

Научная статья  
УДК 539.422.52  
DOI: [10.34759/trd-2022-126-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-04)

## РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПОДКРЕПЛЁННОЙ ПАНЕЛИ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ УДАРЕ

Михаил Иванович Мартиросов<sup>1</sup>, Антон Васильевич Хомченко<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup>Корпорация «Иркут», Москва, Россия

<sup>2</sup>[khomchenkoanton@yandex.ru](mailto:khomchenkoanton@yandex.ru)

**Аннотация.** Проведено численно-экспериментальное исследование поведения четырёхстрингерной плоской панели из полимерного композиционного материала (ПКМ) при низкоскоростном ударном воздействии.

Проведена валидация численного эксперимента по результатам натурных испытаний. Результаты валидации показали, что максимальная площадь расслоения в результате удара отличается не более, чем на 11%.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, углепластик, плоская четырёхстрингерная панель, ударное воздействие, численное исследование, эксперимент

**Для цитирования:** Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Расчётно-экспериментальное исследование поведения плоской подкреплённой панели из углепластика при ударе

// Труды МАИ. 2022. № 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-04)

Original article

# COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF A FLAT REINFORCED CARBON FIBER PANEL ON IMPACT

Michael I. Martirosov<sup>1</sup>, Anton V. Khomchenko<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup>Irkut Corporation, Moscow, Russia

<sup>2</sup>[khomchenkoanton@yandex.ru](mailto:khomchenkoanton@yandex.ru)✉

**Abstract:** Among the structural materials currently used in aviation technology (OT), polymer structural materials (PCM), for example, carbon fiber plastics, which have certain advantages over traditional metal materials for structural purposes, have become widespread. Among such advantages are relatively low density, high specific strength and rigidity, high wear resistance, fatigue resistance, low coefficient of thermal expansion, resistance to chemical aggressive media, damping ability. Speaking about the disadvantages of PCM, it should be noted that during the production and operation of structural elements made of such materials, defects of various types may occur, which have a serious impact on the residual strength. The level of safety of an AT created on the basis of new materials and new technologies should not be lower than the level of safety of an existing AT made of traditional structural materials (and according to traditional technologies). It is important to note that the purpose of developing new PCM is to combine various components to create materials with new specified characteristics that differ from the characteristics of the original components.

In the works [1]-[4], the behavior of structural elements made of PCM in the presence of multiple defects such as bundles of arbitrary shape, size and location under the action of non-stationary loads of various nature was previously considered.

The paper presents a numerical and experimental study of the behavior of a four-stringer flat panel made of a polymer composite material under low-speed impact.

Validation of the numerical experiment based on the results of field tests was carried out. The validation results showed that the maximum stratification area as a result of the impact differs by no more than 11%.

**Keywords:** polymer composite materials, carbon fiber, flat four-stringer panel, impact, numerical study, experiment

**For citation:** Martirosov M.I., Khomchenko A.V. Computational and experimental study of the behavior of a flat reinforced carbon fiber panel on impact. *Trudy MAI*, 2020, no. 126.

DOI: [10.34759/trd-2022-126-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-04)

## 1. Введение

Среди конструкционных материалов, используемых в настоящее время в авиационной технике (АТ), большое распространение приобрели полимерные конструкционные материалы (ПКМ), например, углепластики, которые обладают определёнными преимуществами по сравнению с традиционными металлическими материалами конструкционного назначения. Среди таких преимуществ можно отметить сравнительно малую плотность, высокую удельную прочность и жёсткость, высокую износостойкость, сопротивление усталости, малый коэффициент

температурного расширения, стойкость к химическим агрессивным средам, демпфирующую способность.

Говоря о недостатках ПКМ следует отметить, что при производстве и эксплуатации элементов конструкций из таких материалов могут возникать дефекты различного характера, которые оказывают серьёзное влияние на остаточную прочность. Уровень безопасности АТ, созданной на основе новых материалов и новых технологий, должен быть не ниже уровня безопасности существующей АТ, изготовленной из традиционных конструкционных материалов (и по традиционным технологиям). Важно отметить, что целью разработки новых ПКМ является объединение различных компонентов для создания материалов с новыми заданными характеристиками, отличными от характеристик исходных компонентов.

Новые ПКМ применяются поэтапно. Сначала их используют для производства слабонагруженных элементов конструкций, а уже затем по результатам опыта эксплуатации принимается решение об использовании этих материалов в более нагруженных элементах, в том числе и основных силовых элементах (ОСЭ). Так поступают, например, на фирме BOEING (США) и других известных авиастроительных фирмах.

Особенностями применения ПКМ при разработке современной АТ являются:

- отсутствие надёжных численных и аналитических методов расчёта;
- отсутствие достаточного опыта использования ПКМ для изготовления элементов конструкций, относящихся к ОСЭ (прежде всего по инфузионной технологии);

- существенно большее, чем для металлических конструкционных материалов, рассеяние характеристик ПКМ и их зависимость от условий эксплуатации;
- большое число форм разрушения;
- чувствительность элементов конструкций из ПКМ к нагрузкам из плоскости, механическим ударам, технологическим отклонениям и др.;
- изменение механических характеристик ПКМ под воздействием климатических факторов (влаги и температуры), при старении и при воздействии авиационного топлива, авиационного масла и технологических жидкостей.

В работах [1]-[4] ранее рассматривалось поведение элементов конструкций из ПКМ при наличии множественных дефектов типа расслоений произвольной формы, размеров и расположения при действии нестационарных нагрузок различного характера.

В настоящей работе рассматривается поведение четырёхстрингерной панели из углепластика при низкоскоростном ударном воздействии.

## **2. Постановка задачи**

Объектом исследования является однопролётная четырёхстрингерная плоская панель (рис. 1), шириной  $a = 515$  мм, длиной  $b = 500$  мм, выполненная из углепластика PRISM EP2400/TX1100 IMS65-24K-UD196-6.35 на основе углеленты и эпоксидного связующего. В качестве граничных условий используется шарнирное опирание вдоль кромок панели.

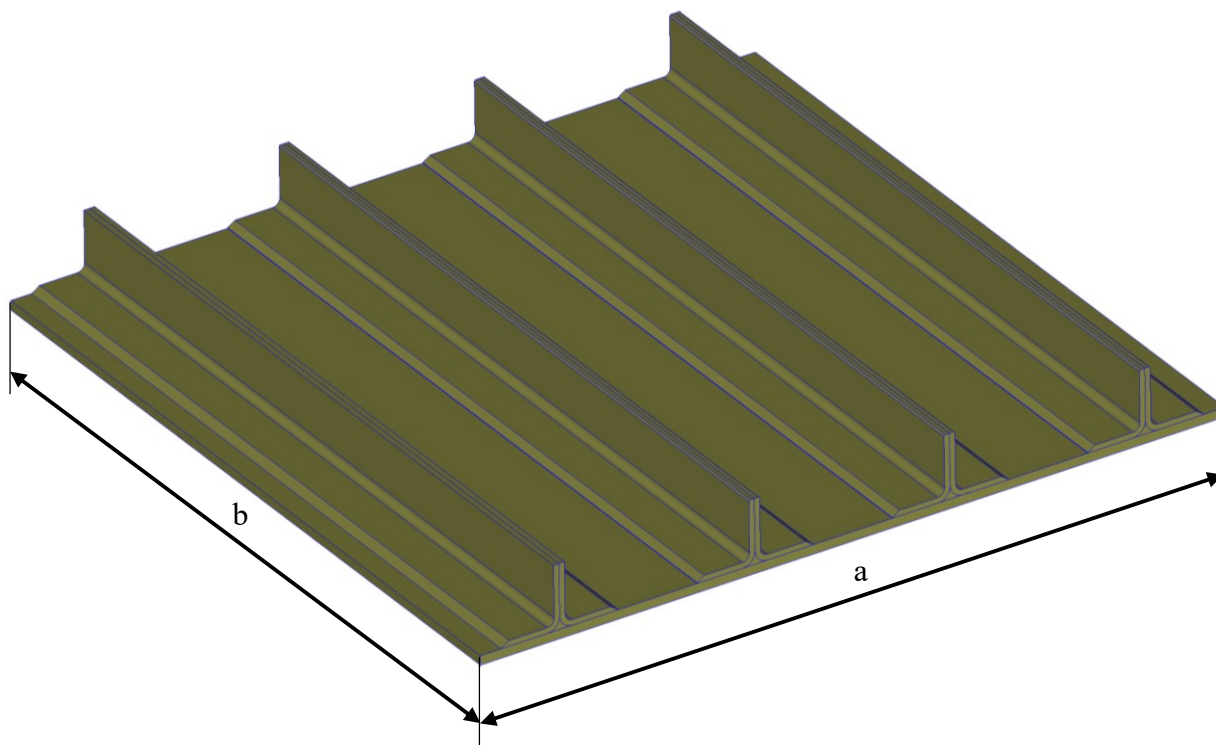


Рис. 1 – Четырёхстрингерная панель из углепластика

Физико-механические характеристики монослоёв ПКМ панели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики материала монослоёв

Величина	Название материала
	PRISM EP2400/TX1100 IMS65-24K-UD196-6.35 на основе углеренты и эпоксидного связующего
$E_1$ , модуль упругости в продольном направлении (ГПа)	135
$E_2$ , модуль упругости в поперечном направлении (ГПа)	7.4
$G_{12}$ , модуль упругости при сдвиге в плоскости листа (ГПа)	3.9
$\mu$ , коэффициент Пуассона	0.32
$\rho$ , плотность ( $т/мм^3$ )	$1.5 \cdot 10^{-9}$
$X_t$ , предел прочности в продольном направлении при растяжении (МПа)	2849
$X_c$ , предел прочности в продольном направлении при сжатии (МПа)	1185

Величина	Название материала
$Y_t$ , предел прочности в поперечном направлении при растяжении (МПа)	50
$Y_c$ , предел прочности в поперечном направлении при сжатии (МПа)	270
$S_{12}$ , предел прочности при сдвиге в плоскости листа (МПа)	96
$G_{1C}$ – энергия разрушения при нормальном отрыве, $G_{2C}$ – энергия разрушения при плоском сдвиге (Дж/мм <sup>2</sup> )	0.26/0.5
$h$ , толщина монослоя (мм)	0.19

Приведённые механические характеристики соответствуют режиму испытаний RTD (Root Temperature Dry) – испытания композитов при комнатной температуре +23°C и влажности в состоянии поставки (состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, содержание влаги в них не превышает 10% от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85%). Данные получены от производителя ПКМ.

## 2.1 Экспериментальные исследования

Целью исследования является апробация (валидация) ранее разработанной методики оценки прочности элементов конструкций из слоистых композитов при наличии межслоевых дефектов типа расслоений.

В центр панели с внешней стороны обшивки наносится ударное повреждение с помощью испытательного копера с вертикально падающим грузом Dynatur 9250HV фирмы INSTRON (Великобритания) с энергией 136 Дж (рис. 2).



Рис. 2 – Испытательный копёр Dynatur 9250HV фирмы INSTRON

В состав испытательного оборудования входит программное обеспечение и электроника Impulse со следующими возможностями [5]:

- задание параметров испытаний и управление с компьютера;
- высокоскоростная обработка сигналов;
- измерение энергии, силы контакта, скорости в процессе взаимодействия;
- 32-битное программное обеспечение;
- исключение повторных ударов из-за наличия автоматического пневмоулавливателя груза при отскоке и др.



Удар наносится стальным бойком с полусферическим наконечником. Диаметр бойка  $D = 25.4$  мм, масса  $m = 5.5$  кг, скорость нанесения повреждения  $V = 7$  м/с [6]-[8].

Формат укладки обшивки следующий:  $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{\text{sym}}$ , формат укладки стенки стрингера:  $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{\text{sym}}$ . Толщина монослоя  $h = 0.19$  мм. Высота полки стрингера  $h_{\text{стр.}} = 43.8$  мм, ширина полки  $b_{\text{стр.}} = 80$  мм (рис. 3).

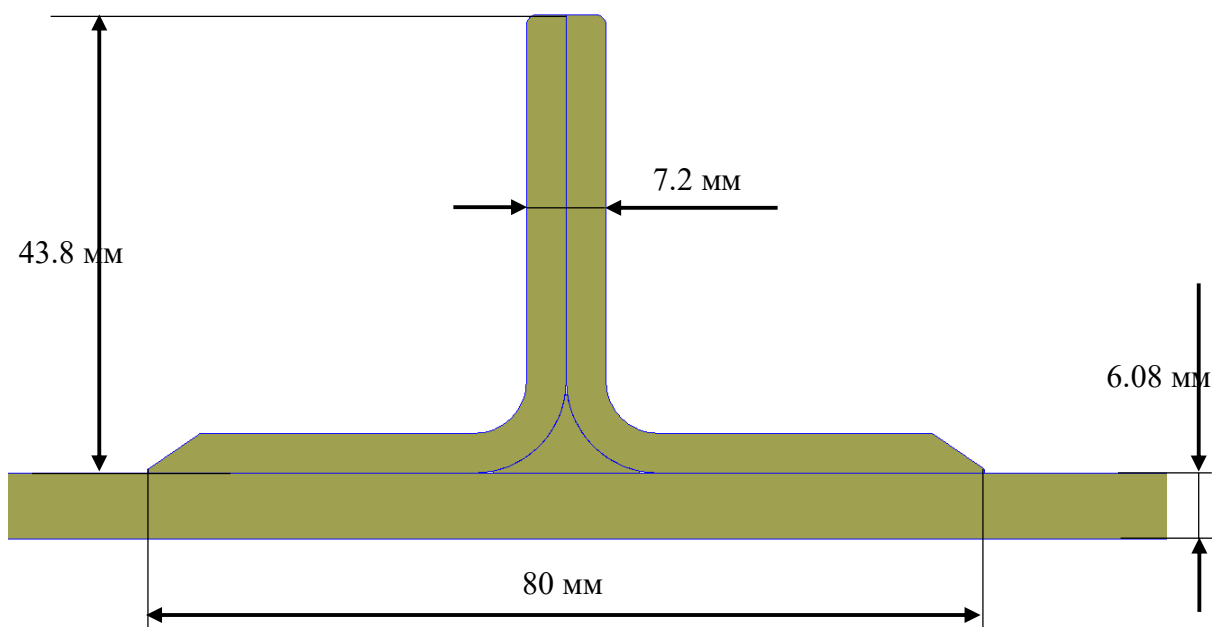


Рис. 3 – Параметры сечения стрингера

## 2.2 Методика численного исследования

Численное моделирование проводится в программном комплексе LS-DYNA.

Каждый монослой моделируется отдельно с помощью конечных элементов (КЭ) типа «tshell» (рис. 4).

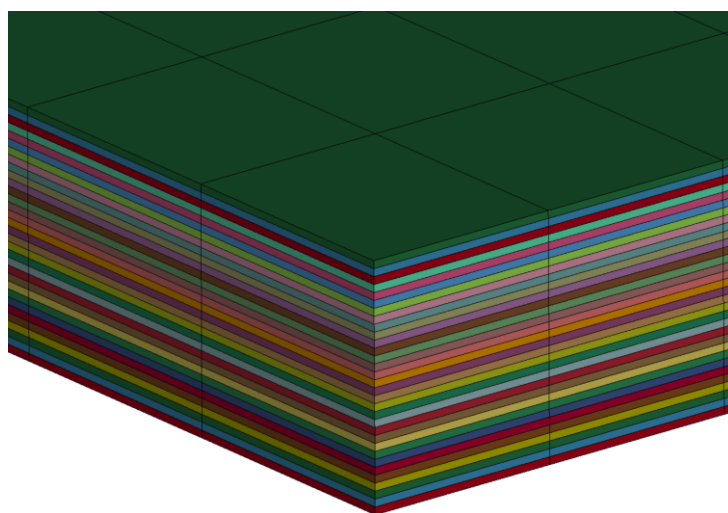


Рис. 4 – Послойная конечно-элементная модель (КЭМ) обшивки панели  
 На рис. 5 показана КЭМ четырёхстрингерной плоской панели.

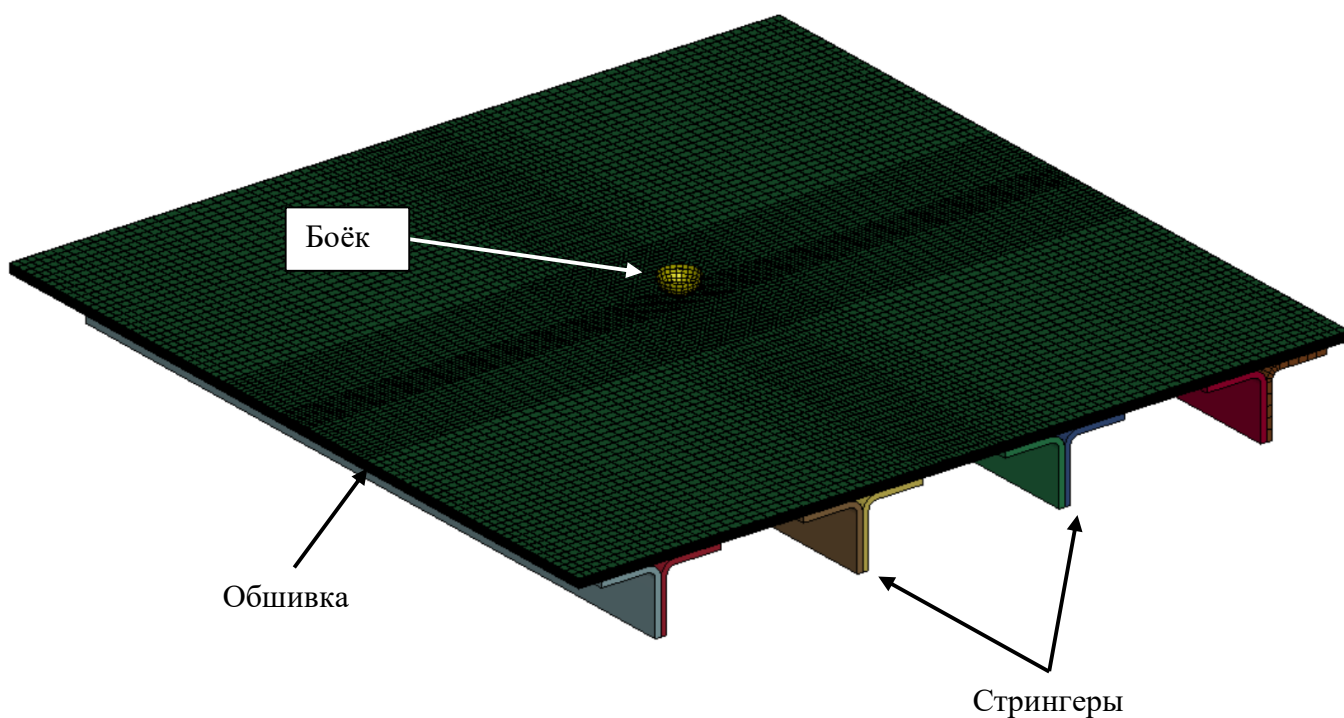


Рис. 5 – Послойная конечно-элементная модель (КЭМ) обшивки панели  
 Всего в модели 605233 КЭ.

Для моделирования межслоевого взаимодействия в LS-DYNA используются когезионные элементы (cohesive) нулевой толщины, которые расположены между элементами монослоёв [9]-[14]. Модель реализует билинейное описание поведения

материала с использованием смешанного квадратичного критерия расслоения.

Относительное перемещение интерфейса задаётся следующим образом:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2}, \quad (1)$$

$$\delta_{II} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}, \quad (2)$$

где  $\delta_I = \delta_3$  – перемещения в нормальном направлении,  $\delta_{II} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}$  – перемещения в касательном направлении.

Критерий начала деградации клеевого контакта по перемещениям имеет следующий вид:

$$\delta^0 = \delta_I^0 \delta_{II}^0 \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{(\delta_{II}^0)^2 + (\beta \delta_I^0)^2}}, \quad (3)$$

где  $\beta = \frac{\delta_{II}}{\delta_I}$ ,  $\delta_I^0 = \frac{T}{EN}$ ,  $\delta_{II}^0 = \frac{S}{ET}$ ,  $T$  – максимальные напряжения в нормальном направлении,  $S$  – максимальные напряжения в касательном направлении,  $EN$  – жёсткость материала в нормальном направлении,  $ET$  – жёсткость материала в касательном направлении.

Критерий полного разрушения имеет следующий вид:

$$\delta^F = \frac{2(1 + \beta^2)}{\delta^0} \left[ \left( \frac{EN}{G_{1C}} \right)^n + \left( \frac{ET \cdot \beta^2}{G_{2C}} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

где  $G_{1C}$  – энергия разрушения при нормальном отрыве,  $G_{2C}$  – энергия разрушения при плоском сдвиге,  $n$  – степень уравнения ( $n = 2$ );  $G_{1C}$  и  $G_{2C}$  – являются характеристиками материала и получены экспериментально производителем ПКМ.

### 3. Результаты численно-экспериментального исследования

На рис. 6 показано изменение результирующей контактной силы между бойком и панелью при ударном взаимодействии с энергией удара 136 Дж, полученной в результате численного исследования [15]-[20].

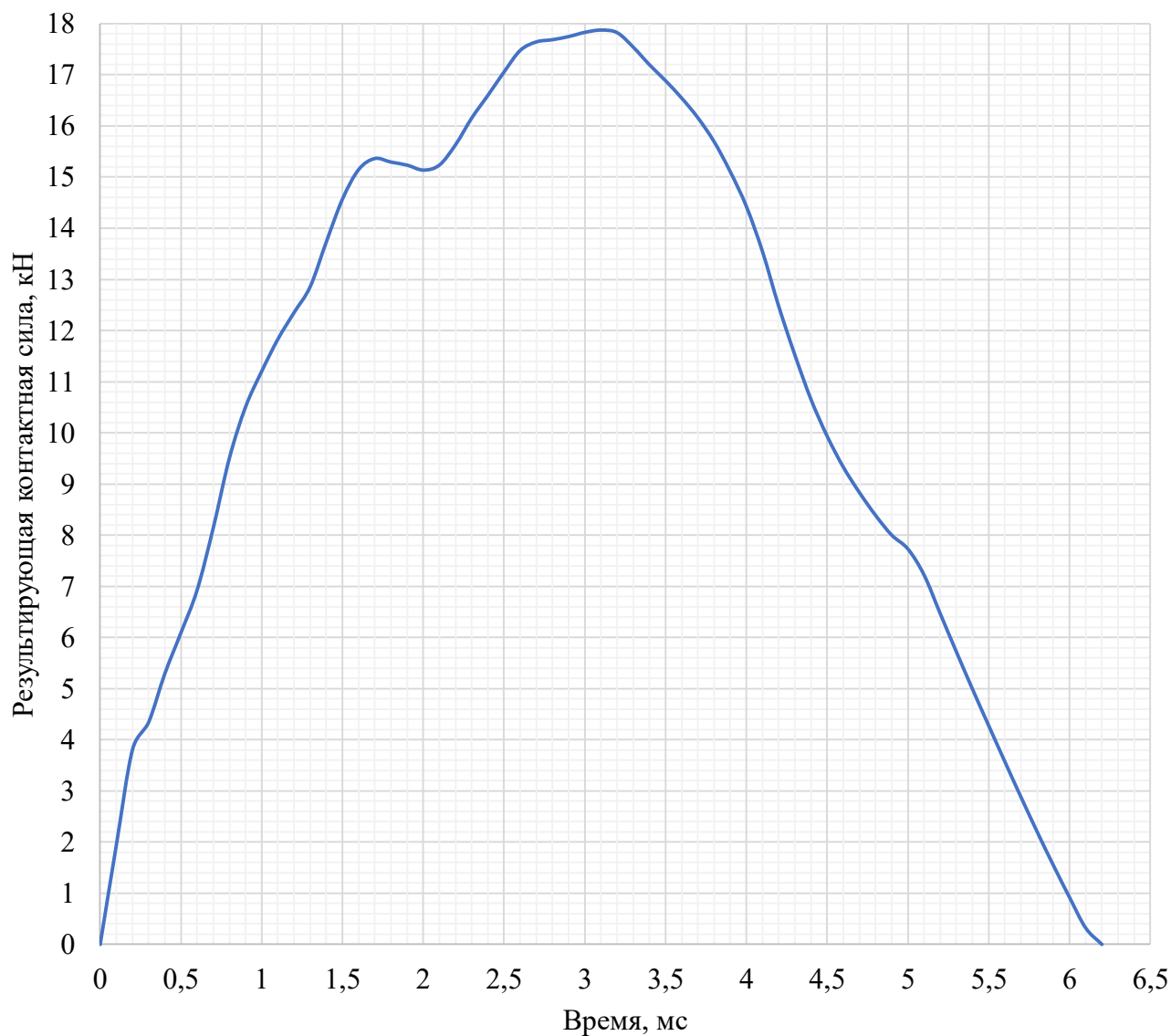


Рис. 6 – Изменение результирующей контактной силы при ударном взаимодействии

На рис. 7 показано изменение максимальной площади расслоения в обшивке панели в процессе соударения.

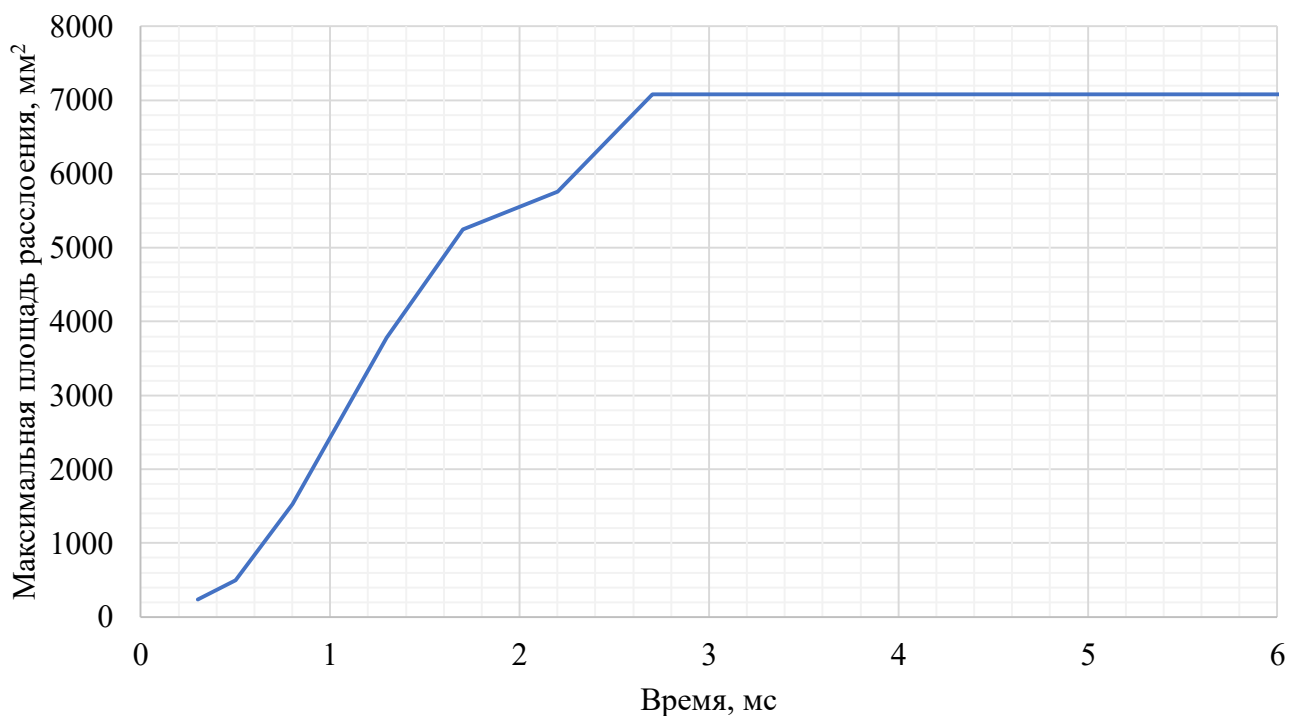


Рис. 7 – Изменение максимальной площади расслоения при ударе

На рис. 8 показаны результаты ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) панели после испытаний на удар (максимальное расслоение по толщине обшивки). Из рисунка следует, что зона расслоения имеет размеры 90x70 мм (площадь расслоения  $\approx 6300$  мм<sup>2</sup>). На рис. 9 показаны результаты численного моделирования удара по четырёхстрингерной панели. Из рисунка следует, что зона расслоения имеет размеры 97x73 мм (площадь расслоения  $\approx 7081$  мм<sup>2</sup>). Относительная разница между результатами эксперименты и результатами моделирования составляет 11%. Аналогичные расчётно-экспериментальные исследования были проведены для случая нанесения ударного повреждения в межстрингерную зону с энергией удара 90 Дж и для случая удара в ось стрингера с энергией 135 Дж. Относительная разница зон расслоений не превышает 10%.

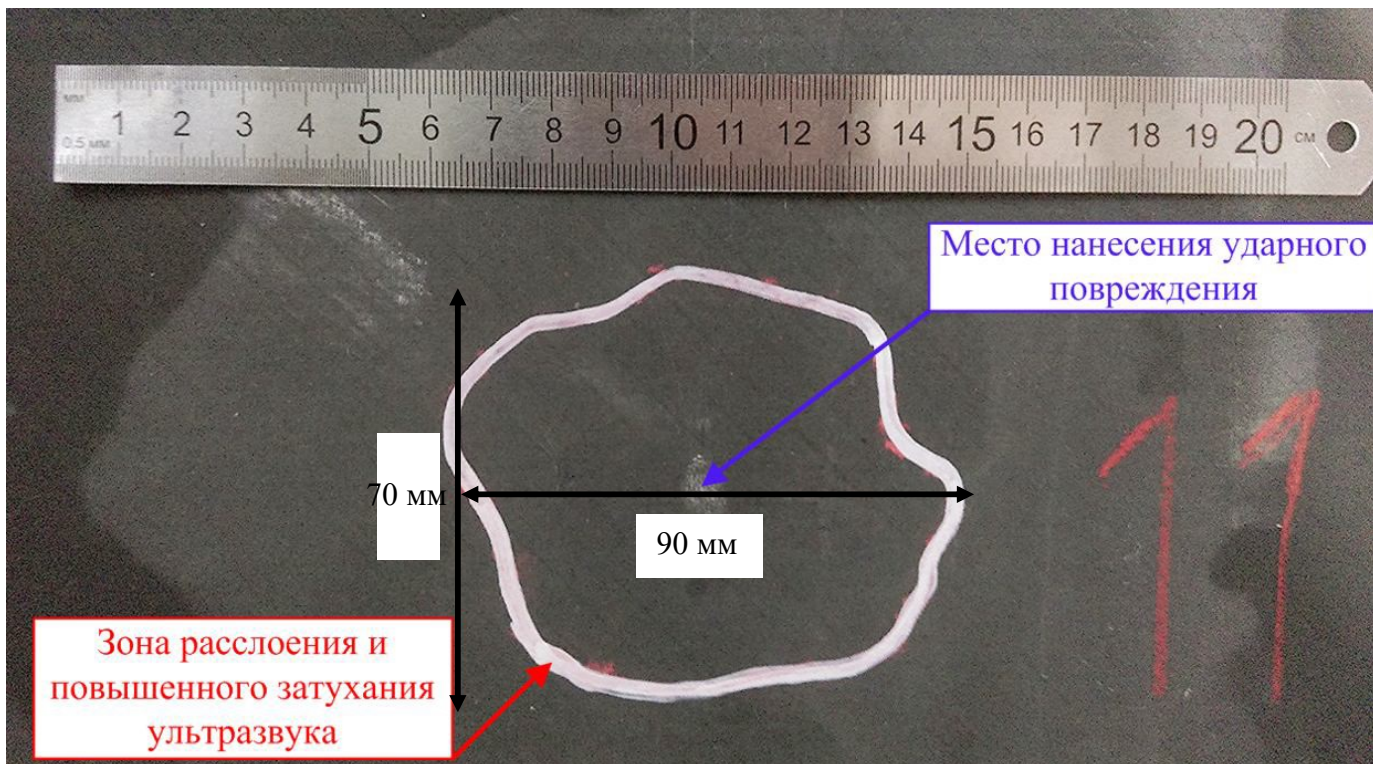


Рис. 8 – Результаты УЗК после испытаний на удар

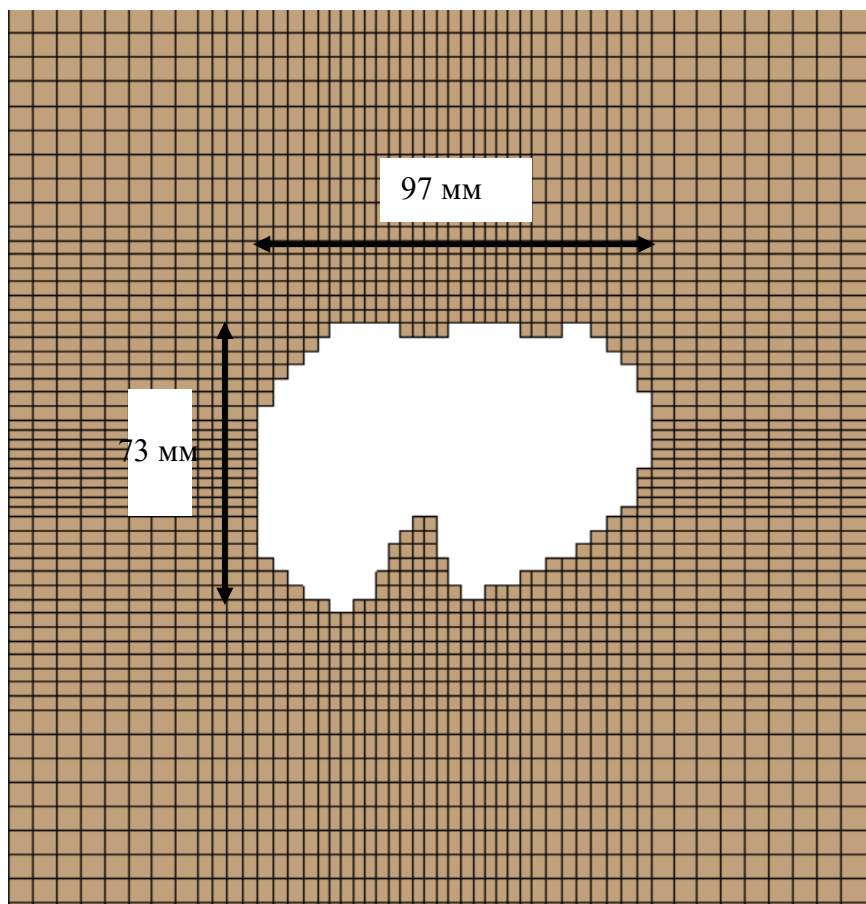


Рис. 9 – Максимальная зона расслоения между слоями №26-27

## **Заключение**

В рамках выполненных исследований получены результаты численного моделирования ударного взаимодействия при низкоскоростном ударе стальным бойком энергией удара 136 Дж по обшивке панели в межстрингерной зоне. Проведено сравнение результатов формы и размеров максимальной зоны расслоения в панели по результатам экспериментального и численного исследований. Показано, что относительная разница площади расслоения составляет 11%.

## **Список источников**

1. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Assessment of the strength of a composite package with internal defects according to various failures criteria under the influence of unsteady load // Periodico Tche Quimica, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 1218-1230.
2. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Behavior of a cylindrical reinforced carbon fiber shell under impact load // TEM Journal, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 1597-1604.
3. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Поведение полой композитной четырёхстрингерной панели с внутренними повреждениями при нестационарном воздействии // Учёные записки ЦАГИ. 2020. Т. LI. № 2. С. 47-56.
4. Мартиросов М.И., Медведский А.Л., Хомченко А.В. Поведение слоистых элементов конструкций из полимерного композита с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях // Механика композиционных материалов и

- конструкций. 2020. Т. 26. № 2. С. 259-268. DOI: [10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.259\\_268.08](https://doi.org/10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.259_268.08)
5. Голован В.И., Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В. Несущая способность панелей из композиционных материалов при наличии эксплуатационных повреждений // Труды МАИ. 2021. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112830>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-5)
6. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Динамические контактные задачи с подвижными границами. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 352 с.
7. Абросимов Н.А., Баженов В.Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 400 с.
8. Динамика удара. / Ред. С.С. Григорян. Разрушение композитных материалов при ударах с малыми скоростями. - М.: Мир, 1985. С. 8-46.
9. Ls-dyna. Keyword user's manual. Vol 2. Ii material models. R:14079. URL: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r-7.0-vol-ii>
10. De Borst R. Numerical aspects of cohesive zone models // Engineering Fracture Mechanics, 2003, vol. 70, pp. 1743–1757. DOI:[10.1016/S0013-7944\(03\)00122-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00122-X)
11. Yang Q.D., Cox B.N. Cohesive models for damage evaluation in laminated composites // International Journal of Fracture, 2005, vol. 133, pp. 107–137. DOI:[10.1007/s10704-005-4729-6](https://doi.org/10.1007/s10704-005-4729-6)
12. Chandra N., Scheider I., Ghomen K.H. Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces // International Journal of Solids and Structures, 2002, vol. 39 (11), p. 2827–2855. DOI:[10.1016/S0020-7683\(02\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00149-X)



13. Millán J.S., Armendáriz I. Delamination and Debonding Growth in Composite Structures // *Damage Growth in Aerospace Composites*, 2015, 63–88. DOI: [10.1007/978-3-319-04004-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04004-2_3)
14. Sahoo Sushree S., Panda Subrata K., Sen Deeprodyuti. Effect of delamination on static and dynamic behavior of laminated composite plate // *AIAA Journal*, 2016, vol. 54, no. 8, pp. 2530-2544. DOI: [10.2514/1.J054908](https://doi.org/10.2514/1.J054908)
15. Фирсанов Вал.В., Фам В.Т., Чан Н.Д. Анализ напряженно-деформированного состояния многослойных композитных сферических оболочек на основе уточненной теории // *Труды МАИ*. 2021. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118893>. DOI: [34759/trd-2020-114-07](https://doi.org/34759/trd-2020-114-07)
16. Локтева Н.А., Сердюк Д.О., Скопинцев П.Д., Федотенков Г.В. Нестационарное деформирование анизотропной круговой цилиндрической оболочки // *Труды МАИ*. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161423>. DOI: [34759/trd-2021-120-09](https://doi.org/34759/trd-2021-120-09)
17. Голдовский А.А., Фирсанов В.В. Алгоритмы исследования ударного взаимодействия элементов авиационных конструкций // *Труды МАИ*. 2021. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=115122>. DOI: [34759/trd-2020-111-6](https://doi.org/34759/trd-2020-111-6)
18. Семенов А.А., Карпов В.В. Математическая модель деформирования подкреплённых ортотропных оболочек вращения // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 13. С. 100-106.

19. Механика конструкций из композиционных материалов / Ред. В.Д. Протасова. Деформирование и начальное разрушение слоистых композитов при ударных нагрузках. - М.: Машиностроение, 1992. С. 38-61.

20. Елизаров С.В. Механика деформирования и разрушения слоистых композитов и некоторые новые области их применения. - СПб.: ПГУПС, 2000. - 242 с.

## References

1. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Assessment of the strength of a composite package with internal defects according to various failures criteria under the influence of unsteady load, *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 1218-1230.

2. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Behavior of a cylindrical reinforced carbon fiber shell under impact load, *TEM Journal*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 1597-1604.

3. Medvedskii A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2020, vol. LI, no. 2, pp. 47-56.

4. Martirosov M.I., Medvedskii A.L., Khomchenko A.V. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 259-268. DOI: [10.33113/mkmmk.ras.2020.26.02.259\\_268.08](https://doi.org/10.33113/mkmmk.ras.2020.26.02.259_268.08)

5. Golovan V.I., Dudar'kov Yu.I., Levchenko E.A., Limonin M.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 110. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112830>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-5)

6. Gorshkov A.G., Tarlakovskii D.V. *Dinamicheskie kontaktnye zadachi s podvizhnymi granitsami* (Dynamic contact problems with moving boundaries), Moscow, Nauka. Fizmatlit, 1995, 352 p.
7. Abrosimov N.A., Bazhenov V.G. *Nelineinye zadachi dinamiki kompozitnykh konstruktsii* (Nonlinear problems of dynamics of composite structures), Nizhnii Novgorod, Izd-vo NNGU, 2002, 400 p.
8. Grigoryan S.S. *Dinamika udara. Razrushenie kompozitnykh materialov pri udarakh s malymi skorostyami* (Fracture of composite materials in low-velocity impacts), Moscow, Mir, 1985, pp. 8-46.
9. *Ls-dyna. Keyword user's manual. Vol 2. Ii material models. R:14079.* URL: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r-7.0-vol-ii>
10. De Borst R. Numerical aspects of cohesive zone models, *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, vol. 70, pp. 1743–1757. DOI:[10.1016/S0013-7944\(03\)00122-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00122-X)
11. Yang Q.D., Cox B.N. Cohesive models for damage evaluation in laminated composites, *International Journal of Fracture*, 2005, vol. 133, pp. 107–137. DOI:[10.1007/s10704-005-4729-6](https://doi.org/10.1007/s10704-005-4729-6)
12. Chandra N., Scheider I., Ghomen K.H. Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces, *International Journal of Solids and Structures*, 2002, vol. 39 (11), p. 2827–2855. DOI:[10.1016/S0020-7683\(02\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00149-X)
13. Millán J.S., Armendáriz I. Delamination and Debonding Growth in Composite Structures, *Damage Growth in Aerospace Composites*, 2015, 63–88. DOI: [10.1007/978-3-319-04004-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04004-2_3)

14. Sahoo Sushree S., Panda Subrata K., Sen Deeprodyuti. Effect of delamination on static and dynamic behavior of laminated composite plate, *AIAA Journal*, 2016, vol. 54, no. 8, pp. 2530-2544. DOI: [10.2514/1.J054908](https://doi.org/10.2514/1.J054908)
15. Firсанов Val.V., Fam V.T., Chan N.D. *Trudy MAI*, 2021, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118893>. DOI: [34759/trd-2020-114-07](https://doi.org/34759/trd-2020-114-07)
16. Lokteva N.A., Serdyuk D.O., Skopintsev P.D., Fedotenkov G.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161423>. DOI: [34759/trd-2021-120-09](https://doi.org/34759/trd-2021-120-09)
17. Goldovskii A.A., Firсанов V.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115122>. DOI: [34759/trd-2020-111-6](https://doi.org/34759/trd-2020-111-6)
18. Semenov A.A., Karpov V.V. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2013, no. 13, pp. 100-106.
19. Protasov V.D. *Mekhanika konstruksii iz kompozitsionnykh materialov. Deformirovanie i nachal'noe razrushenie sloistykh kompozitov pri udarnykh nagruzkakh* (Mechanics of structures made of composite materials), Moscow, Mashinostroenie, 1992, pp. 38-61.
20. Elizarov S.V. *Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya sloistykh kompozitov i nekotorye novye oblasti ikh primeneniya* (Mechanics of deformation and fracture of layered composites and some new areas of their application), Saint Petersburg, PGUPS, 2000, 242 p.

Статья поступила в редакцию 10.09.2022

Статья после доработки 12.09.2022

Одобрена после рецензирования 15.09.2022

Принята к публикации 12.10.2022

The article was submitted on 10.09.2022; approved after reviewing on 15.09.2022; accepted for publication on 12.10.2022