

Received: 27.06.2025

Revised: 10.08.2025

Accepted: 29.08.2025









DOI: 10.17804/2410-9908.2025.4.041-056

FRACTURE STRENGTH UNDER VARIOUS TYPES OF LOADING AND THE DAMPING CAPACITY OF LAYERED METAL–POLYMER COMPOSITES REINFORCED WITH BASALT FIBERS

S. V. Petrova^{1, a, *}, S. V. Gladkovsky^{1, 2, b}, S. V. Smirnov^{1, c}, and D. I. Vichuzhanin^{1, d}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

²*Ural Federal University,
19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

^a  <https://orcid.org/0000-0003-4503-5488>  s.kuteneva@inbox.ru;
^b  <https://orcid.org/0000-0002-3542-6242>  gsv@imach.uran.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  svs@imach.uran.ru;
^d  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru

*Corresponding author. Email: s.kuteneva@inbox.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskasya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (912) 250-1987

Metal–polymer composites with layers of steel, aluminum, titanium alloys and interlayers of glass, organic, and carbon fiber plastics are increasingly widely used in aerospace and automotive industry products. The layered architecture of such materials provides them with high fatigue strength and resistance to brittle fracture, and the polymer constituent effectively damps external mechanical vibrations. The paper presents the results of studying a set of mechanical characteristics and mechanisms of destruction of hybrid layered metal–polymer composites based on the 09G2S steel, the AMg3 aluminum alloy, and polyetheretherketone (PEEK) thermoplastic polymer reinforced with 40% volume fraction of basalt fiber. Five-layered composites of four design types were made by hot pressing using a hot-curing adhesive. Impact tests using the three-point bending scheme reveal a high impact strength of the specimens made of the produced layered materials and a tendency for an abnormal increase in the KCV values as the test temperature decreases from +200 to –60 °C, with the preserved integrity of most layers of the composites. The highest recorded values of $KCV \geq 0.47\text{--}0.55 \text{ MJ/m}^2$ were obtained on a composite containing one central and two external layers of the 09G2S steel, as well as two basalt fiber reinforced polymer interlayers. The cyclic tests of layered materials without a stress concentrator demonstrate that the highest number of cycles ($N = 96\,730$) before destruction corresponding to a drop of applied load and delamination of individual metal layers from polymer ones is achieved in a composite with steel external layers and an aluminum central layer. The method of dynamic mechanical analysis is used to determine the damping capacity of the composites and the polymer constituent. Reinforcement of the PEEK polymer with unidirectional basalt fiber is shown to contribute to an increase in the damping parameters ($\text{tg}\delta$, E' , and E''). The study reveals the features and stages of the destruction of the layered composites, caused by the layered architecture and the properties of the constituent layers. It testifies that the studied five-layered metal–polymer composites have a fairly high level of impact strength, fatigue strength, and damping capacity.

Keywords: layered metal–polymer composites, basalt fibers, metal layers, impact strength, cyclic tests, micromechanical properties, damping ability, fracture mechanisms

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment for the IES UB RAS, No 124020600045-0. The equipment of the Plastometriya shared research facilities at the IES UB RAS. We appreciate the assistance of Dr. P. V. Kosmachev and Dr. A. M. Patselov (both from the IPM UB RAS) in making specimens of laminated metal–polymer composites.

References



1. Меттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. – М. : Техносфера, 2004. – 408 с.
2. Chawla K. K. Composite Materials: Science and Engineering. – 3rd edition. – New York : Springer, 2013. – 483 p.
3. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90, № 4. – С. 331–334.
4. Титанополимерные слоистые материалы / А. Л. Яковлев, Н. А. Ночовная, С. В. Путырский, В. А. Крохина // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № S2 (44). – С. 56–62. – DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
5. Design optimization of high interface strength metal-polymer-metal sandwich panels / R. K. Naik, A. K. Das, P. R. Mahale, S. K. Panda, V. Racherla // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2023. – Vol. 171. – P. 107544. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107544.
6. Investigation on the bending properties and geometric defects of steel/polymer/steel sheets – three-point and hat-shaped bending / P. Maleki, M. Shahzamanian, W. J. Basirun, P. Wu, A. Akbarzadeh // Metals. – Vol. 14 (8). – P. 935. – DOI: 10.3390/met14080935.
7. Гончаров В. А., Тимошков П. Н., Усачева М. Н. Перспективы производства крупногабаритных авиационных деталей из полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. – № 12 (106). – С. 55–62.
8. Delmonte J. Metal/Polymer Composites. – New York : Springer, 2012. – 268 p.
9. Слоистые металлополимерные композиционные материалы / В. В. Антипов, О. Г. Сенаторова, Н. Ф. Лукина, В. В. Сидельников, В. В. Шестов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № S. – С. 226–230.
10. Reyes-Villanueva G., Cantwell W. J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures // Composite Science and Technology. – 2004. – Vol. 64. – P. 35–54. – DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00197-0.
11. Полмеар Я. Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. – М. : Техносфера, 2008. – 464 с.
12. Каблов Е. Н., Антипов В. В., Сенаторова О. Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и Tu Delft // Цветные металлы. – 2013. – Т. 849, № 9. – С. 50–53. – DOI: 10.1134/S0036023613100215.
13. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов / В. В. Антипов, Н. Ю. Серебренникова, В. В. Шестов, В. В. Сидельников // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № S. – С. 212–224. – DOI: 0.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.
14. Баженов С. Л. Механика и технологии композиционных материалов. – Долгопрудный : ИД Интеллект, 2014. – 328 с.
15. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением / М. И. Душин, А. В. Хрульков, Р. Р. Мухаметов, Л. В. Чурсова // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 1. – С. 18–26.
16. Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ / Е. А. Вешкин, В. И. Постнов, М. В. Постнова, А. А. Баранников // Известия



- Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 4 (3). – С. 344–350.
17. A review on the hybrid titanium composite laminates (HTCLs) with focuses on surface treatments, fabrications, and mechanical properties / M. E. Kazemian, L. Shanmugam, L. Yang, J. Yang // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2020. – Vol. 128 – P. 105679. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105679.
18. Mechanical evaluation on carbon/basalt fiber-reinforced hybrid polymer matrix composite / R. A. Alshgari, M. S. C. Prasad, B. K. Srivastava, M. S. Al Ansari, P. Gupta, A. Sivakumar, S. M. Wabaidur, M. A. Islam, A. Diriba // *Advances in Polymer Technology*. – 2022. – Vol. 2022. – P. 7742349. – DOI: 10.1155/2022/7742349.
19. A review on basalt fibre and its composites / V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, A. Valenza // *Composites: Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 74. – P. 74–94. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.034.
20. De Paiva J. M. F., Dos Santos A. D. N., Rezende M. C. Mechanical and morphological characterizations of carbon fiber fabric reinforced epoxy composites used in aeronautical field // *Materials Research*. – 2009. – Vol. 12 (3). – P. 367–374.
21. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites / V. Dhand, G. Mittal, K. Y. Rhee, S.-J. Park, D. Hui // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 73. – P. 166–180. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.
22. Демпфирующие свойства гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых, титановых сплавов и слоев органопластика / Г. Ф. Железина, А. С. Колобков, Г. С. Кулагина, А. Ч. Кан // *Труды ВИАМ*. – 2021. – № 6 (96). – С. 10–19.
23. Babaytsev A. V., Lopatin S. S., Nasonov F. A. Study of dynamic characteristics of hybrid titanium-polymer composite materials // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2024. – Vol. 20 (1). – P. 109–115. – DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-109-115.
24. Brittle fracture resistance and damping properties of a steel-rubber metal-polymer composite / S. V. Gladkovsky, P. D. Nedzvetsky, D. I. Vichuzhanin, S. V. Kuteneva, S. V. Lepikhin // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2020. – Iss. 2. – P. 6–18. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.006-018. – URL: http://dream-journal.org/issues/2020-2/2020-2_289.html
25. Delamination toughening of ultrafine grain structure steels processed through tempforming at elevated temperatures / Y. Kimura, T. Inoue, F. Yin, K. Tsuzaki // *ISIJ International*. – 2010. – Vol. 50 (1). – P. 152–161. – DOI: 10.2355/isijinternational.50.152.
26. Сопротивление хрупкому разрушению и демпфирующие свойства слоистых металлополимерных композитов / С. В. Кутенева, С. В. Гладковский, Д. И. Вичужанин, П. Д. Недзвецкий // *Письма о материалах*. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 279–284. – DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-279-284.
27. Партон В. З. Механика разрушения: от теории к практике. – М. : Наука, 1990. – 240 с.



Подана в журнал: 27.06.2025
УДК 621.792.4-053:620.178.746.22:539.67
DOI: 10.17804/2410-9908.2025.4.041-056



СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ И ДЕМПИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, УПРОЧНЕННЫХ БАЗАЛЬТОВЫМИ ВОЛОКНАМИ

С. В. Петрова^{1, а, *}, С. В. Гладковский^{1, 2, б}, С. В. Смирнов^{1, в}, Д. И. Вичужанин^{1, г}

^а  <https://orcid.org/0000-0003-4503-5488>  s.kuteneva@inbox.ru;

^б  <https://orcid.org/0000-0002-3542-6242>  gsv@imach.uran.ru;

^в  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  svs@imach.uran.ru;

^г  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620062, Россия

*Ответственный автор. Электронная почта: s.kuteneva@inbox.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия
Тел.: +7 (912) 250-19-87

Все более широкое применение в изделиях аэрокосмической и автомобильной промышленности находят металлополимерные композиты со слоями из стальных, алюминиевых, титановых сплавов и с прослойками из стекло-, органо- и углепластиков. Слоистая архитектура таких материалов обеспечивает им высокую усталостную прочность и сопротивление хрупкому разрушению, а полимерная составляющая эффективно выполняет функцию демпфирования внешних механических колебаний. В работе представлены результаты изучения комплекса механических характеристик и механизмов разрушения гибридных слоистых металлополимерных композиционных материалов на основе стали 09Г2С, алюминиевого сплава АМгЗ и термопластичного полимера полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), армированного базальтовым волокном с объемной долей 40 %. Изготовление пятислойных композитов четырех конструктивных типов проводилось методом горячего прессования с применением адгезива горячего отверждения. Ударные испытания по схеме трехточечного изгиба выявили повышенный уровень ударной вязкости образцов полученных слоистых материалов и тенденцию к аномальному росту значений КСВ с понижением температуры испытаний от 200 до -60 °С при сохранении целостности большинства слоев композитов. Наибольшие зафиксированные значения $КСВ \geq 0,47-0,55$ МДж/м² были получены на композите, содержащем два внешних и один центральный слой из стали 09Г2С, а также две армированные базальтовым волокном полимерные прослойки. По результатам циклических испытаний образцов слоистых материалов без концентратора напряжений установлено, что наибольшее число циклов ($N = 96730$) до соответствующего началу процесса разрушения падения приложенной нагрузки и отслоения отдельных металлических слоев от полимерных достигается в композите с внешними стальными слоями и центральным слоем из алюминиевого сплава АМгЗ. Методом динамического механического анализа определена демпфирующая способность изученных композитов и полимерной составляющей. Показано, что армирование полимера ПЭЭК однонаправленным базальтовым волокном способствует повышению показателей демпфирования ($tg\delta$, E' и E''). Выявлены обусловленные слоистой архитектурой и свойствами составляющих слоев особенности и стадийность процесса разрушения слоистых композитов. В результате проведенного исследования установлено, что изученные пятислойные

металлополимерные композиты обладают достаточно высоким уровнем ударной вязкости, усталостной прочности и демпфирующей способности.

Ключевые слова: слоистые металлополимерные композиты, базальтовые волокна, металлические слои, ударная вязкость, циклические испытания, микромеханические свойства, демпфирующая способность, механизмы разрушения

1. Введение

Актуальным направлением развития современного материаловедения в области композиционных материалов является разработка и исследование новых слоистых металлополимерных композитов функционального назначения [1–3]. Преимущество данных материалов перед монолитными металлами или полимерами заключается в их особой слоистой архитектуре и сочетании в композите материалов с резко различными физико-механическими свойствами, что обеспечивает композиту новые уникальные качества. Благодаря многолетним усилиям отечественных и зарубежных исследователей предложены новые составы и конструкции слоистых металлополимеров, обладающих при низком удельном весе высокой ударной вязкостью и удельной прочностью, стойкостью в агрессивных средах, износостойкостью, ударной вязкостью и сопротивлением усталостному разрушению [4–7]. Более высокий уровень физико-механических и служебных свойств металлополимерных композитов со слоистой архитектурой, по сравнению с монолитными металлами и полимерами, в сочетании с относительной простотой и невысокой стоимостью производства обеспечивает их широкое применение в транспортном и химическом машиностроении, судостроении, автомобильной и аэрокосмической промышленности [8–10].

Так, за последние десятилетия были разработаны и внедрены в авиастроение такие слоистые металлополимерные композиты как ARALL/АЛОП (на основе арамидных волокон, пропитанных эпоксидной смолой), CARAL/АЛКАР (на основе углеродных волокон) и GLARE/СИАЛ (на основе стеклянных волокон), которые изготавливаются на базе различных алюминиевых сплавов [11–13].

В качестве металлической основы металлополимерных композитов используются слои из сталей, алюминиевых и титановых сплавов, а полимерными составляющими являются терморезистивные и термопластичные стекло-, органо-, углепластики и эластомеры (резины) [2, 7, 8]. Армирование полимерных слоев достигается за счет введения минеральных, полимерных, углеродных волокон и текстильных форм из них (нити, ленты, ткани). Для получения металлополимерных композитов используются методы холодного склеивания, горячего прессования, пропитки под давлением, вакуумной инфузии и автоклавного формования [14–16]. Благодаря сложной многоуровневой структуре армированных полимерных составляющих такие материалы относятся к гибридным слоистым композитам [13, 17]. Значительный научный и практический интерес представляют армированные базальтовыми волокнами слоистые полимерные и металлополимерные композиты, в том числе композиты на основе термопластичного полимера ПЭЭК [18–19]. Важным служебным свойством конструкционных материалов для использования в авиастроении и транспортном машиностроении является их способность к гашению упругих колебаний в процессе эксплуатации изделий и элементов конструкций. В работах [22–24] показано, что оцениваемые методом динамического механического анализа (ДМА) демпфирующие характеристики слоистых композитов со слоями из стальных, алюминиевых, титановых сплавов и с прослойками из полимеров и эластомеров значительно выше по сравнению с монолитными металлами и сплавами. При этом увеличению вибростойкости слоистых композитов способствует повышение объемной доли полимерной составляющей, выполняющей функцию гасителя механических колебаний по отношению к металлическим слоям. Следует отметить, что демпфирующая способность металлополимерных композитов на основе ПЭЭК,

армированных базальтовым волокном, ранее не изучалась. Таким образом, целью настоящей работы являлось изучение влияния состава и конструкции металлополимерных композитов со слоями из стали 09Г2С, алюминиевого сплава АМг3 и композитов на основе термопластичного полимера ПЭЭК, армированного базальтовыми волокнами, на сопротивление воздействию динамических и циклических нагрузок, на способность к демпфированию механических колебаний.

2. Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлся полученный в лабораторных условиях методом горячего прессования гибридный пятислойный металлополимерный композит, армированный базальтовыми волокнами. В качестве металлических слоев использовалась низкоуглеродистая малолегированная сталь 09Г2С и алюминиевый деформируемый сплав АМг3. Составляющие композит металлические материалы имели следующий химический состав (в масс.%): сталь 09Г2С – Fe (осн.); 0,12%С; 1,32%Mn; 0,68%Si; 0,12%Cu; 0,07%Cr; 0,07%Ni; 0,04%Al; 0,02%P; 0,01%S; 0,01%Mo, а алюминиевый сплав АМг3 – Al (осн.); 3,4%Mg; 0,6%Si; 0,5%Cu; 0,4%Mn; 0,05%Cr; 0,2%Zn; 0,1%Fe; 0,1%Ti. Для определения химического состава материалов использовался оптический эмиссионный спектрометр Spectromaxx. Полосы сплава АМг3 использовались в состоянии поставки, а стали 09Г2С – после нормализации. Толщина металлических слоев составляла $2 \pm 0,2$ мм. Полимерные слои композитов были выполнены в лабораторных условиях на основе термопластичного полимера полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), армированного на 40 об.% однонаправленным базальтовым волокном. Толщина полимерных слоев также составляла $2 \pm 0,2$ мм. Слоистые металлополимерные композиты получали по технологии горячего прессования с применением адгезива горячего отверждения марки ВС-10Т. Процесс изготовления пятислойных композитов выполнялся в металлическом кондукторе на гидравлическом прессе со встроенным нагревательным устройством в течение 2 часов при температуре, соответствующей температуре отверждения клея (180 ± 5 °С) под давлением 1,5 МПа со скоростью последующего охлаждения под давлением, составляющей 4,5 °С/мин. Методом горячего прессования были получены 4 типа конструкции композитов, в которых в качестве внешних и центральных слоев использованы, соответственно, стальные и/или алюминиевые пластины, а промежуточные слои выполнены из армированного базальтовыми волокнами полимера. Состав, конструкция, удельный вес и доля полимерной составляющей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Конструкция, удельный вес и доля полимерной составляющей в изученных слоистых композиционных материалах

Тип СКМ	Конструкция композита	Доля полимера, об. %	Удельный вес, г/см ³
I	09Г2С–ПЭЭК/базальт–09Г2С–ПЭЭК/базальт–09Г2С	40	5,32
II	09Г2С–ПЭЭК/базальт–АМг3–ПЭЭК/базальт–09Г2С	42	4,49
III	АМг3–ПЭЭК/базальт–АМг3–ПЭЭК/базальт–АМг3	41	2,36
IV	АМг3–ПЭЭК/базальт–09Г2С–ПЭЭК/базальт–АМг3	43	3,29

Для оценки сопротивления композитов хрупкому разрушению при температурах –60, +20 и +200 °С были проведены испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре ИТ 542М Tinius Olsen с максимальной запасенной энергией удара 543 Дж и ценой деления 1 Дж на образцах размером 10 × 10 × 55 мм с V-образным надрезом по «тормозящему типу» (с ориентацией линии надреза поперек слоев композита). Температуры испытаний были выбраны с учетом рабочих температур клев ВС-10Т и полимерного композита. В связи

с тем что толщина внешних слоев составляла 2 мм, на ударные образцы размером $10 \times 10 \times 55$ мм наносился V-образный надрез нестандартной глубины 1,5 мм. Разброс энергии удара, определенной по результатам испытаний не менее 3 идентичных образцов, не превышал 5 %. Циклические испытания образцов слоистых композитов I–III размером $10 \times 10 \times 55$ мм без концентраторов напряжений проводились при комнатной температуре по схеме отнулевого знакопостоянного циклического изгиба на сервогидравлической испытательной установке Instron 8801 (рис. 1). Частота нагружения составляла 10 Гц. Для выбора величины первоначальной циклической нагрузки по отношению к нагрузке условного предела текучести ($P = 0,7P_{0,2}$) предварительно проведены по ГОСТ 14019-2003 испытания слоистых материалов на трехточечный статический изгиб.



Рис. 1. Схема испытания композитов на знакопостоянный циклический изгиб

Для оценки демпфирующих свойств пятислойных композитов и их составляющих толщиной 10 и 2 мм соответственно были проведены циклические испытания по схеме циклического трехточечного изгиба с частотой 1 Гц на установке динамического механического анализа NETZSCH GABO EPLEXOR 100 N при температурах 20 и 200 °С.

Оценка микромеханических свойств материала проводилась методом инструментального микроиндентирования с записью диаграмм в процессе нагружения и разгружения индентора. Согласно стандарту ISO 14577 на измерительной системе Fisherscope HM2000 XYm определяли максимальную глубину вдавливания индентора h_{max} и остаточную глубину вдавливания индентора после снятия нагрузки h_p с построением диаграммы нагружения и разгружения индентора в процессе микроиндентирования. Также определяли контактный модуль упругости E^* , твердость вдавливания при максимальной нагрузке H_{IT} , твердость по Мартенсу НМ, твердость по Виккерсу НV, работу обратной упругой деформации вдавливания W_e и общую механическую работу вдавливания W_t .

Изучение строения поверхности изломов и боковой поверхности образцов слоистых композитов после ударных и циклических испытаний проводили с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Vega II XMU и оптического микроскопа МБС-10.

3. Результаты и обсуждение

По результатам испытаний на ударный изгиб было установлено, что наибольшими значениями зафиксированной ударной вязкости обладают композиты I на основе стальных слоев, а наименьшими значениями ударной вязкости – композиты III на основе алюминиевых слоев (рис. 2), что может быть объяснено высокой ударной вязкостью стали 09Г2С и более низкими значениями у алюминиевого сплава АМг3. Отмечается, что фиксируемые значения ударной вязкости композитов I и III с однотипными металлическими слоями ниже значений KCV его исходных составляющих, стали 09Г2С и алюминиевого сплава АМг3, что обусловлено наличием более хрупкой армированной полимерной составляющей в слоистой композитной конструкции.

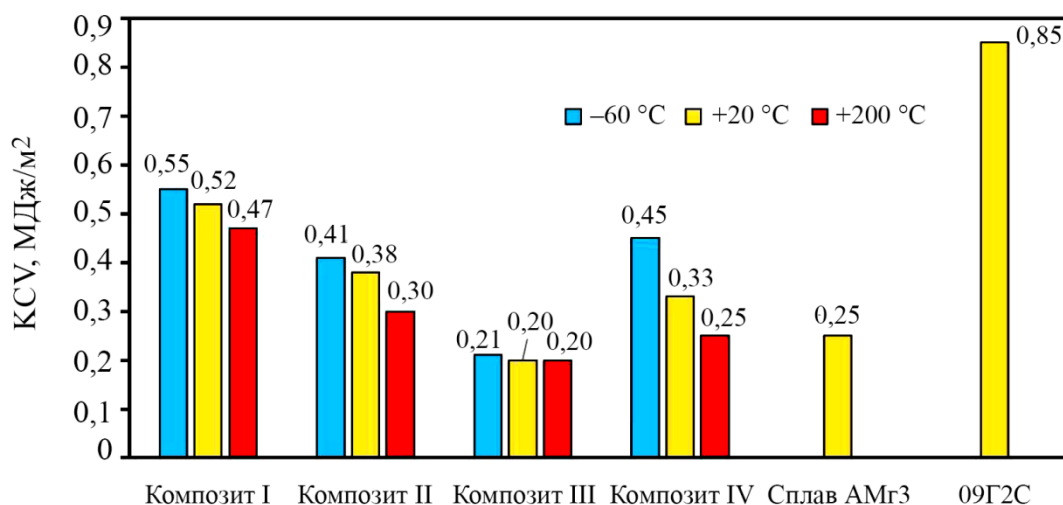


Рис. 2. Результаты испытаний на ударный изгиб пятислойных металлополимерных композитов и исходных составляющих

Промежуточные значения ударной вязкости наблюдаются у композитов с комбинированными в одной конструкции металлическими стальными и алюминиевыми слоями (композиты II и IV). Сравнивая значения KCV композитов III и IV (рис. 2), стоит отметить, что замена центрального алюминиевого слоя на стальной в композите с внешними алюминиевыми слоями приведет к значительному приросту ударной вязкости слоистого материала при незначительном увеличении удельного веса. Также важно отметить, что все композиты разрушаются не полностью. Происходит разрушение не более двух слоев композита в направлении действия ударной нагрузки, после чего происходит торможение трещины на границе раздела слоев, резкая смена траектории движения трещины и ее дальнейший рост вдоль межслойной границы с появлением расслоения композита (рис. 3). Энергия удара тратится на деформацию последующих слоев композита, значения ударной вязкости композита в реальности превосходят зафиксированные установкой показатели, и поэтому в таблице они приведены со знаком «>». Композиты каждого типа конструкции при температурах -60, +20, +200 °C обладают близкой по значениям ударной вязкостью вне зависимости от температуры испытаний. При этом для всех конструкций композитов отмечается небольшой прирост ударной вязкости при отрицательной температуре. Тенденция повышения вязкости при пониженных температурах связана с проявлением эффекта «вязкости расслоения» с ростом протяженности расслоений [25], когда повышение ударной вязкости вызвано сменой направления роста магистральной трещины от перпендикулярного к поверхности слоев к направлению в плоскости границ раздела слоев композита. Этот эффект наблюдался ранее на слоистых металлорезиновых композитах [24, 26]. Поскольку рабочие температуры клея ВС-10Т находятся в пределах от -60 до +300 °C, то низкотемпературные испытания проводились

в критических условиях для клеевого соединения. Поэтому воздействие ударной нагрузки при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ привело к расслоению практически на всех межслойных границах композитов.

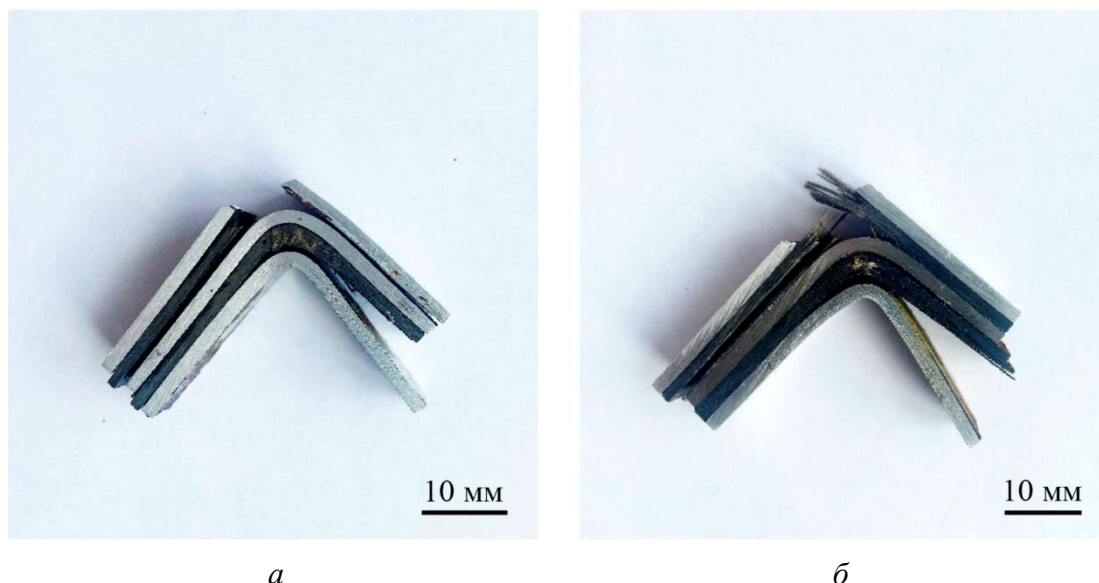


Рис. 3. Макроизображения ударных образцов композита III после испытаний при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и композита IV после испытаний при $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)

Слои полимера в процессе ударного нагружения продемонстрировали высокое сопротивление хрупкому разрушению за счет слоистой структуры, сформированной армированием непрерывными базальтовыми волокнами. Под действием удара во всех конструкциях композитов разрушился только один полимерный слой, близкий к V-образному надрезу, при этом внутри полимерных слоев наблюдалась развитая сеть микротрещин вдоль и поперек базальтовых волокон.

Для оценки сопротивления слоистых металлополимерных композитов I–III постоянным циклическим нагрузкам были проведены усталостные знакопостоянные испытания при частоте 10 Гц. Результаты усталостных испытаний композитов I–III представлены в табл. 2. Начальную нагрузку выбирали таким образом, чтобы напряжение при изгибе составляло 0,75 от величины условного предела текучести композитов. При этом значение предела текучести $\sigma_{0,2}$ определяли путем предварительных испытаний композитов на статический изгиб. Повышение нагрузки на завершающей стадии испытаний связано с постоянным поддержанием испытательной машиной Instron 8801 величины деформации (прогиба) при нагружении образца в режиме контроля по деформации. По результатам усталостных испытаний композитов на циклический изгиб было определено число циклов до разрушения композитов (табл. 2).

Таблица 2

Параметры и результаты усталостных испытаний композитов I–III

Количество циклов до разрушения	Начальная нагрузка, кН	Нагрузка перед разрушением, кН	Спад нагрузки до значений, кН
Композит I			
84 540	2,36	2,39	1,97
Композит II			
96 730	2,22	2,55	2,45
Композит III			
10 400	1,32	1,61	1,13

На стадии частичного разрушения слоистых образцов наблюдалось заметное падение нагрузки, что связано со снижением жесткости образцов вследствие возникновения расслоений на границах соединения составляющих композита. В качестве критерия разрушения принимали падение нагрузки, вызванное возникновением расслоений на межслойной границе металлических и полимерных слоев протяженностью до 50 % от длины образца (рис. 4 и 5 *a*). При этом стоит отметить, что катастрофического разрушения слоистых композитов, под которым понимается развитие трещины через слои (перпендикулярно поверхности раздела слоев), не происходило. Все слои на образцах композитов I–III сохранили свою целостность. Наибольшее число циклов до разрушения, 96 730, выдержал композит II на основе стальных слоев, а наименьшее число циклов до разрушения, 10 400, выдержал композит III на основе алюминиевых слоев.

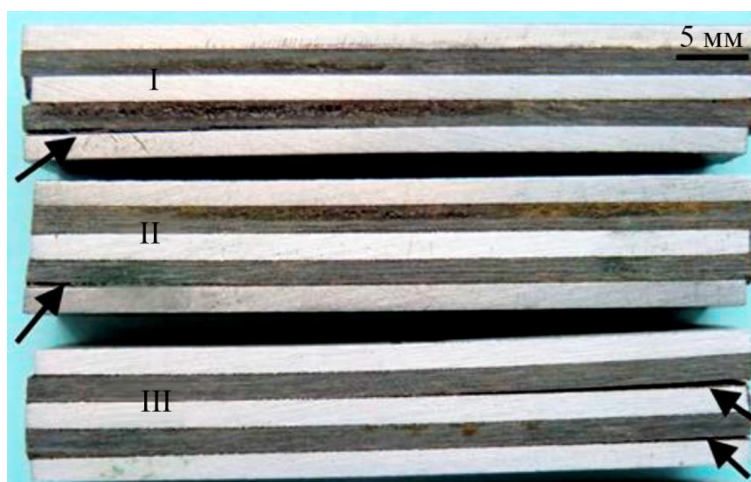
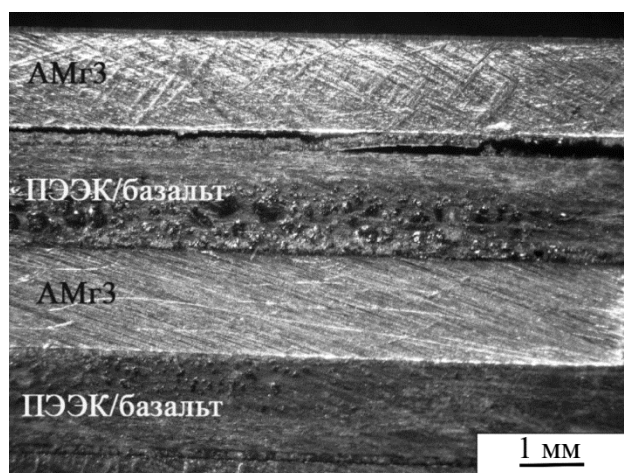
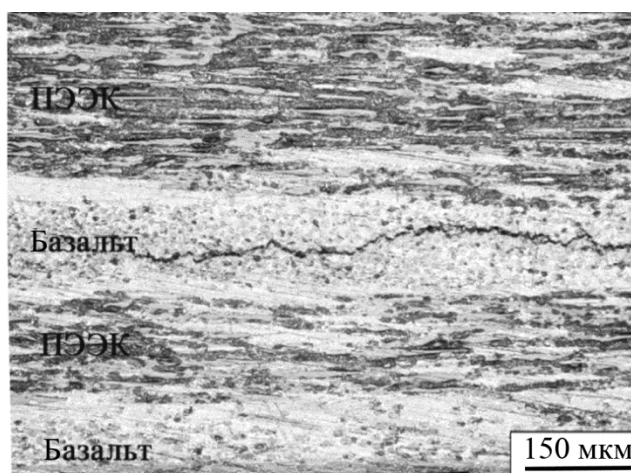


Рис. 4. Боковая поверхность образцов композитов I–III после испытаний на трехточечный циклический изгиб (стрелками показаны возникшие к концу циклических испытаний расслоения длиной от 25 до 50 % от длины образца)



a



б

Рис. 5. Расслоение на границе алюминиевого и полимерного слоев композита III, вызванное циклическим знакопостоянным изгибом на 10 400-м цикле, (*a*) распространение трещины в полимерном слое под действием ударной нагрузки (*б*)

Для оценки микромеханических характеристик армированного базальтовым волокном ПЭЭК использовалась методика инструментального индентирования. Результаты инденти-

рования показали, что при попадании индентора в прослойку ПЭЭК, свободную от армирующих волокон, контактный модуль упругости достигает значения 20 ГПа, а твердость по Виккерсу HV_{0,025} – 100, что соответствует значениям модуля упругости и твердости чистого полимера.

При попадании индентора в участок матрицы ПЭЭК, наполненной волокном, значения модуля упругости и твердости резко возрастают и достигают значений 38 ГПа и HV_{0,025} 370 соответственно. Для расчета средних значений измеряемых показателей микроиндентирования использовали способ среднего арифметического. Усредненные значения контактного модуля упругости и твердости во всем объеме наполненного полимера соответствуют 32 ГПа и HV_{0,025} 225 (табл. 3). Микромеханические свойства во многом определяются матрицей композита. Так, например, модуль упругости композита на основе фенолформальдегидной смолы, упрочненной базальтовыми волокнами, составляет 70–90 ГПа, а композита на основе полипропилена, армированного также базальтовыми волокнами, – 3,2–4,2 ГПа [14].

Таблица 3

Усредненные результаты микроиндентирования армированного базальтовыми волокнами ПЭЭК при нагрузке на индентор Виккерса 0,245 Н

h_{max} , мкм	h_p , мкм	HM	HV	H_{IT}	E^* , ГПа	W_i , 10^{-3} мкДж	W_e , 10^{-3} мкДж
2,87	1,4	1555	225	2393	32	0,250	0,102

С целью определения влияния армирования на уровень вязкоупругих свойств исследуемых материалов и их составляющих при температурах 20 и 200 °С с частотой 1 Гц были проведены сравнительные динамические механические испытания по схеме трехточечного циклического изгиба образцов пятислойных композитов на основе ПЭЭК без базальтовых прослоек (АМГ3–ПЭЭК–АМГ3–ПЭЭК/АМГ3), композитов, армированных базальтовым волокном (АМГ3–ПЭЭК/базальт–АМГ3–ПЭЭК/базальт–АМГ3), а также исходного ненаполненного ПЭЭК. Согласно представленным на рис. 6 зависимостям показателей демпфирования от величины приложенного напряжения при 20 °С, наибольшее различие между значениями E' и E'' наблюдается при нагрузках, превышающих $2-4 \times 10^2$ Н, а между значениями $tg\delta$ – выше 6×10^2 Н.

Как можно видеть из приведенных зависимостей, при температуре испытания 20 °С показатель, характеризующий внутреннее трение материала (тангенс угла механических потерь $tg\delta$), достигает наибольших значений в чистом, ненаполненном ПЭЭК, а наименьших – в композите с ненаполненным базальтовым волокном ПЭЭК (рис. 6 в). Промежуточное положение занимает кривая для слоистого композита с армированным базальтовым волокном (40 об.%) ПЭЭК. Подобное расположение кривых для исследуемых материалов наблюдается для зависимостей модуля упругости и модуля вязкости от приложенной нагрузки (рис. 6 а, б). Установленная закономерность свидетельствует о том, что упрочнение полимера базальтовым волокном не только не способствовало снижению демпфирующих свойств слоистого металлополимерного композита, но и, наоборот, обеспечила их прирост при комнатной температуре, что, вероятно, связано с формированием пористой структуры армированного полимерного слоя ПЭЭК/базальт.

При температуре ДМА 200 °С отмечается обратная тенденция (рис. 7): снижение значений тангенса механических потерь и модуля вязкости слоистого композита с чистым, ненаполненным ПЭЭК относительно данных показателей слоистого композита с армированным ПЭЭК. При этом модуль упругости гибридного композита по-прежнему превосходит модуль упругости слоистого композита на основе чистого, ненаполненного ПЭЭК.

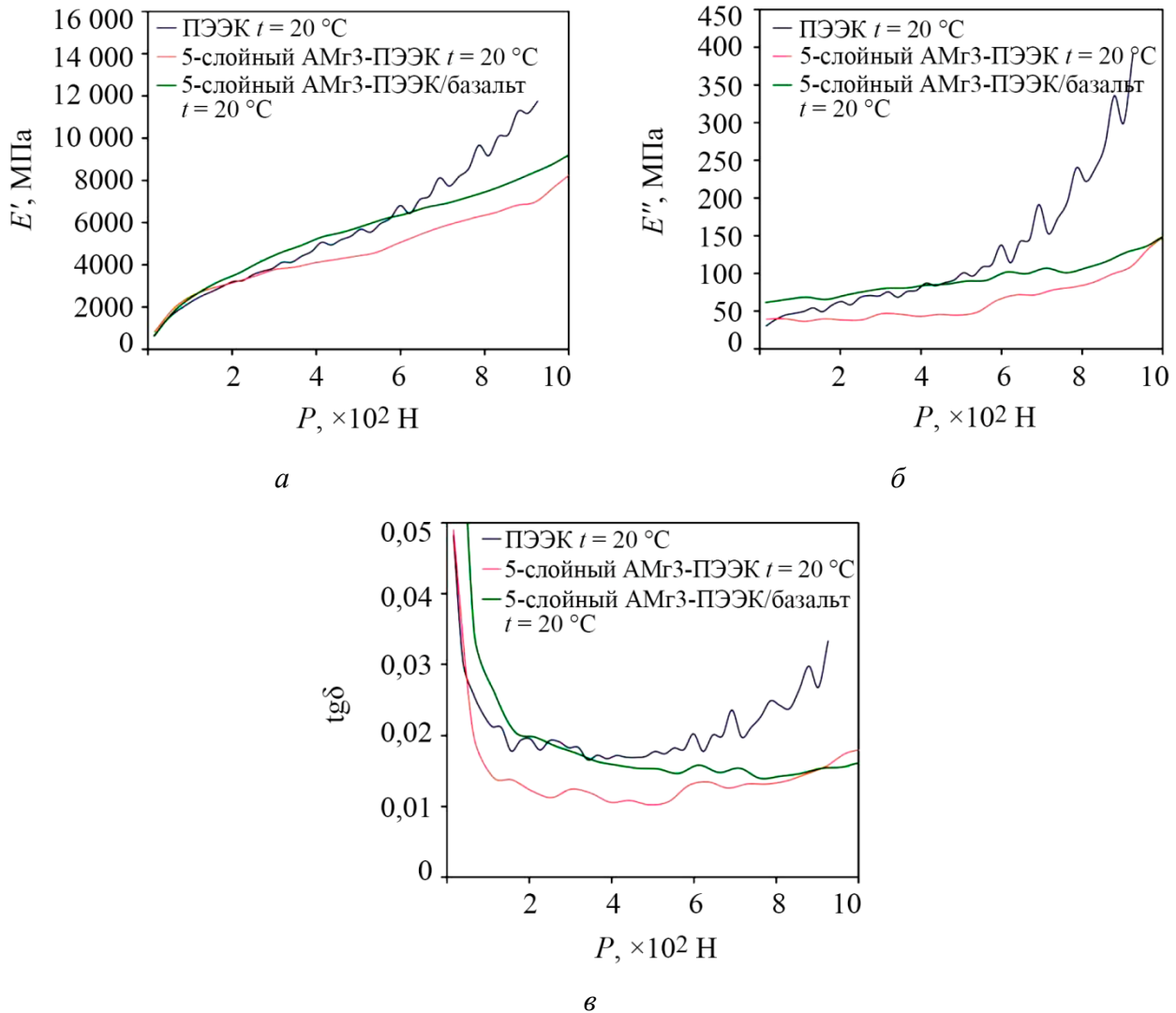


Рис. 6. Графики зависимости модуля упругости E' (а), модуля вязкости E'' (б) и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (в) от нагрузки для композитов на основе наполненного и ненаполненного ПЭЭК при температуре 20 °С

При испытании композитов на ударный изгиб разрушение протекает по адгезионному, когезионному и смешанному механизмам (рис. 8). Адгезионное разрушение происходит по границе раздела металлического слоя и адгезива. Когезионное разрушение происходит по полимерному слою путем развития сети трещин по границе раздела базальтового волокна и матрицы. Адгезионное взаимодействие на границе раздела между волокном и ПЭЭК относительно слабое по причине разной полярности и отсутствия реактивных функциональных групп на ПЭЭК, а также гладкой поверхности волокна.

Анализ СЭМ-изображений поверхности разрушения ударных образцов показал, что под действием динамического нагружения когезионное разрушение по полимерному слою происходит не только за счет внутреннего расслоения вдоль границы раздела волокон и полимерной матрицы, но и за счет растрескивания базальтовых волокон (рис. 8 б, в). При разрушении и отслаивании волокон происходит зарождение новых микротрещин, развитие которых ускоряет формирование магистральной трещины, ведущей к тотальному разрушению композита.

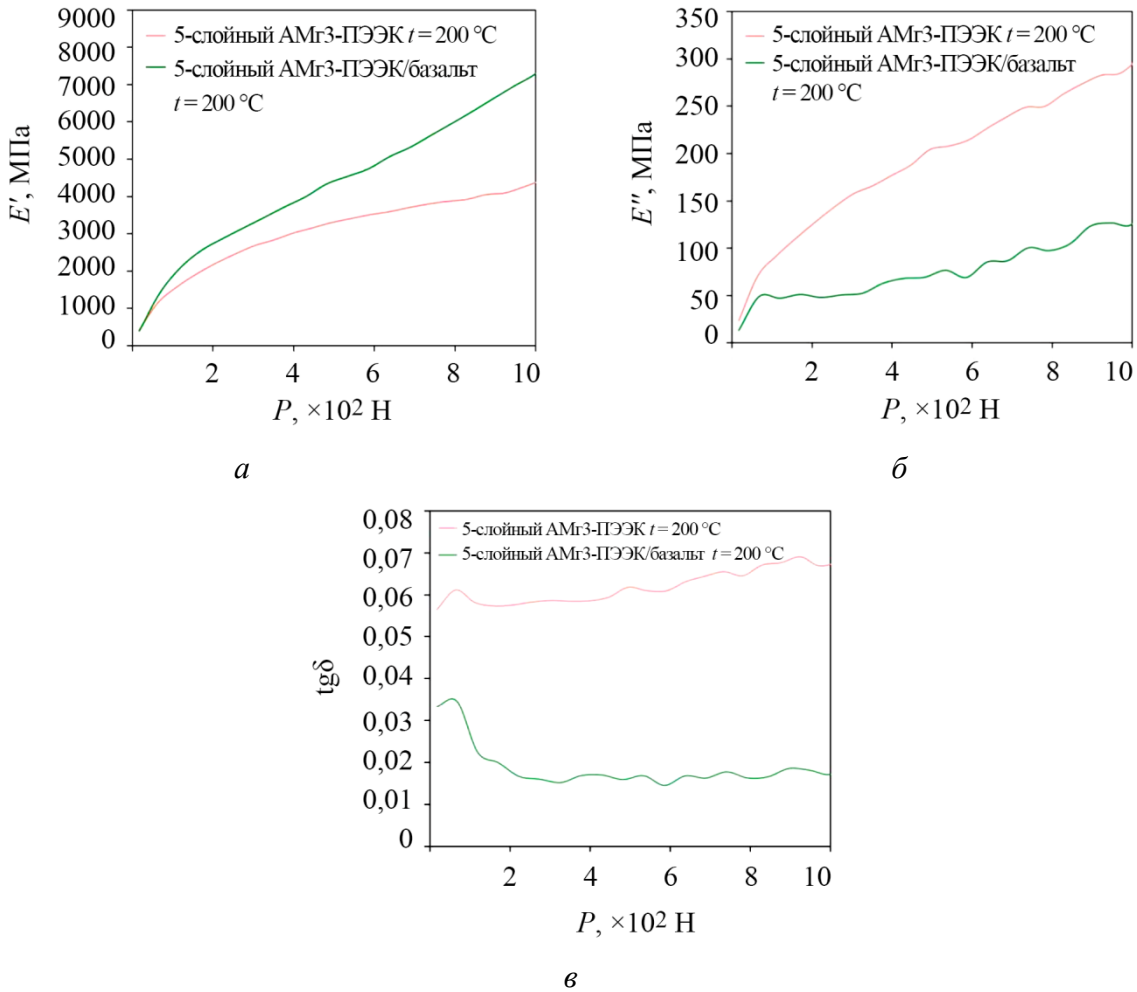


Рис. 7. Графики зависимости модуля упругости E' (а), модуля вязкости E'' (б), тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (в) от приложенной нагрузки для композитов на основе наполненного и ненаполненного ПЭЭК при температуре 200 °С

Результаты изучения строения поверхности изломов ударных образцов и боковой поверхности испытанных на циклический изгиб образцов композитов на макроуровне (с использованием оптической микроскопии) и микроуровне (с применением растровой электронной микроскопии) позволили выявить стадийность роста трещины в гибридных слоистых материалах типа «металл – армированный полимер» под действием динамических и циклических нагрузок в рамках известной модели Кука – Гордона [27]. Установлено, что под действием ударной нагрузки перпендикулярно поверхности раздела слоев разрушение гибридного слоистого композита протекает по композитному типу. Развитие трещины начинается с зарождением магистральной трещины на поверхности композита и последующим ее движением во внешнем металлическом слое до момента столкновения ее с межслойной границей сопряжения двух разнородных материалов (I стадия). Далее имеют место торможение трещины, резкая смена траектории ее движения на 90° и развитие трещины вдоль межслойной границы в виде расслоения (II стадия). Затем происходит развитие сети трещин внутри армированных полимерных слоев, вызванное внутренним расслоением вдоль границы раздела волокон и полимерной матрицы и растрескиванием базальтовых волокон (III стадия). Следующей стадией будет разрушение наполненного полимерного слоя путем его разрыва (IV стадия).

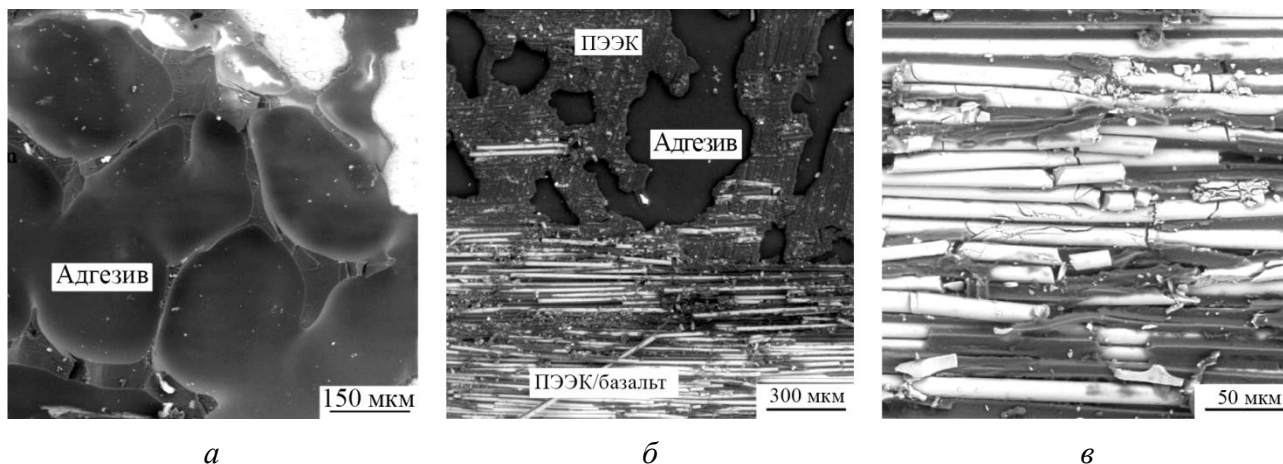


Рис. 8. СЭМ-изображения поверхности разрушения ударных образцов композита III, испытанного при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Последовательность развития трещины представляет чередующиеся акты «разрушение металлического слоя» (I стадия), «расслоение на межслойной границе» (II стадия), «развитие сети трещин внутри армированных полимерных слоев» (III стадия), «разрушение полимерного слоя» (IV стадия). При этом процесс последовательного роста магистральной трещины через все слои гибридного слоистого композита обычно приостанавливается после разрушения первых двух слоев композита по причине ее торможения на межслойной границе и диссипации энергии удара полимерной составляющей композита. Дальнейшее разрушение представляет собой только чередующиеся акты «расслоение на границе» (II стадия) и «развитие сети трещин внутри армированных полимерных слоев» (III стадия) без разрыва слоев. При циклическом нагружении композита по схеме трехточечного изгиба активное разрушение композита происходит преимущественно на II и III стадиях (рис. 5) без разрыва слоев за счет более низкой скорости нагружения и отсутствия у образцов острого концентратора напряжения в виде V-образного надреза.

4. Заключение

Методом горячего прессования получены 4 типа конструкции и определен комплекс механических характеристик неразъемных соединений металлополимерных композитов со слоями из стали 09Г2С, алюминиевого сплава АМг3 и армированного базальтовыми волокнами термопластичного полимера ПЭЭК с объемной долей полимерных слоев 40–43 % и удельным весом $2,36\text{--}5,32\text{ г/см}^3$.

Установлено, что наибольшие из зафиксированных значений ударной вязкости $KCV \geq 0,47\text{--}0,55\text{ МДж/м}^2$ характерны для металлополимерных композитов с двумя внешними и одним центральным стальным слоем, а наименьшие – для композитов с тремя алюминиевыми слоями. Выявлено аномальное повышение значений ударной вязкости изученных композитов с понижением температур испытаний от $+200$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, связанное с усилением характерного для слоистых материалов эффекта «вязкости расслоения».

По результатам испытаний по схеме трехточечного циклического изгиба было установлено, что изученные композиты обладают повышенным сопротивлением усталостному разрушению при нагружении в области малых пластических деформаций. Наибольшее число циклов до разрушения, 96 730, выдержал композит на основе стальных слоев, а наименьшее число циклов, 10 400, – композит на основе алюминиевых слоев. При этом катастрофического разрушения слоистых композитов, под которым понимается развитие трещины через все слои перпендикулярно их поверхности раздела и нарушение целостности композитов, не происходило.

Методом инструментированного микроиндентирования выявлены особенности механического поведения армированного базальтовыми волокнами ПЭЭК при упругопластическом деформировании. Установлено, что значения контактного модуля упругости и твердости ПЭЭК, упрочненного базальтовыми волокнами на 40 об.%, соответствуют 32 ГПа и $HV_{0,025}$ 225 и превосходят соответствующие показатели чистого, ненаполненного ПЭЭК в 1,6 и 2,0 раза.

Методом динамического механического анализа показано, что гибридные слоистые металлополимерные композиты обладают достаточно высоким уровнем демпфирующих свойств при температурах 20 °С, который повышается с ростом температуры до 200 °С. Армирование полимера ПЭЭК однонаправленными базальтовыми волокнами способствует повышению показателей демпфирования ($\text{tg}\delta$, E' и E'') металлополимерного композита, что связано с формированием пористой структуры армированного полимера в процессе его изготовления горячим прессованием.

Выявлены особенности и установлена стадийность процесса разрушения слоистых гибридных металлополимерных композитов со слоистой архитектурой, включающего стадии развития сети микротрещин внутри армированной полимерной прослойки, расслоение на межслойных границах и рост трещины через металлические и полимерные слои.

Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания ИМАШ УрО РАН № 124020600045-0 с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Авторы выражают благодарность к. т. н. П. В. Космачеву (ИФПМ СО РАН) и к. ф-м. н. А. М. Пацелову (ИФМ УрО РАН) за содействие в получении образцов слоистых металлополимерных композитов.

Литература

1. Matthews, F. and Rawlings, R. *Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya* [Composite Materials. Mechanics and Technology]. Tekhnosfera Publ., Moscow, 2004, 408 p. (In Russian).
2. Chawla, K.K. *Composite Materials: Science and Engineering*, 3rd ed., Springer, New York, London, 2012, 542 p.
3. Kablov, E.N. New generation materials and technologies for their digital processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, 90, 225–228. DOI: 10.1134/S1019331620020124.
4. Yakovlev, A.L., Nochovnaya, N.A., Putyrskiy, S.V., and Krokhina, V.A. Titanium-polymer laminated materials. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2016, S2 (44), 56–62. (In Russian).
5. Naik, R.K., Das, A.K., Mahale, P.R., Panda, S.K., and Racherla, V. Design optimization of high interface strength metal-polymer-metal sandwich panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 171, 107544. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107544.
6. Maleki, P., Shahzamanian, M., Basirun, W.J., Wu, P., and Akbarzadeh, A. Investigation on the bending properties and geometric defects of steel/polymer/steel sheets – three-point and hat-shaped bending. *Metals*, 14 (8), 935. DOI: 10.3390/met14080935.
7. Goncharov, V.A., Timoshkov, P.N., and Usacheva, M.N. Prospects of the production of large-sized aircraft parts from polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, 12 (106). (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-55-62.
8. Delmonte, J. *Metal/Polymer Composites*, Springer, New York, 2012, 264 p.
9. Antipov, V.V., Senatorova, O.G., Tkachenko, E.A., and Vakhromov, P.O. Aluminium wrought alloys. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2012, S, 226–230. (In Russian).
10. Reyes-Villanueva, G. and Cantwell, W.J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 2004, 64 (1), 35–54. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00197-0.
11. Polmear, I. *Legkie splavy: ot traditsionnykh do nanokristallov* [Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals]. Tekhnosfera Publ., Moscow, 2008, 464 p. (In Russian).

12. Kablov, E.N., Antipov, V.V., and Senatorova, O.G. Aluminium fiberglass SIAL-1441 laminates and cooperation with Airbus and Tu Delft. *Tsvetnye Metally*, 2013, 9, 50–53. (In Russian).
13. Antipov, V.V., Serebrennikova, N.Yu., Shestov, V.V., and Sidelnikov, V.V. Laminated hybrid materials on basis of Al–Li alloy sheets. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2017, S, 212–224. (In Russian).
14. Bazhenov, S.L. *Mekhanika i tehnologiya kompozitsionnykh materialov* [Mechanics and Technology of Composite Materials]. Intellekt Publ., Dolgoprudnyi, 2014, 328 p. (In Russian).
15. Dushin, M.I., Khrulkov, A.V., Mukhametov, R.R., and Chursova, L.V. Characteristic features of manufacturing PC products by the pressure infiltration method. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2012, 1 (22), 18–26. (In Russian).
16. Veshkin, E.A. Postnov, V.I., Postnova, M.V., and Barannikov, A.A. Experience of application of vacuum-infusion technologies in manufacturing structures from PKM. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2018, 20, 4 (3), 344–350. (In Russian).
17. Kazemi, M.E., Shanmugam, L., Yang, L., and Yang, J. A review on the hybrid titanium composite laminates (HTCLs) with focuses on surface treatments, fabrications, and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 128, 105679. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105679.
18. Alshgari, R.A., Prasad, M.S.C., Srivastava, B.K., Al Ansari, M.S., Gupta, P., Sivakumar, A., Wabaidur, S.M., Islam, M.A., and Diriba, A. Mechanical evaluation on carbon/basalt fiber-reinforced hybrid polymer matrix composite. *Advances in Polymer Technology*, 2022, 2022, 7742349. DOI: 10.1155/2022/7742349.
19. Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., and Valenza, A. A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 74, 74–94. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.034.
20. De Paiva, J.M.F., Dos Santos, A.D.N., and Rezende, M.C. Mechanical and morphological characterizations of carbon fiber fabric reinforced epoxy composites used in aeronautical field. *Materials Research*, 2009, 12 (3), 367–374.
21. Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Park, S.-J., and Hui, D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 73, 166–180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.
22. Zhelezina, G.F., Kolobkov, A.S., Kulagina, G.S., and Kan, A.Ch. Damping properties of hybrid layered metal-polymer materials based on aluminum, titanium alloys and organoplastics layers. *Trudy VIAM*, 2021, 2 (96), 10–19. DOI:10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19. (In Russian).
23. Babaytsev, A.V., Lopatin, S.S., and Nasonov, F.A. Study of dynamic characteristics of hybrid titanium-polymer composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, 20 (1), 109–115. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-109-115.
24. Gladkovsky, S.V., Nedzvetsky, P.D., Vichuzhanin, D.I., Kuteneva, S.V., and Lepikhin, S.V. Brittle fracture resistance and damping properties of a steel-rubber metal-polymer composite. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, 2, 6–18. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.006-018. Available at: http://dream-journal.org/issues/2020-2/2020-2_289.html
25. Kimura, Y., Inoue, T., Yin, F., and Tsuzaki, K. Delamination toughening of ultrafine grain structure steels processed through tempforming at elevated temperatures. *ISIJ International*, 2010, 50 (1), 152–161. DOI: 10.2355/isijinternational.50.152.
26. Kuteneva, S.V., Gladkovsky, S.V., Vichuzhanin, D.I., and Nedzvetsky, P.D. Brittle fracture resistance and damping properties of layered metal-polymer composites. *Letters on Materials*, 2021, 11 (3) 279–284. (In Russian). DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-279-284.
27. Parton, V.Z. *Mekhanika razrusheniia. Ot teorii k praktike* [Mechanics of Destruction. From Theory to Practice]. Nauka Publ., Moscow, 1990, 240 p.