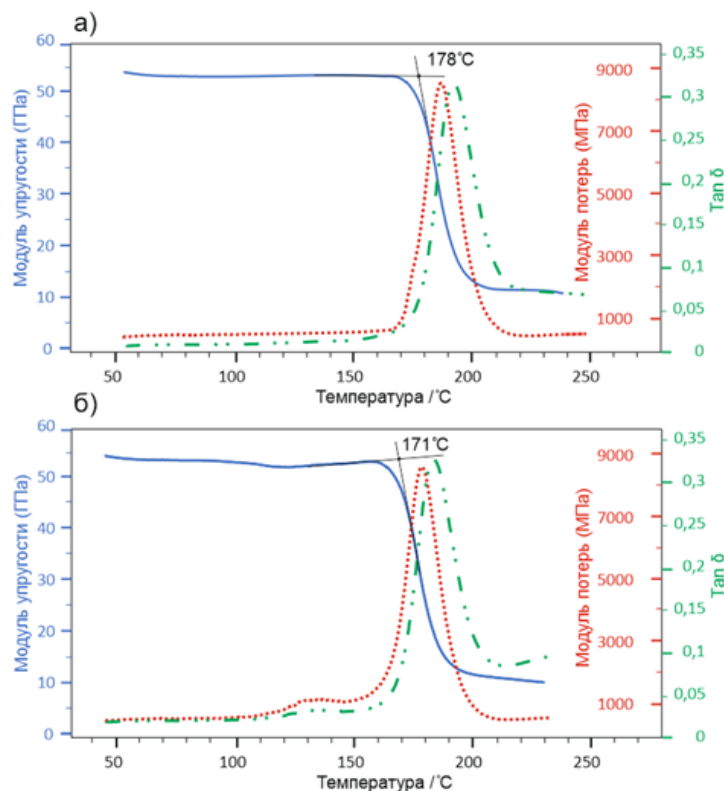


Рис. 2. ДМА-кривые образцов ПКМ на основе эпоксидного препрега T107 (а) и препрега T107 с добавлением полиамидного нетканого материала (б).

Fig. 2. DMA curves of PCM samples based on epoxy prepreg T107 (a) and prepreg T107 with the addition of polyamide nonwoven material (b).

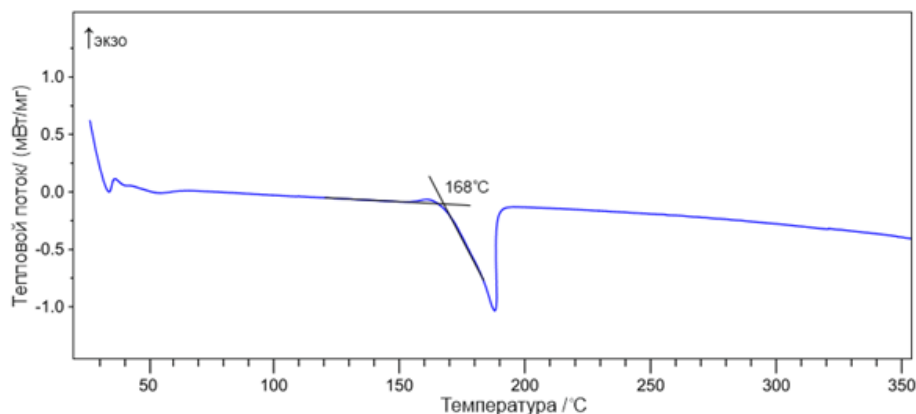


Рис. 3. Кривая ДСК образца полиамида ПА 12-Э.

Fig. 3. DSC curve of the polyamide sample PA 12-E.

Пористость, расслоения и трещины оказывают существенное влияние не только на механические свойства композитов, но и являются центрами роста дефектов при ударных нагрузках. Поэтому для адекватного сравнения свойств материалов необ-

ходимо убедиться в отсутствии дефектов в композитах до проведения испытаний. Качество полученных образцов было оценено неразрушающим методом УЗК (эхометод). Для каждого из образцов был получен устойчивый донный эхо-сигнал по

всей поверхности пластины, что свидетельствует о сплошности материалов и отсутствии дефектов.

Для определения влияния нетканного материала на механические свойства ПКМ был проведен ряд испытаний (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Каждое испытание проводили на серии из 7 образцов. Согласно полученным результатам, внедрение нетканого материала в структуру ПКМ

не только не ухудшило механических свойств, напротив, улучшило имеющиеся значения. Испытание на определение предела прочности при растяжении показало рост показателей на 5%. Кажущийся предел прочности при межслойном сдвиге и предел прочности при сжатии ПКМ сохранился в пределах погрешности полученных значений.

Таблица 1

Результаты механических свойств ПКМ при 25°C на основе эпоксидного препрега T107 и препрега T107 с добавлением полиамидного нетканого материала.

Table 1

Results of mechanical properties of PCM at 25 °C based on epoxy prepreg T107 and prepreg T107 with the addition of polyamide non-woven material.

Тип испытания	Нормативная документация	T107	T107 с нетканым материалом
Предел прочности ПКМ при растяжении в направлении оси армирования σ_{11}^+ , МПа	ГОСТ Р 56785-2015 /ASTM D3039	910 ± 31,5	955 ± 39,9
Модуль упругости ПКМ при растяжении в направлении оси армирования E_{11}^+ , ГПа	ГОСТ Р 56785-2015 /ASTM D3039	65 ± 1,1	69 ± 1,9
Предел прочности ПКМ при сжатии в направлении оси армирования σ_{11}^- , МПа	ГОСТ Р 56812-2015 /ASTM D 6641	807 ± 22,3	810 ± 15,8
Кажущийся предел прочности ПКМ при межслойном сдвиге τ_{13} , МПа	ГОСТ 32659-2014 /ASTM D2344	77 ± 1,7	78 ± 2,0
Предел прочности ПКМ при сдвиге в плоскости листа τ_{12} , МПа	ГОСТ Р 56799-2015 /ASTM D5379	140 ± 4,1	130 ± 3,8

Исключение составляет испытание на определение предела прочности при сдвиге ПКМ. Сохранение свойств составило 93% от исходного T107. Это может быть связано с тем, что при испытании

разрушение идет вдоль нетканого материала, который выступает в качестве дефекта в матрице.

Оценку распределения термопластичной фазы в ПКМ проводили с использованием метода растровой электронной микроскопией. На изображении

слева (рис. 4а) показана торцевая часть ПКМ на основе Т107 с нетканым материалом, где на снимке во вторичных электронах наблюдается разделение фаз волокна и матрицы, однако не удается однозначно определить фазу термопластичного нетканого материала. На рисунке справа (рис. 4а) изображен тот же фрагмент ПКМ, но в обратно рассеянных электронах. Благодаря разности плотностей съемка в обратно рассеянных электронах позволяет наблюдать включения термопласта (обведено зеленым), что говорит о его однородном распределении между слоями углеродной ткани.

На рис. 4б изображена область, обозначенная на рис. 4а красным цветом. При увеличении изображения видно, что поверхность нетканого материала хорошо смочена связующим, что свидетельствует о высокой адгезии эпоксидного связующего к полиамиду. Также наблюдается хаотичное направление нитей нетканого материала, поскольку срез имеет не только круглую, но и овальную форму. Это свидетельствует о том, что волокна находятся не только перпендикулярно срезу, но и под другими углами к направлению армирования.

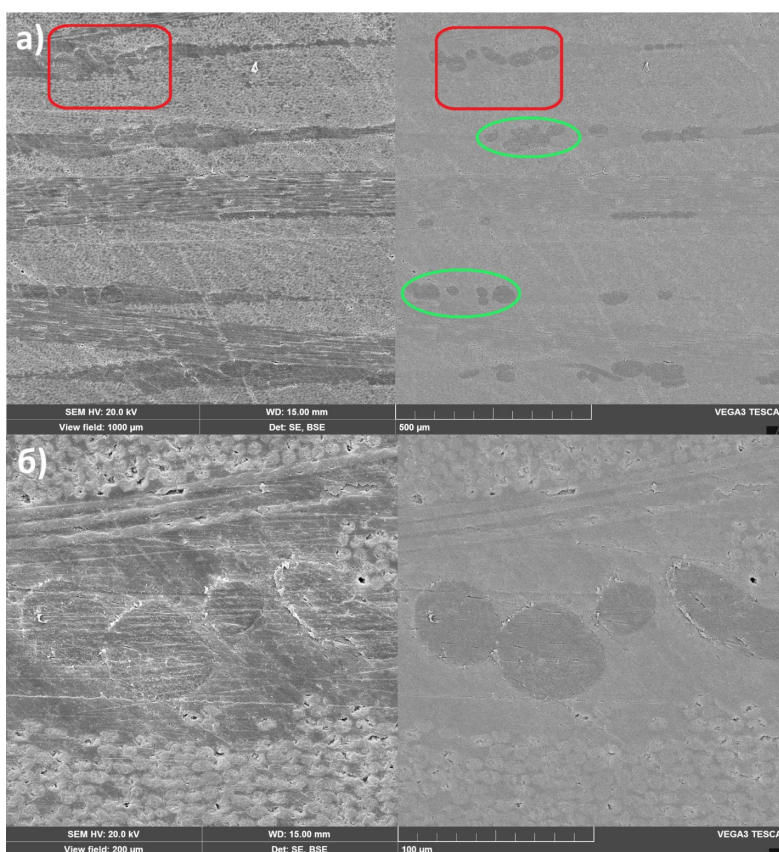


Рис. 4. Изображение РЭМ торцевой части ПКМ с добавлением нетканого материала с детектированием вторичных электронов (слева) и детектированием обратно рассеянных электронов (справа) при различных увеличениях.

Fig. 4. SEM image of the end face of a PCM with the addition of non-woven material with secondary electron detection (left) and backscattered electron detection (right) at different magnifications.

Влияние полиамидного нетканого материала на ударные характеристики оценивали по сопротивлению повреждению композитов при ударе падающим грузом. Для этого были изготовлены образцы пластин ПКМ с выкладкой $[0]_{10}$ и толщиной 2 мм методом автоклавного формования. Образцы подвергались удару с одинаковой (нормированной на толщину образца) энергией, рассчитанной исходя из массы бойка и высоты удара свободно падающего груза. Для испытания на удар использовали ударник массой 1,98 кг с гладким полусфери-

ческим наконечником бойка диаметром 16 мм.

При визуальном контроле наблюдается, что размер дефекта у образца, содержащего полиамидный нетканый материал, меньше, чем у образца без нетканого материала. На фотографии (рис. 5а) у образца T107 наблюдаются вмятины от удара с энергией 1.94 Дж/мм, в то время как у образца с нетканым материалом (рис. 5б) следы удара едва заметны уже при энергии удара 4.85 Дж/мм.



Рис. 5. Фотография образцов ПКМ на основе эпоксидного препрега T107 (а) и препрега T107 с добавлением полиамидного нетканого материала (б) после испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом со стороны удара.

Fig. 5. Photograph of PCM samples based on epoxy prepreg T107 (a) and prepreg T107 with the addition of polyamide non-woven material (b) after testing for resistance to damage upon impact with a falling load from the impact side.

На обратной стороне от удара влияние дефекта на ПКМ можно наблюдать более наглядно. При ударе с энергией 6.67 Дж/мм в случае с ПКМ на основе препрега T107 (рис. 6а) наблюдается

сквозной пробой с разрушением волокон, в то время как у ПКМ с нетканым материалом (рис. 6б) разрушение носит характер расслоения без повреждения волокон.

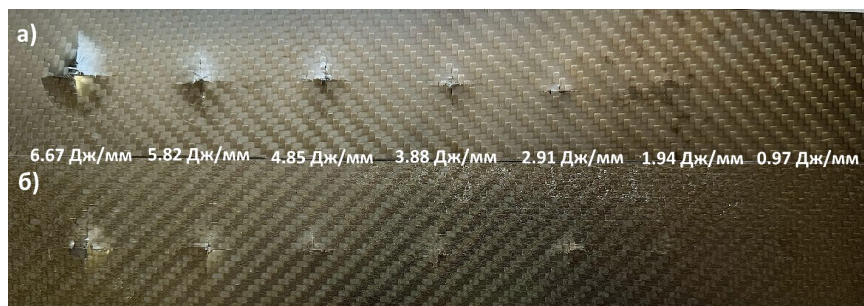


Рис. 6. Фотография образцов ПКМ на основе эпоксидного препрега T107 (а) и препрега T107 с добавлением полиамидного нетканого материала (б) после испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом с обратной стороны от удара.

Fig. 6. Photograph of PCM samples based on epoxy prepreg T107 (a) and prepreg T107 with the addition of polyamide non-woven material (b) after testing for resistance to damage upon impact with a falling load from the opposite side of the impact.

Для определения численного значения влияния нетканого материала на способность выдерживать нагрузки после удара был определен предел прочности ПКМ при сжатии после удара 6,67 Дж/мм при температуре 25 °С. Для этого были изготовлены образцы пластин ПКМ с выкладкой [(+45/-45)(0/90)]_{6s} и толщиной 5 мм методом автоклавного формования. Для образца эпоксидного препрега T107 значение предела прочности при сжатии составило $257 \pm 5,2$ МПа, в то время как для образца с нетканым материалом результат составил $326 \pm 6,6$ МПа.

Выводы

Таким образом, внедрение нетканого материала в состав ПКМ на основе автоклавного эпоксидного препрега увеличило стойкость к воздействию по-

сле ударных нагрузок на 27%. Стоит отметить, что внедрение нетканого материала в состав ПКМ не повлияло на температуру стеклования, а также на плотность конечного изделия (то есть улучшение свойств без увеличения массы ПКМ, что является основным преимуществом перед сплавами металлов). Предел прочности и модуль упругости ПКМ при растяжении, а также предел прочности при межслойном сдвиге показали значения не ниже, чем у ПКМ на основе исходного препрега. Следовательно, изготовленный нами нетканый материал на основе полиамида ПА 12-Э приводит к улучшению механических свойств, что позволяет его применять в конструкциях, требующих повышенные требования к механическим свойствам после удара конечного изделия на основе ПКМ.

Финансирование

Работа проведена в МГУ имени М.В. Ломоносова в ходе реализации проекта по соглашению № 075-11-2022-010 от 6.04.2022 г. по теме «Создание высокотехнологичного производства импортозамещающих композиционных материалов для авиакосмической промышленности» с использованием мер государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218

Список источников

1. Королевич В.В. Перспективы использования композитных материалов в машиностроительных и авиакосмических конструкциях // Технологическая независимость Союзного государства и конкурентоспособность. 2023. Т. 2. С. 220 – 224.
2. Hegde S., Satish Shenoy B., Chethan K.N. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. P. 658 – 662.
3. Zheng H., Zhang W., Li B., Zhu J., Wang C., Song G., Wu G., Yang X., Huang Y., Ma L. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review // Composites Part B: Engineering. 2022. Vol. 233. P. 109639.
4. Калгин А.В., Калинин Ю.Е., Кудрин А.М., Малюченков А.В., Панин Ю.В., Ситников А.В. Перспективы развития производства авиационных деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. С. 146 – 153.
5. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 405 – 419.
6. Валуева М.И., Гуляев И.Н. Обзор публикаций по разработкам лопаток из полимерных композиционных материалов для вентилятора авиационного двигателя // Вестник машиностроения. 2019. № 2 (306). С. 34 – 41.
7. Крылов В.Д., Яковлев Н.О., Курганова Ю.А., Лашов О.А. Межслоевая трещиностойкость конструкционных полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1 (40). С. 79 – 85.
8. Li Y., Hori N., Arai M., Hu N., Liu Y., Fukunaga H. Improvement of interlaminar mechanical properties of CFRP laminates using VGCF // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2009. Vol. 40, № 12. P. 2004 – 2012.
9. Li H., Chen W., Xu J., Li J., Gan L., Chu X., Yao Y., He Y., Li B., Kang F., Du H. Enhanced thermal conductivity by combined fillers in polymer composites // Thermochimica Acta. 2019. Vol. 676. P. 198 – 204.
10. Колобков А.С. Влияние нетканых термопластичных материалов на прочность слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 9. С. 44 – 51.

11. Zhang J., Wang Y., Wang X., Ding G., Pan Y., Xie H., Chen Q., Cheng R. Effects of amino-functionalized carbon nanotubes on the properties of amine-terminated butadiene-acrylonitrile rubber-toughened epoxy resins // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. Vol. 131. № 13. P. 1 – 7.
12. Newman B., Creighton C., Henderson L.C., Stojcevski F. A review of milled carbon fibres in composite materials // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. Vol. 163. P. 107249.
13. Dong J., Jia C., Wang M., Fang X., Wei H., Xie H., Zhang T., He J., Jiang Z., Huang Y. Improved mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites by growing carbon black on carbon fiber surface // *Composites Science and Technology*. 2017. Vol. 149. P. 75 – 80.
14. Pappa E.J., Quinn J.J., Murray J.J., Davidson J.R., O’Bradaigh C.M., McCarthy E.D. Experimental study on the interlaminar fracture properties of carbon fibre reinforced polymer composites with a single embedded toughened film // *Polymers*. 2021. Vol. 13. № 23.
15. Sohn M.S., Hu X.Z. Mode II delamination toughness of carbon-fibre/epoxy composites with chopped Kevlar fibre reinforcement // *Composites Science and Technology*. 1994. Vol. 52. № 3. P. 439 – 448.
16. Кутовая И.В., Полякова Д.И., Эрдни-Горяев Э.М., Липатов Я.В., Афанасьева Е.С., Морозов О.С., Бабкин А.В., Кемпан А.В. Повышение трещиностойкости углепластиков на основе фталонитрилов введением нетканых полиамидных материалов // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2023. Т. 65. № 5. С. 363 – 371.
17. Кутовая И.В., Алексанова А.А., Эрдни-Горяев Э.М., Липатов Я.В., Афанасьева Е.С., Морозов О.С., Бабкин А.В., Кемпан А.В. Повышение трещиностойкости углепластиков введением термопластичной фазы в эпоксидную матрицу // *Журнал прикладной химии*. 2023. Т. 96. № 4. С. 403 – 412.
18. Мейрбеков М.Н., Исмаилов М.Б. Влияние каучука на механические свойства эпоксидной смолы и углепластика (обзор) // *Вестник машиностроения*. 2020. № 1 (312). С. 11 – 21.
19. Водовозов Г.А., Мараховский К.М., Костромина Н.В., Осипчик В.С., Аристов В.М., Кравченко Т.П. Разработка эпокси-каучуковых связующих для создания армированных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2017. № 5-6. С. 9 – 13.
20. Кузнецова В.А. Влияние эластомерного модификатора на механические и вязкоупругие свойства эпоксидно-каучуковых композиций для эрозионностойких покрытий // *Защитные и функциональные покрытия*. 2020. Т. 2. № 59. С. 56 – 62.
21. Zhang J., Xie X. Influence of addition of silica particles on reaction-induced phase separation and properties of epoxy/PEI blends // *Composites Part B: Engineering*. 2011. Vol. 42, № 8. P. 2163 – 2169.
22. Zhou S., Chen Z., Tusiime R., Cheng C., Sun Z., Xu L., Liu Y., Jiang M., Zhou J., Zhang H., Yu M. Highly improving the mechanical and thermal properties of epoxy resin via blending with polyetherketone cardo // *Composites Communications*. 2019. Vol. 13. P. 80 – 84.
23. Palazzetti R., Zucchelli A. Electrospun nanofibers as reinforcement for composite laminates materials – A review // *Composites Structures*. 2017. Vol. 182. P. 711 – 727.
24. Новиков Г.В. Оценка межслоевой трещиностойкости армированных слоистых ПКМ экспериментальными и численными методами: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09. М., 2020. 128 с.

25. Mujika F., De Benito A., Fernandez B., Vazquez A., Llano-Ponte R., Mondragon I. Mechanical properties of carbon woven reinforced epoxy matrix composites. A study on the influence of matrix modification with polysulfone // *Polymer Composites*. 2002. Vol. 23, № 3. P. 372 – 382.
26. Ramji A., Xu Y., Yasae M., Grasso M., Webb P. Influence of veil interleave distribution on the delamination resistance of cross-ply CFRP laminates under low velocity impact // *International Journal of Impact Engineering*. 2021. Vol. 157. P. 103997.
27. Beylergil B., Tanoğlu M., Aktaş E. Effect of polyamide-6,6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites // *Composites Structures*. 2018. Vol. 194. P. 21 – 35.
28. Brugo T., Palazzetti R. The effect of thickness of Nylon 6,6 nanofibrous mat on Modes I–II fracture mechanics of UD and woven composite laminates // *Composites Structures*. 2016. Vol. 154. P. 172 – 178.
29. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. Fractography features of interlaminar crack growth in carbon fibre reinforced plastic under various mode loading // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12. С. 99 – 108.
30. Кудрин А.М., Караева О.А., Габриельс К.С., Солопченко А.В. Определение предела прочности полимерного композиционного материала на сжатие после удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137 // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018. Т. 14. № 2. С. 164 – 169.

References

1. Korolevich V.V. Prospects for the Use of Composite Materials in Mechanical Engineering and Aerospace Structures. Technological Independence of the Union State and Competitiveness. 2023. Vol. 2. P. 220 – 224.
2. Hegde S., Satish Shenoy B., Chethan K.N. Review on Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Their Mechanical Performance. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. P. 658 – 662.
3. Zheng H., Zhang W., Li B., Zhu J., Wang C., Song G., Wu G., Yang X., Huang Y., Ma L. Recent Advances in Interphases in Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review. *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 233. P.109639.
4. Kalgin A.V., Kalinin Yu.E., Kudrin A.M., Malyuchenkov A.V., Panin Yu.V., Sitnikov A.V. Prospects for the Development of Production of Aircraft Parts from Polymer Composite Materials. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2011. Vol.7. P.146 – 153.
5. Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Polymer Composite Materials for Structural Purposes with Functional Properties. *Aviation Materials and Technologies*. 2017. No.5. P. 405 – 419.
6. Valueva M.I., Gulyaev I.N. Review of Publications on the Development of Blades from Polymer Composite Materials for an Aircraft Engine Fan. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2019. No. 2 (306). P. 34 – 41.
7. Krylov V.D., Yakovlev N.O., Kurganova Yu.A., Lashov O.A. Interlaminar crack resistance of structural polymer composite materials. *Aviation materials and technologies*. 2016. No. 1 (40). P. 79 – 85.
8. Li Y., Hori N., Arai M., Hu N., Liu Y., Fukunaga H. Improvement of interlaminar mechanical properties of CFRP laminates using VGCF. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009. Vol. 40, No. 12. P. 2004 – 2012.

9. Li H., Chen W., Xu J., Li J., Gan L., Chu X., Yao Y., He Y., Li B., Kang F., Du H. Enhanced thermal conductivity by combined fillers in polymer composites. *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 676. P. 198 – 204.
10. Kolobkov A.S. Effect of nonwoven thermoplastic materials on the strength of layered polymer composites (review). *Proceedings of VIAM*. 2020. No. 9. P.44 – 51.
11. Zhang J., Wang Y., Wang X., Ding G., Pan Y., Xie H., Chen Q., Cheng R. Effects of amino-functionalized carbon nanotubes on the properties of amine-terminated butadiene-acrylonitrile rubber-toughened epoxy resins. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. Vol.131. No. 13. P. 1 – 7.
12. Newman B., Creighton C., Henderson L.C., Stojcevski F. A review of milled carbon fibers in composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. Vol.163. P. 107249.
13. Dong J., Jia C., Wang M., Fang X., Wei H., Xie H., Zhang T., He J., Jiang Z., Huang Y. Improved mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites by growing carbon black on carbon fiber surface. *Composites Science and Technology*. 2017. Vol. 149. P. 75 – 80.
14. Pappa E.J., Quinn J.J., Murray J.J., Davidson J.R., O'Bradaigh C.M., McCarthy E.D. Experimental study on the interlaminar fracture properties of carbon fiber reinforced polymer composites with a single embedded toughened film. *Polymers*. 2021. Vol.13. No. 23.
15. Sohn M.S., Hu X.Z. Mode II delamination toughness of carbon-fibre/epoxy composites with chopped Kevlar fibre reinforcement. *Composites Science and Technology*. 1994. Vol. 52. No. 3. P. 439 – 448.
16. Kutovaya I.V., Polyakova D.I., Erdni-Goryaev E.M., Lipatov Ya.V., Afanasyeva E.S., Morozov O.S., Babkin A.V., Kempan A.V. Increasing crack resistance of carbon-fiber-reinforced plastics based on phthalonitriles by introducing nonwoven polyamide materials. *High-molecular compounds. Series B*. 2023. Vol. 65. No. 5. P. 363 – 371.
17. Kutovaya I.V., Aleksanova A.A., Erdni-Goryaev E.M., Lipatov Ya.V., Afanasyeva E.S., Morozov O.S., Babkin A.V., Kempan A.V. Increasing the crack resistance of carbon fiber reinforced plastics by introducing a thermoplastic phase into the epoxy matrix. *Journal of Applied Chemistry*. 2023. Vol. 96. No. 4. P. 403 – 412.
18. Meirbekov M.N., Ismailov M.B. The effect of rubber on the mechanical properties of epoxy resin and carbon fiber (review). *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2020. No. 1 (312). P. 11 – 21.
19. Vodovozov G.A., Marakhovsky K.M., Kostromina N.V., Osipchik V.S., Aristov V.M., Kravchenko T.P. Development of epoxy-rubber binders for the creation of reinforced composite materials. *Plastics*. 2017. No. 5-6. P. 9 – 13.
20. Kuznetsova V.A. Influence of elastomer modifier on the mechanical and viscoelastic properties of epoxy-rubber composites for erosion-resistant coatings. *Protective and functional coatings*. 2020. Vol. 2. No. 59. P.56 – 62.
21. Zhang J., Xie X. Influence of addition of silica particles on reaction-induced phase separation and properties of epoxy/PEI blends. *Composites Part B: Engineering*. 2011. Vol.42, No. 8. P. 2163 – 2169.
22. Zhou S., Chen Z., Tusiime R., Cheng C., Sun Z., Xu L., Liu Y., Jiang M., Zhou J., Zhang H., Yu M. Highly improving the mechanical and thermal properties of epoxy resin via blending with polyetherketone cardo. *Composites Communications*. 2019. Vol.13. P. 80 – 84.

23. Palazzetti R., Zucchelli A. Electrospun nanofibers as reinforcement for composite laminates materials – A review. *Composites Structures*. 2017. Vol. 182. P. 711 – 727.
24. Novikov G.V. Evaluation of interlayer crack resistance of reinforced layered PCMs by experimental and numerical methods: dis. ... candidate of technical sciences: 05.16.09. M., 2020. 128 p.
25. Mujika F., De Benito A., Fernandez B., Vazquez A., Llano-Ponte R., Mondragon I. Mechanical properties of carbon woven reinforced epoxy matrix composites. A study on the influence of matrix modification with polysulfone. *Polymer Composites*. 2002. Vol. 23, No. 3. P. 372 – 382.
26. Ramji A., Xu Y., Yasae M., Grasso M., Webb P. Influence of veil interleave distribution on the delamination resistance of cross-ply CFRP laminates under low velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2021. Vol.157. P. 103997.
27. Beylergil B., Tanoğlu M., Aktaş E. Effect of polyamide-6,6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites. *Composites Structures*. 2018. Vol. 194. P. 21 – 35.
28. Brugo T., Palazzetti R. The effect of thickness of Nylon 6.6 nanofibrous mat on Modes I–II fracture mechanics of UD and woven composite laminates. *Composites Structures*. 2016. Vol. 154. P. 172 – 178.
29. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. Fractography features of interlaminar crack growth in carbon fiber reinforced plastic under various loading modes. *Proceedings of VIAM*. 2019. No. 12. P. 99 – 108.
30. Kudrin A.M., Karaeva O.A., Gabriels K.S., Solopchenko A.V. Determination of the ultimate compressive strength of a polymer composite material after impact in accordance with ASTM D 7137. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2018. Vol. 14. No. 2. P. 164 – 169.

Информация об авторах

Кондратьева А.А., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2892-522X>, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, aleksanova.aa@mail.ru

Морозов О.С., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3852-1066>, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, osmorozov@yandex.ru

Эрдни-Горяев Э.М., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9998-4982>, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, erdnigoryaev@gmail.com

Афанасьева Е.С., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5491-1156>, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, katrine.news@gmail.com

Бабкин А.В., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2309-4524>, ООО «ИТЕКМА», г. Подольск, alexandr.babkin@gmail.com

Кепман А.В., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7050-9274>, ООО «ИТЕКМА», г. Подольск, alexkep@mail.ru

Авдеев В.В., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5573-2987>, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, avdeev@highp.chem.msu.ru

Information about the authors

Kondratieva A.A., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2892-522X>, Lomonosov Moscow State University, aleksanova.aa@mail.ru

Morozov O.S., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3852-1066>, Lomonosov Moscow State University, osmorozov@yandex.ru

Erdni-Goryaev E.M., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9998-4982>, Lomonosov Moscow State University, erdnigoryaev@gmail.com

Afanasyeva E.S., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5491-1156>, Lomonosov Moscow State University, katrine.news@gmail.com

Babkin A.V., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2309-4524>, ITECMA LLC, Podolsk, alexandr.babkin@gmail.com

Kepman A.V., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7050-9274>, ITECMA LLC, Podolsk, alexkep@mail.ru

Avdeev V.V., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5573-2987>, Lomonosov Moscow State University, avdeev@highp.chem.msu.ru

© Кондратьева А.А., Морозов О.С., Эрдни-Горяев Э.М., Афанасьева Е.С., Бабкин А.В., Кепман А.В., Авдеев В.В., 2024