

## **Ударное взаимодействие оторвавшейся лопатки авиационного двигателя с многослойной панелью из полимерного композита**

© В.А. Вестяк, М.И. Мартиросов, Э.А. Занина

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

*Представлено математическое моделирование ударного взаимодействия оторвавшейся титановой лопатки авиационного двигателя с многослойной двухстрингерной панелью из полимерных композиционных материалов (ПКМ) (высокопрочного углепластика) в явной постановке. Моделирование панели выполнено послойно методом конечных элементов с учетом когезионного взаимодействия между слоями, что позволяет оценить в ней деламинацию. Повреждающий элемент смоделирован методом гидродинамики сглаженных частиц (SPH), что обеспечивает корректный учет разрушения ударника. В ходе численного эксперимента проведен анализ характера и степени повреждения обшивки и подкрепляющих стрингеров. Исследована зависимость кинетической энергии ударника от времени, являющаяся интегральным показателем энергии, поглощенной рассматриваемым конструктивным элементом из ПКМ. Рассмотренная комбинированная методика, сочетающая в себе метод конечных элементов и SPH, продемонстрировала свою эффективность и может быть адаптирована для моделирования ударных воздействий различных дискретных источников на элементы конструкций из ПКМ.*

**Ключевые слова:** явный метод, метод гидродинамики сглаженных частиц, полимерные композиционные материалы, метод конечных элементов, удар, дискретные источники, авиационная техника, лопатка авиадвигателя, стрингерная панель, программный комплекс LS-DYNA

**Введение.** Минимизация массы воздушных судов — одна из приоритетных задач современного авиастроения. Повышение весовой эффективности конструкции напрямую способствует улучшению маневренных характеристик и увеличению дальности полета. Перспективным направлением решения этой проблемы является применение полимерных композиционных материалов (ПКМ). Данный класс материалов обладает рядом преимуществ, включая высокие показатели удельной прочности и жесткости, а также возможность адаптации физико-механических свойств под конкретную схему нагружения силовых элементов. Однако одним из существенных недостатков ПКМ является повышенная чувствительность к ударным воздействиям дискретных источников. Многообразие сценариев и механизмов разрушения делает невозможным ограничение процесса сертификации исключительно натурными испытаниями. Поэтому неизбежно возникает потребность в численном моделировании ударного взаимодействия дискретных источников с элементами конструкций из ПКМ.

В работе [1] представлен метод описания разрушения матрицы для армированных волокнами материалов, основанный на разложении тензора градиента деформации на компоненты. В работе [2] ударное воздействие алюминиевого ударника на панель из углепластика смоделировано в программном комплексе LS-DYNA с использованием модели материала MAT299 для монослоев, которая базируется на разложении градиента деформации; межслоевое взаимодействие при этом моделировалось с применением интерполяционного закона разделения при растяжении — сдвиге Бензегга — Кенане, а результаты моделирования продемонстрировали хорошую корреляцию с экспериментальными данными. В работе [4] также показана эффективность применения MAT299 в LS-DYNA для прогнозирования ударных повреждений на уровне монослоя при низкоскоростном ударе.

Наряду с классическим методом конечных элементов (МКЭ) для моделирования ударных процессов используют и другие подходы. Например, в [5] проведено сравнение методов МКЭ и SPH для моделирования ударных воздействий, показавшее схожесть их результаты. В работе [6] дано описание моделирования ударника-птицы с помощью метода SPH, а также моделирование слоистого композита плоскими конечными элементами (КЭ) в программном комплексе ABAQUS. В работе [7] метод SPH и метод расцепленных конечных частиц применены для моделирования сверхвысокоскоростного удара по ПКМ, где каждый монослой моделировался тремя частицами SPH. Комбинированная модель, сочетающая меньшую вычислительную стоимость КЭ и способность метода SPH справляться с образованием трещин, что позволяет повысить точность моделирования баллистических ударов по керамике, предложена в [8]. В работе [9] для моделирования удара камня по лопасти вертолета из ПКМ был выбран произвольный алгоритм Лагранжа — Эйлера, который может исправлять сетку с помощью эйлеровых элементов или моделировать движение сетки, адаптируя ее к материалу [10].

В области физики разрушения композитов разработана модель механики континуального разрушения, включающая критерий инициирования разрушения, который не зависит от эмпирических параметров [11]. В работе [12] для моделирования как удара по композиту, так и сложного нагружения после ударных испытаний использована дискретная модель слоя, показавшая удовлетворительную корреляцию с экспериментом. Предложенная в [13] математическая модель ПКМ учитывает разрушение монослоя в направлении из плоскости, а также в [13] разработаны модели с послойным моделированием образца с когезионным интерфейсом между слоями для учета расслоений, возникающих от удара. Однако большинство исследований сосредоточено на взаимодействии с ударниками достаточно простой формы, в то время как задачу соударения высокоскоростного элемента сложной

формы (лопатки) с подкрепленной панелью из ПКМ требуется решать с применением комплексного подхода.

В настоящей работе исследуется ударное воздействие оторвавшейся титановой лопадки авиационного двигателя на двухстрингерную слоистую панель из ПКМ. Скорость лопадки, составляющая 220 м/с, направлена под углом к поверхности выкладки панели таким образом, чтобы разрушение происходило не только в панели, но и в обоих стрингерах. Панель размерами 220×450 мм закреплена от перемещений по трем поступательным степеням свободы. Шаг стрингеров 110 мм. Панель и стрингеры содержат по 40 монослоев толщиной 0,1 мм. Схема укладки панели: [0/90/0/+45/90/–45/0/90/45/0/+45/90/0/+45/90/–45/0/90/45/0]<sub>s</sub>. Схема укладки стрингера: [+45/90/0/+45/90/0/–45/90/45/0/–45/90/0/+45/90/–45/0/90/45/0]<sub>s</sub>. Панель и стрингеры выполнены из однонаправленного углепластика на основе углеродного волокна Т300 и эпоксидного связующего PRIME 20 LV [14]. Физико-механические характеристики монослоя приведены ниже:

|                                                                       |         |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|
| Модуль упругости вдоль волокон $E_1$ , МПа .....                      | 139 200 |
| Модуль упругости поперек волокон $E_2$ , МПа .....                    | 8076    |
| Модуль сдвига в плоскости монослоя $G_{12}$ , МПа .....               | 5000    |
| Предел прочности материала при растяжении                             |         |
| вдоль волокон $\sigma_1^T$ , МПа .....                                | 3128,2  |
| Предел прочности материала при сжатии                                 |         |
| вдоль волокон $\sigma_1^C$ , МПа .....                                | 1616,4  |
| Предел прочности материала при растяжении                             |         |
| поперек волокон $\sigma_2^T$ , МПа .....                              | 1227,4  |
| Предел прочности материала при сжатии                                 |         |
| поперек волокон $\sigma_2^C$ , МПа .....                              | 680     |
| Предел прочности на сдвиг в плоскости монослоя $\tau_{12}$ , МПа .... | 80      |
| Коэффициент Пуассона $\nu_{12}$ .....                                 | 0,324   |
| Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> .....                            | 1510    |

Цель работы — получить зависимость кинетической энергии лопадки от времени, определить пластические деформации монослоев панели и стрингеров, а также оценить повреждения панели и стрингеров в результате удара.

**Методы решения задачи.** Моделирование композитных конструкций в данной работе опирается на ранее апробированную методику [14–16]. В основе подхода к моделированию композитных панелей лежит комбинация двух типов КЭ. Поведение монослоев описывается ортотропной моделью с упрощенным законом накопления повреждений — 221\_MAT\_ORTHOTROPIC\_SIMPLIFIED\_DAMAGE, а для

моделирования межслоевого взаимодействия используется модель 138\_MAT\_COHESIVE\_MIXED\_MODE. Критерием степени разрушения монослоя служит коэффициент деградации, отражающий падение жесткости элемента. Что касается лопатки, то для ее моделирования применяется метод SPH.

В основе метода SPH лежит бессеточный лагранжев подход, где аппроксимация функций строится на интегральном представлении [17]. В отличие от традиционного МКЭ, где сплошная среда разбивается на КЭ, в SPH расчетная область представлена множеством частиц [18]. Отсутствие сетки компенсируется использованием специальных функций сглаживания, которые задают характер взаимодействия между частицами. Математически значение функции в точке записывается как интегральная свертка с ядром  $W(x-y, h)$ :

$$\Pi^h f(x) = \int f(y) \cdot W(x-y) dy, \quad (1)$$

где  $\Pi^h f(x)$  — аппроксимированное значение функции  $f$  в точке  $x$ ;  $f(y)$  — значение функции  $f$  в точке  $y$ ;  $W(x-y, h)$  — функция ядра;  $h$  — длина сглаживания.

При переходе к дискретной модели суммирование ведется по всем частицам в зоне влияния:

$$\Pi^h f(x_i) = \sum_{j=1}^N w_j \cdot f(x_j) \cdot W(x_i - x_j, h), \quad (2)$$

где  $\Pi^h f(x_i)$  — дискретная аппроксимация функции  $f$  в точке  $x_i$  (в положении частицы  $i$ );  $x_i$  — координата  $i$ -й частицы;  $x_j$  — координата  $j$ -й частицы;  $w_j$  — вес  $j$ -й частицы,  $w_j = \frac{m_i}{\rho_j}$  ( $m_i$  — масса,  $\rho_j$  — плотность);  $f(x_j)$  — значение функции для частицы  $j$ ;  $W(x_i - x_j, h)$  — функция ядра, зависящая от расстояния между частицами  $i$  и  $j$  и параметра сглаживания  $h$ ;  $N$  — число частиц в области влияния — все частицы  $j$ , для которых  $|x_i - x_j| < \kappa h$  ( $\kappa$  — коэффициент радиуса ядра).

Выбор ядерной функции напрямую влияет на вычислительную эффективность и точность метода, так как она задает шаблон интерполяции и радиус области сглаживания. Спектр возможных функций ядра широк (от гауссовых до полиномиальных), однако в программном комплексе LS-DYNA стандартом является кубический В-сплайн:

$$\begin{aligned}
 W(r, h) &= \frac{C}{h^d} \cdot \left( 1 - \frac{3}{2}u^2 + \frac{3}{4}u^3 \right) \text{ для } |u| = \frac{r}{h} \leq 1, \\
 W(r, h) &= \frac{C}{h^d} \cdot \frac{1}{4} \cdot (2-u)^3 \text{ для } 1 \leq |u| = \frac{r}{h} \leq 2, \\
 W(r, h) &= 0 \text{ для } 2 \leq |u| = \frac{r}{h},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $r$  — расстояние между частицами  $i$  и  $j$ ,  $r = x_i - x_j$ ;  $h$  — длина сглаживания, которая измеряется во времени и пространстве;  $C$  — константа нормировки, зависящая от числа пространственных измерений (для  $d = 3$ ,  $C = \frac{1}{\pi}$ ) [17];  $u = \frac{r}{h}$  — нормированное расстояние;  $d$  — число пространственных измерений (1, 2 или 3).

Основная ценность бессеточных методов заключается в возможности корректно описывать процессы с огромными деформациями, не прибегая к удалению частиц. Благодаря этому законы сохранения массы, импульса и энергии выполняются автоматически [19]. Однако этим методам свойственны и слабые стороны, в частности, неустойчивость при растяжении и несогласованность частиц [20]. Первая проблема вызвана склонностью частиц к сгущиванию из-за эйлеровых черт метода (обновление «соседей» на каждом шаге). Разрешить ее можно, перейдя к полностью лагранжевой формулировке, где список «соседей» фиксирован изначально, но это усложняет расчет при очень больших перемещениях.

**Результаты моделирования.** Взаимодействие фрагмента лопатки со стрингерной панелью показано [на рис. 1](#).

Пластические деформации панели после воздействия лопатки представлены на рис. 2, где также приведены поля пластических деформаций элементов панели. Максимальные значения пластических деформаций обшивки (рис. 2, *а*) локализованы в зоне первого контакта с лопаткой. Для стрингера  $-Y$  (рис. 2, *б*) и стрингера  $+Y$  (рис. 2, *в*) зоны повышенных деформаций соответствуют участкам непосредственного внедрения лопатки. При этом уровень деформаций в первом стрингере  $-Y$ , который принимает ударное воздействие, превышает аналогичный показатель для второго стрингера, что объясняется частичной потерей кинетической энергии ударником после разрушения первого стрингера. Сравнение полученных размеров повреждения по пластическим деформациям по разработанной модели дает осредненное расхождение с имеющимися экспериментальными данными, равное 11,4 %.

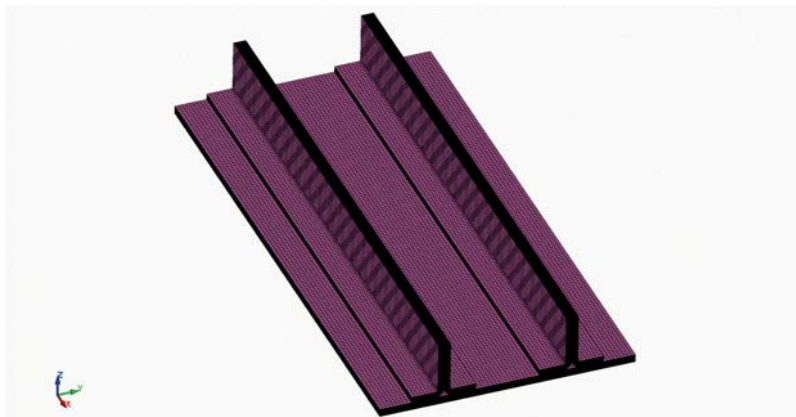


Рис. 1. Взаимодействие фрагмента лопатки со стрингерной панелью в разные моменты времени

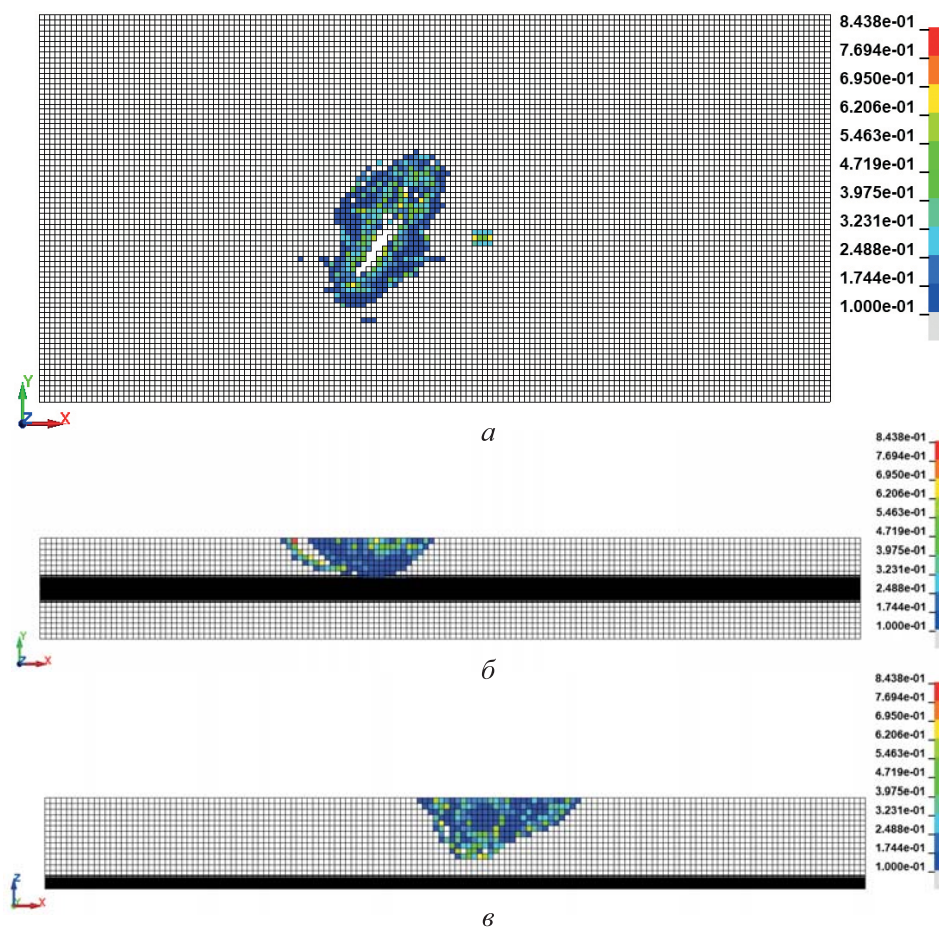
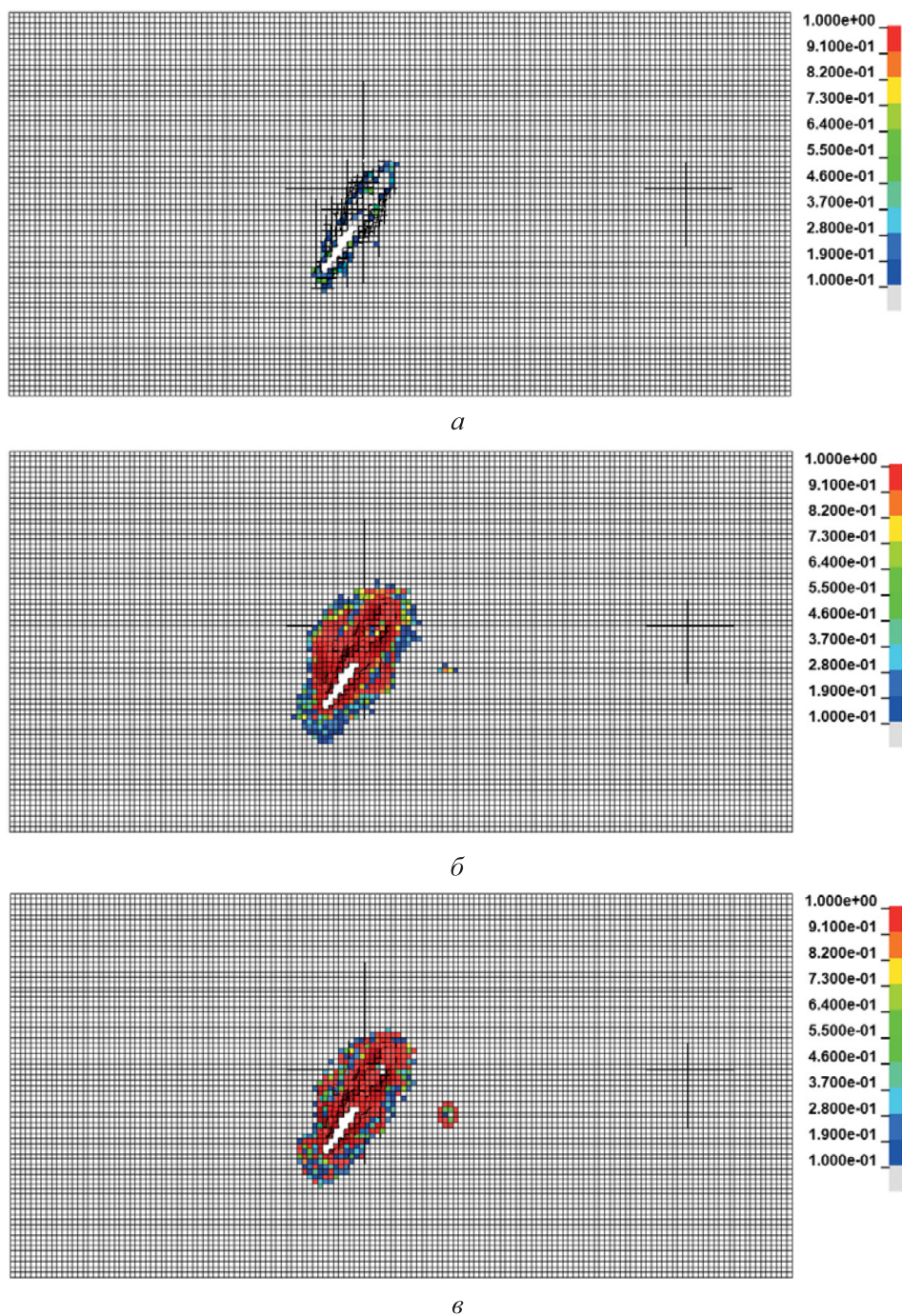
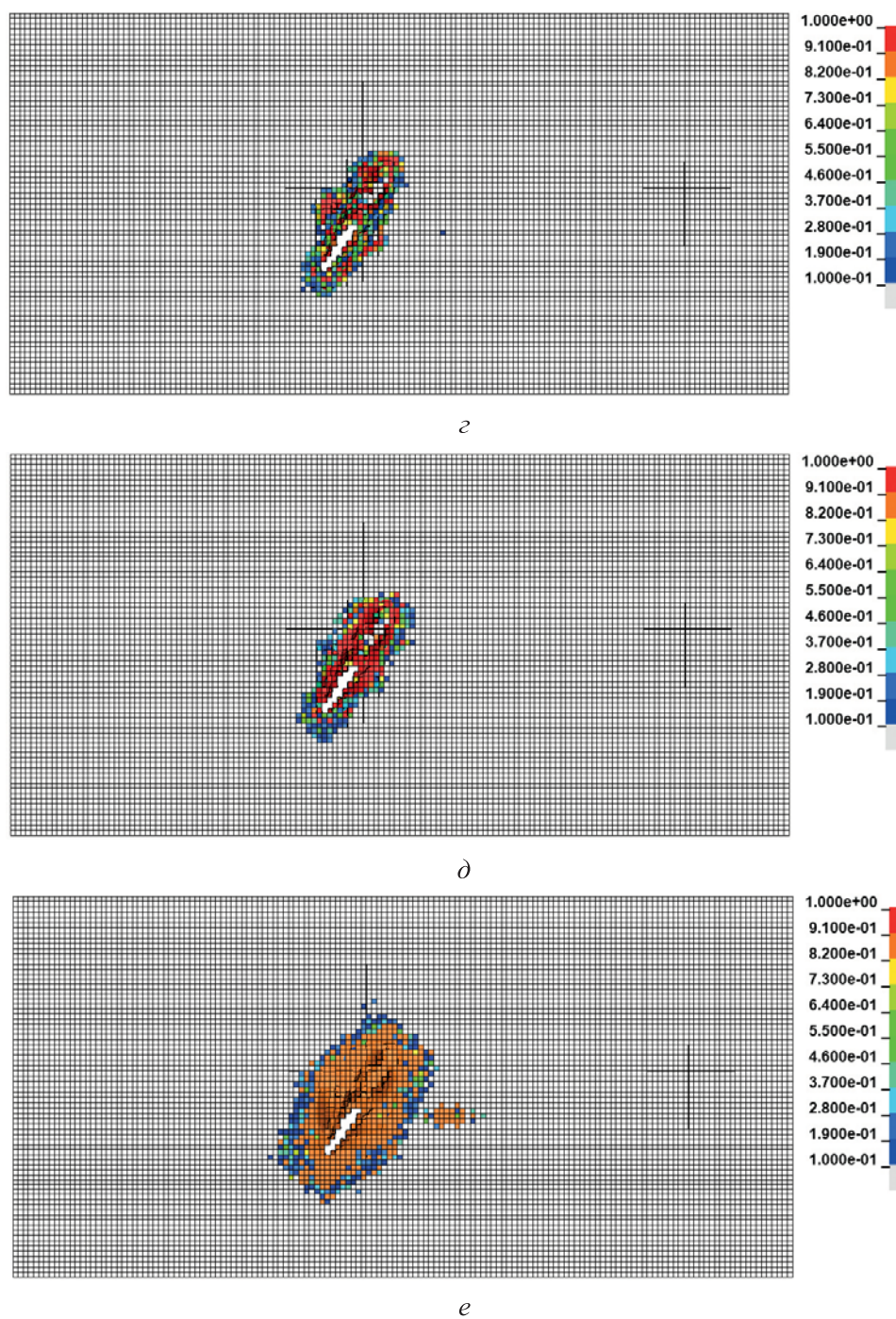


Рис. 2. Пластические деформации панели (а), стрингера  $-Y$  (б), стрингера  $+Y$  (в)

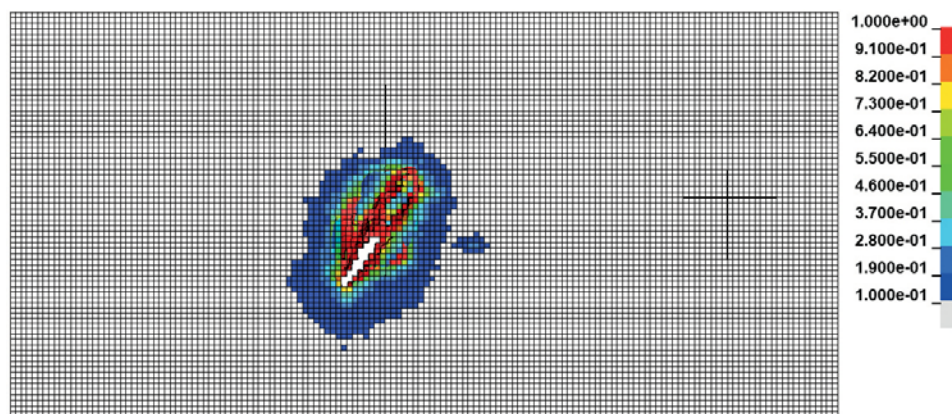


**Рис. 3 (начало).** Коэффициенты деградации панели после воздействия лопатки:

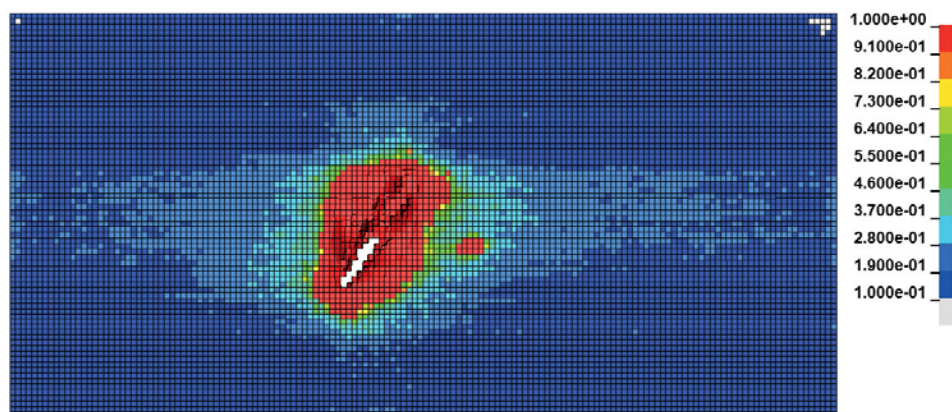
*a* — растяжение вдоль волокон; *б* — растяжение поперек волокон;  
*в* — растяжение из плоскости монослоя



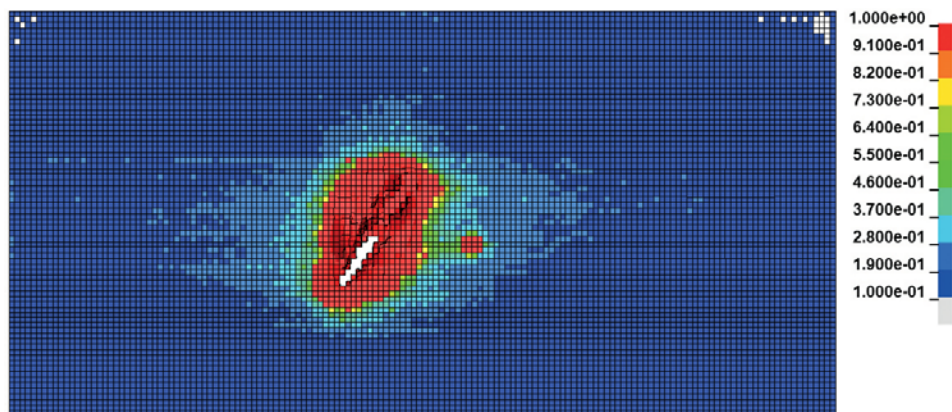
**Рис. 3 (продолжение).** Коэффициенты деградации панели после воздействия лопатки:  
 $z$  — сжатие вдоль волокон;  $d$  — сжатие поперек волокон;  
 $e$  — сжатие из плоскости монослоя



ж



з



и

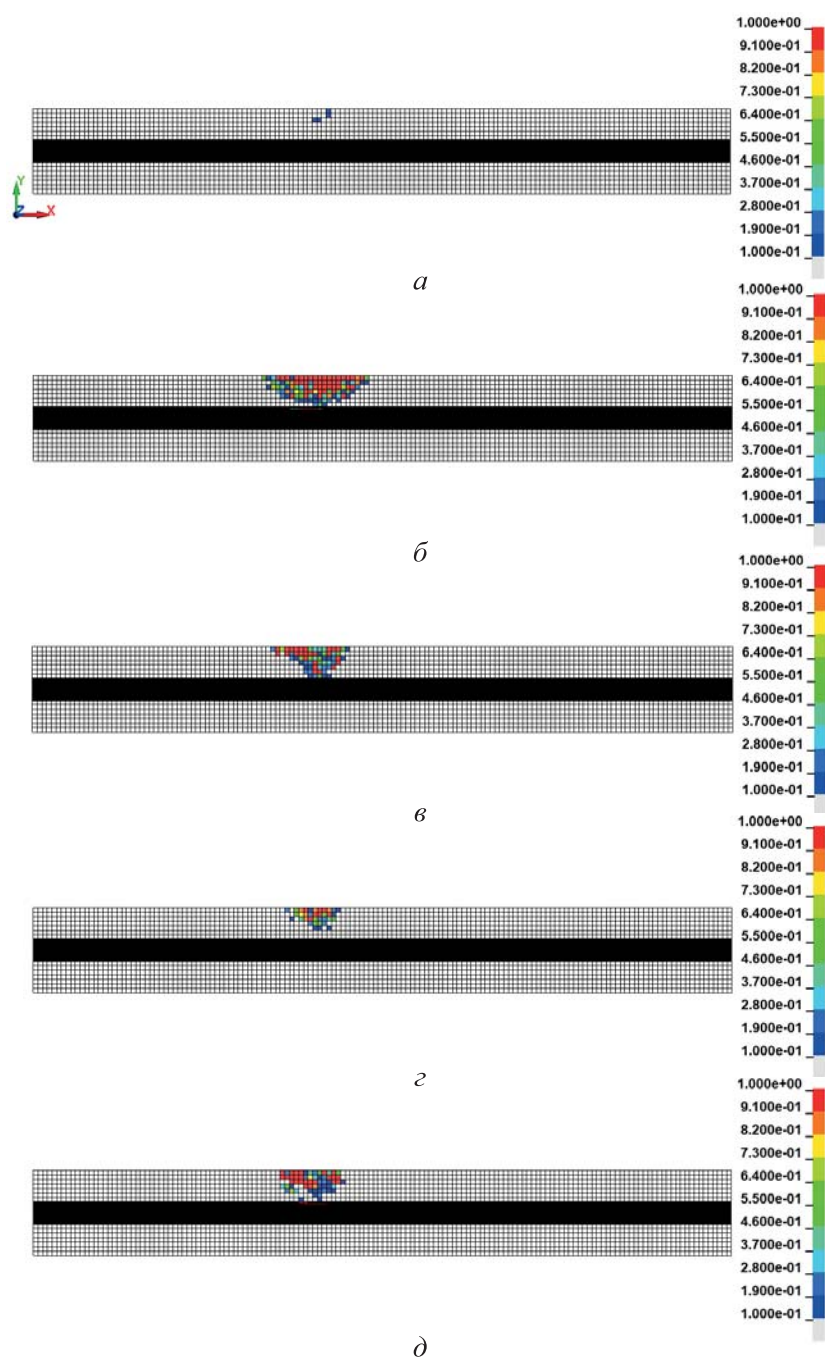
**Рис. 3 (окончание).** Коэффициенты деградации панели после воздействия лопатки:  
ж — сдвиг 12; з — сдвиг 23; и — сдвиг 31

Коэффициенты деградации жесткости монослоев для панели и каждого из стрингеров представлены на рис. 3–5. Коэффициент деградации, равный 1, соответствует полной потере несущей способности материала. Анализ повреждений обшивки (см. рис. 3) показывает, что наиболее существенные разрушения наблюдаются при растяжении поперек волокон (рис. 3, б), сжатии поперек волокон (рис. 3, д) и сдвиговых нагрузках (рис. 3, ж–и). Область максимальной деградации, расположенная в зоне удара, имеет эллипсовидную форму, вытянутую вдоль направления движения ударника.

Коэффициенты деградации стрингера  $-Y$  после воздействия лопатки показаны на рис. 4, причем максимальные сосредоточены в зоне, примыкающей к обшивке. Характер повреждений стрингера качественно схож с тем, что у панели, однако интенсивность деградации выше. Критическое разрушение зафиксировано для растяжения поперек волокон (рис. 4, б), из плоскости монослоя (рис. 4, в), сжатия вдоль волокон (рис. 4, г) и поперек волокон (рис. 4, д), а также сдвига (рис. 4, ж–и), что свидетельствует о потере целостности композитной структуры в зоне контакта, а также о том, что основные разрушения происходят в матрице ПКМ.

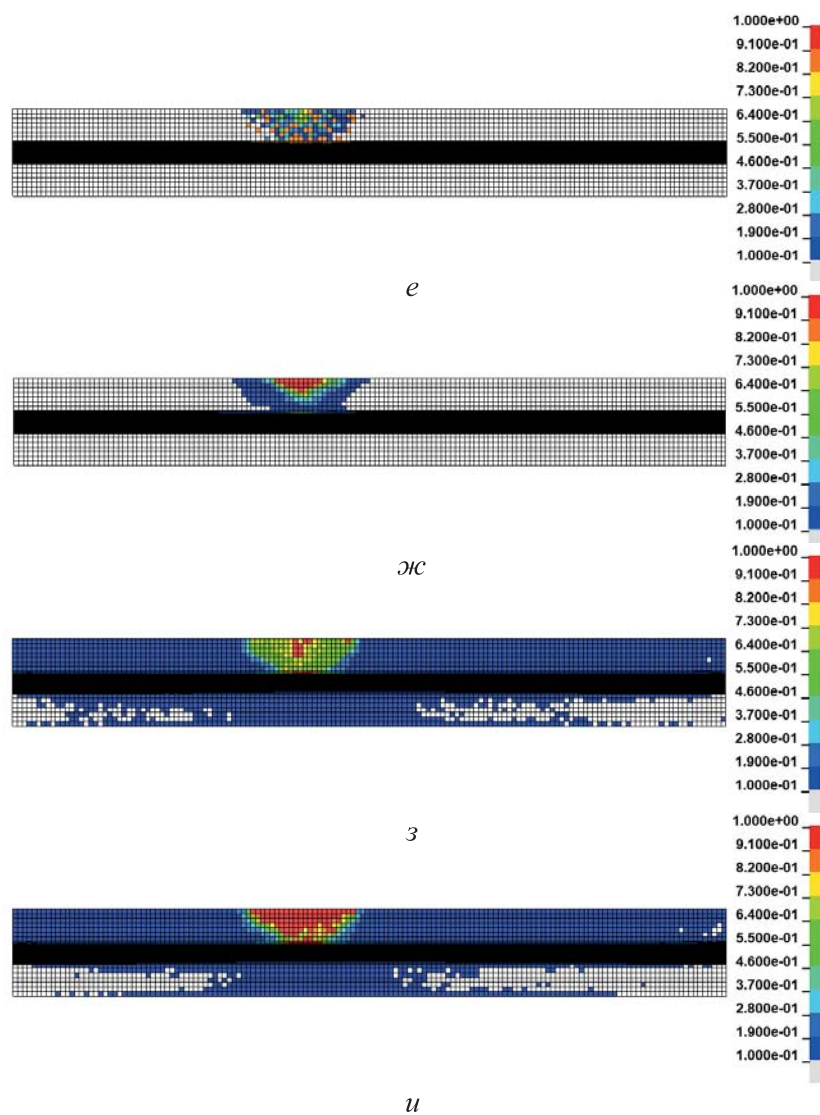
Коэффициенты деградации стрингера  $+Y$  после ударного воздействия лопатки представлены на рис. 5. Максимальные повреждения сосредоточены в зоне стенки стрингера, что обусловлено траекторией фрагмента лопатки. Критическое разрушение зафиксировано для растяжения поперек волокон (рис. 5, б), из плоскости монослоя (рис. 5, в) и сдвига (рис. 5, ж–и), что свидетельствует о потере целостности композитной структуры в зоне контакта, а также о том, что основные разрушения происходят в матрице ПКМ.

Интегральной характеристикой энергоемкости рассматриваемой конструкции является зависимость кинетической энергии лопатки от времени, приведенная на рис. 6. Начальная кинетическая энергия лопатки составляет  $\sim 325$  Дж. В процессе взаимодействия с панелью происходит ее быстрое снижение. Характерные участки графика соответствуют этапам: начальный контакт с обшивкой и первым стрингером (падение энергии с  $\sim 325$  до  $\sim 200$  Дж), взаимодействие со вторым стрингером (снижение до  $\sim 125$  Дж). К концу расчетного времени (3 мс) кинетическая энергия ударника снижается до  $\sim 125$  Дж и составляет около 38 % от начального значения, что указывает на высокую энергопоглощающую способность рассмотренной двухстрингерной панели из ПКМ.

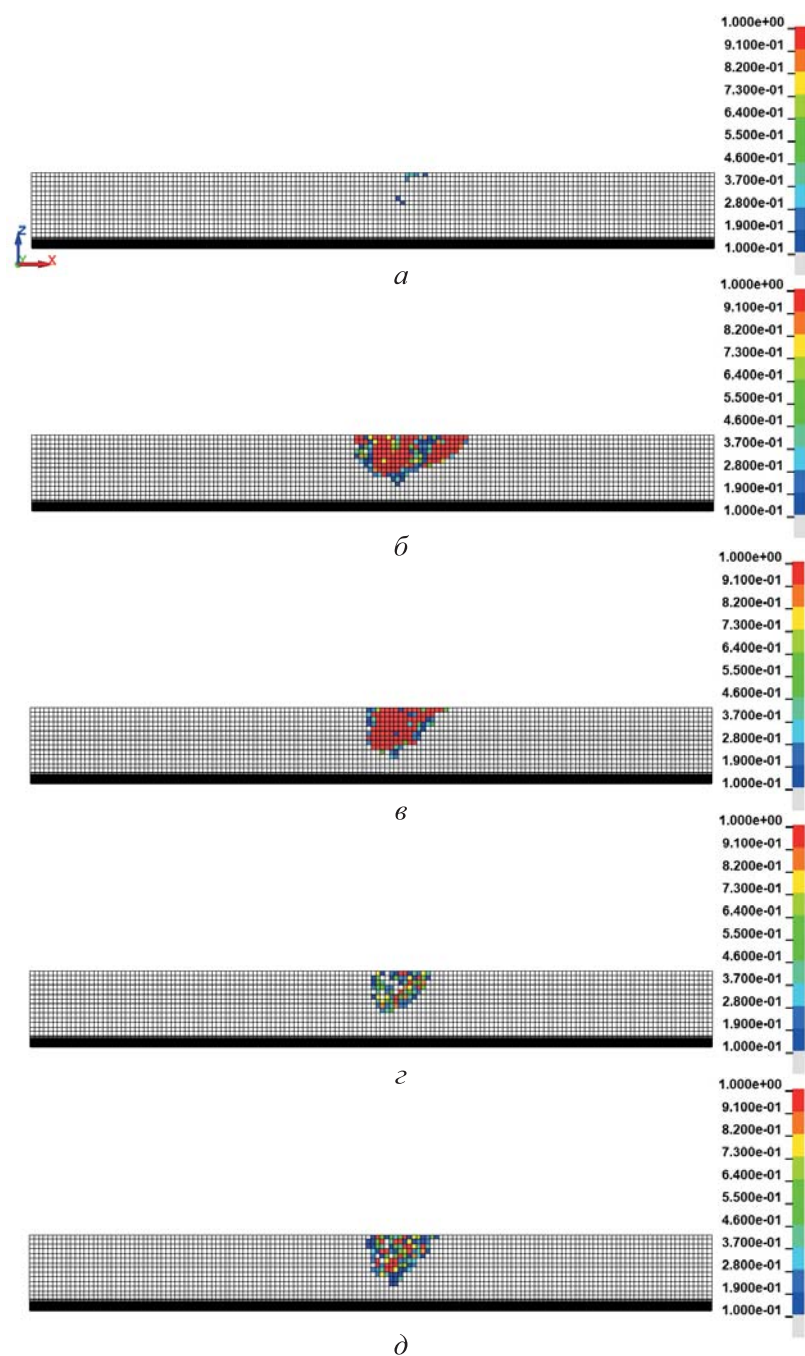


**Рис. 4 (начало).** Коэффициенты деградации стрингера – $Y$  после воздействия лопатки:

$a$  — растяжение вдоль волокон;  $б$  — растяжение поперек волокон;  $в$  — растяжение из плоскости монослоя;  $г$  — сжатие вдоль волокон;  $д$  — сжатие поперек волокон

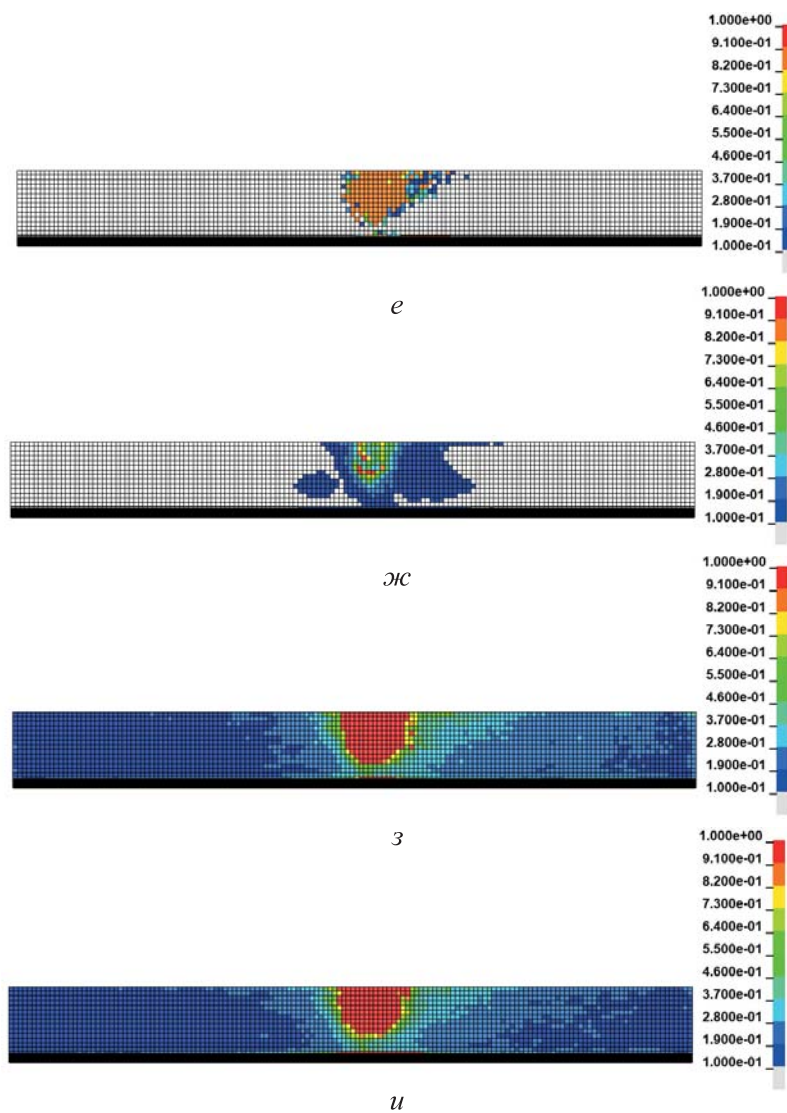


**Рис. 4 (окончание).** Коэффициенты деградации стрингера –  $Y$  после воздействия лопатки:  
 $e$  — сжатие из плоскости монослоя;  $ж$  — сдвиг 12;  $з$  — сдвиг 23;  $и$  — сдвиг 31



**Рис. 5 (начало).** Коэффициенты деградации стрингера +Y после воздействия лопадки:

а — растяжение вдоль волокон; б — растяжение поперек волокон; в — растяжение из плоскости монослоя; г — сжатие вдоль волокон; д — сжатие поперек волокон



**Рис. 5 (окончание).** Коэффициенты деградации стрингера +Y после воздействия лопатки:  
 $e$  — сжатие из плоскости монослоя;  $ж$  — сдвиг 12;  $з$  — сдвиг 23;  $и$  — сдвиг 31

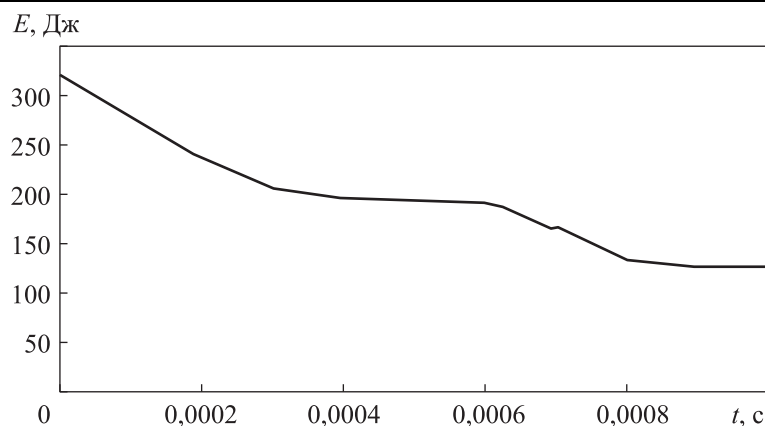


Рис. 6. Зависимость кинетической энергии  $E$  лопадки от времени  $t$

**Заключение.** Разработана КЭМ, позволяющая оценивать характер и степень повреждения многослойной двухстрингерной панели из ПКМ при высокоскоростном ударе лопадки сложной формы. Использование метода SPH для ударника обеспечило корректное описание его разрушения при соударении. Получена зависимость кинетической энергии лопадки от времени, которая носит ступенчатый характер. Падение энергии с 325 до 200 Дж соответствует начальному контакту с обшивкой и первым стрингером, а последующее снижение до 125 Дж — взаимодействию со вторым стрингером. К концу расчетного времени (3 мс) кинетическая энергия ударника составила 38 % от начальной.

Анализ полей пластических деформаций показал, что зона максимальных деформаций обшивки локализована в области первого контакта с лопадкой. Уровень деформаций стрингера  $-Y$ , первым принимающего удар, превышает аналогичный показатель для стрингера  $+Y$ , что объясняется диссипацией энергии ударника после разрушения первого стрингера. На основе коэффициентов деградации жесткости монослоев установлено, что наиболее существенные разрушения панели и стрингеров происходят при растяжении поперек волокон, сжатии поперек волокон и сдвиговых нагрузках. Значения коэффициентов деградации, близкие к единице, свидетельствуют о полной потере несущей способности материала в зонах внедрения лопадки.

Предложенная комбинированная методика (МКЭ + SPH) продемонстрировала свою эффективность для моделирования ударных воздействий дискретных источников сложной формы на элементы авиационных конструкций из ПКМ, и значит, ее можно рекомендовать для использования в сертификационных расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Leone F.A. Deformation gradient tensor decomposition for representing matrix cracks in fiber-reinforced materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 76, pp. 334–341. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.06.014 (дата обращения: 02.03.2026).
- [2] Voleti S.R., Rao P.M., Pereira J.M. Impact response of thermoplastic composites — Experiments and modeling. *Journal of Composite Materials*, 2025, no. 59 (3), pp. 435–450. DOI: 10.1177/00219983241304688 (дата обращения: 02.03.2026).
- [3] Voleti S.R., Rao P.M., Pereira J.M. Modeling of response of thermoplastic composites under high energy impact. *NASA/RTX Technical Report*, 2024.
- [4] Justusson B., Molitor M., Schaefer J., Liguore S.L. The Use of LS-DYNA MAT299 for accurate prediction of impact damage in composite structures. *AIAA SciTech Forum*, 2021. DOI: 10.2514/6.2021-1624 (дата обращения: 02.03.2026).
- [5] Badea M. C., Hadar A., Năstăsescu V., Bârsan G. Methods, models, and methodologies for numerical modeling of projectile impact on a plate. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 2024, no. 30 (3), pp. 29–36. DOI: 10.2478/kbo-2024-0081 (дата обращения: 02.03.2026).
- [6] Zhou Y., Sun Y., Cai W. SPH-FEM simulation of impacted composite laminates with different layups. *Aerospace Science and Technology*, 2019, vol. 95, pp. 105469. DOI: 10.1016/j.ast.2019.105469 (дата обращения: 02.03.2026).
- [7] Lu Y., Chen J., Feng D. Numerical modeling of hypervelocity impacts on carbon fiber reinforced plastics using a GPU-accelerated SPH model. *Computational Mechanics*, 2023, vol. 72, no. 5, pp. 907–926. DOI: 10.1007/s00466-023-02318-7 (дата обращения: 02.03.2026).
- [8] Scazzosi R., Giglio M., Manes A. FE coupled to SPH numerical model for the simulation of high-velocity impact on ceramic based ballistic shields. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 15, pp. 23760–23772. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.06.151 (дата обращения: 02.03.2026).
- [9] Kurtar S., Gamze Y., Bektaş D.N., Özsunar S.N. Low velocity impact response of CFRP and Al2024-T3 helicopter blade. *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 2024, vol. 5, no. 2, pp. 51–61. <https://doi.org/10.55212/ijaa.1583352>
- [10] Tathier M.S., Baran T. Structural and CFD analysis of an airfoil subjected to bird strike. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2020, vol. 84, pp. 478–486. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2020.07.012 (дата обращения: 02.03.2026).
- [11] Liu N. Cui B., Wang H., Zhao G., Chen P. Effect of discrete source damage on buckling and post-buckling behavior of composite hat-stiffened panels under uniaxial compression. *Thin-Walled Structures*, 2025, vol. 218 (C), p. 114158. DOI: 10.1016/j.tws.2025.114158 (дата обращения: 02.03.2026).
- [12] Serra J., Trellu A., Bouvet C., Rivallant S., Castanié B. RatsifandrihanaL. Combined loadings after medium velocity impact on large CFRP laminated plates: Discrete ply model simulations. *Composites Part C: Open Access*, 2021, vol. 6 (C), p. 100203. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100203> (дата обращения: 02.03.2026).
- [13] Bolshikh A., Shelkov K., Borovkov D., Turbin N. Comparative evaluation of mathematical models of polymer composite material with the implementation of a three-dimensional stress–strain state in the simulation of impact. *Aerospace Systems*, 2025, vol. 8, pp. 519–530. <https://doi.org/10.1007/s42401-024-00286-1> (дата обращения: 02.03.2026).

- [14] Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В., Занина Э.А. Численное исследование ударного взаимодействия фрагментов пневматика авиационной шины с панелью из углепластика. *Труды МАИ*, 2024, № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181874> (дата обращения: 02.03.2026).
- [15] Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В., Занина Э.А. Численный анализ воздействия града на панель из углепластика. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2024, т. 30, № 3, с. 387–399. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2024.30.03.07 (дата обращения: 02.03.2026).
- [16] Вестяк В.А., Занина Э.А., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Моделирование множественных повреждений высокой плотности при ударном взаимодействии с поверхностью композитного пакета. *Сборник трудов 14-й Всероссийской научной конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского*, 2024, с. 48–58. DOI: 10.33113/conf.mkmk.ras.2024.6 (дата обращения: 02.03.2026).
- [17] Giannaros E., Kotzakolios A., Kostopoulos V., Campoli G. Hypervelocity impact response of CFRP laminates using smoothed particle hydrodynamics method: Implementation and validation. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 123, pp. 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.09.016> (дата обращения: 02.03.2026).
- [18] Giannaros E., Kotzakolios S., Tsantzalis S., Kostopoulos V., Campoli G. Novel simulation of composite material behavior subjected to hyper-velocity impact (HVI) and produced secondary debris by using smoothed-particle-hydrodynamics code (SPH) methodology in LS-DYNA. *Proceedings of the 11th European LS-DYNA conference, Salzburg, Austria*, 2017, pp. 9–11.
- [19] Seri S., Khodaei Z.S. Numerical investigation of hypervelocity impact simulation with FEM/SPH. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, vol. 187, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104926> (дата обращения: 02.03.2026).
- [20] Sun P.N., Colagrossi A., Marrone S., Antuono M., Zhang A.M. Multi-resolution Delta-plus-SPH with tensile instability control: Towards high Reynolds number flows. *Computer Physics Communications*, 2018, vol. 224, pp. 63–80. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.11.016> (дата обращения: 02.03.2026).

Статья поступила в редакцию 20.03.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Вестяк В.А., Мартиросов М.И., Занина Э.А. Ударное взаимодействие оторвавшейся лопадки авиационного двигателя с многослойной панелью из полимерного композита. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 6. EDN MQOSJN

**Вестяк Владимир Анатольевич** — д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Прикладные программные средства и математические методы», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). e-mail: v.a.vestyak@mail.ru

**Мартиросов Михаил Иванович** — канд. техн. наук, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). e-mail: michaelmartirosov@yandex.ru

**Занина Эльвира Александровна** — аспиранка кафедры «Прикладные программные средства и математические методы», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). e-mail: zanina.elya@yandex.ru

## Impact Interaction of a Detached Aircraft Engine Blade with a Multilayer Panel Made of Polymer Composite

© V.A. Vestyak, M.I. Martirosov, E.A. Zanina

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, 125993, Russian Federation

*A mathematical modeling of the impact interaction of a detached titanium blade of an aircraft engine with a multi-layer two-stringer panel made of polymer composite materials (PCM) (high-strength carbon fiber reinforced plastic) is presented in an explicit formulation. The panel is modeled layer-by-layer using the finite element method (FEM), taking into account cohesive interaction between the layers, which makes it possible to evaluate delamination in the panel. The impacting element is modeled using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, which ensures a correct account of the striker's failure. In the numerical experiment, an analysis of the nature and extent of damage to the skin and reinforcing stringers is carried out. The dependence of the striker's kinetic energy on time, which serves as an integral indicator of the energy absorbed by the considered structural element made of PCM, is investigated. The combined approach considered, combining FEM and SPH, has demonstrated its effectiveness and can be adapted for modeling impact effects from various discrete sources on structural elements made of PCM.*

**Keywords:** explicit method, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), polymer composite materials, finite element method (FEM), impact, discrete sources, aircraft engineering, aircraft engine blade, stringer panel, LS-DYNA software package

### REFERENCES

- [1] Leone F.A. Deformation gradient tensor decomposition for representing matrix cracks in fiber-reinforced materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 76, pp. 334–341. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.06.014 (accessed March 2, 2026).
- [2] Voleti S.R., Rao P.M., Pereira J.M. Impact response of thermoplastic composites — experiments and modeling. *Journal of Composite Materials*, 2025, vol. 59, no. 3, pp. 435–450. DOI: 10.1177/00219983241304688 (accessed March 2, 2026).
- [3] Voleti S.R., Rao P.M., Pereira J.M. Modeling of response of thermoplastic composites under high energy impact. *NASA/RTX Technical Report*, 2024.
- [4] Justusson B., Molitor M., Schaefer J., Liguore S.L. The use of LS-DYNA MAT299 for accurate prediction of impact damage in composite structures. *AIAA SciTech Forum*, 2021. DOI: 10.2514/6.2021-1624 (accessed March 2, 2026).
- [5] Badea M.C., Hadar A., Năstăsescu V., Bârsan G. Methods, models, and methodologies for numerical modeling of projectile impact on a plate. *International Conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 2024, vol. 30, no. 3, pp. 29–36. DOI: 10.2478/kbo-2024-0081 (accessed March 2, 2026).
- [6] Zhou Y., Sun Y., Cai W. SPH-FEM simulation of impacted composite laminates with different layups. *Aerospace Science and Technology*, 2019, vol. 95, art. 105469. DOI: 10.1016/j.ast.2019.105469 (accessed March 2, 2026).
- [7] Lu Y., Chen J., Feng D. Numerical modeling of hypervelocity impacts on carbon fiber reinforced plastics using a GPU-accelerated SPH model. *Computational Mechanics*, 2023, vol. 72, no. 5, pp. 907–926. DOI: 10.1007/s00466-023-02318-7 (accessed March 2, 2026).

- [8] Scazzosi R., Giglio M., Manes A. FE coupled to SPH numerical model for the simulation of high-velocity impact on ceramic-based ballistic shields. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 15, pp. 23760–23772. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.151 (accessed March 2, 2026).
- [9] Kurtar S., Gamze Y., Bektaş D.N., Özsunar S.N. Low velocity impact response of CFRP and Al2024-T3 helicopter blade. *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 2024, vol. 5, no. 2, pp. 51–61. DOI: 10.55212/ijaa.1583352 (accessed March 2, 2026).
- [10] Tatlier M.S., Baran T. Structural and CFD analysis of an airfoil subjected to bird strike. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*, 2020, vol. 84, pp. 478–486. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2020.07.012 (accessed March 2, 2026).
- [11] Liu N., Cui B., Wang H., Zhao G., Chen P. Effect of discrete source damage on buckling and post-buckling behavior of composite hat-stiffened panels under uniaxial compression. *Thin-Walled Structures*, 2025, vol. 218, art. 114158. DOI: 10.1016/j.tws.2025.114158 (accessed March 2, 2026).
- [12] Serra J., Trelu A., Bouvet C., Rivallant S., Castanié B., Ratsifandrihana L. Combined loadings after medium velocity impact on large CFRP laminated plates: discrete ply model simulations. *Composites Part C: Open Access*, 2021, vol. 6, art. 100203. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100203 (accessed March 2, 2026).
- [13] Bolshikh A., Shelkov K., Borovkov D., Turbin N. Comparative evaluation of mathematical models of polymer composite material with the implementation of a three-dimensional stress-strain state in the simulation of impact. *Aerospace Systems*, 2025, vol. 8, pp. 519–530. DOI: 10.1007/s42401-024-00286-1 (accessed March 2, 2026).
- [14] Medvedsky A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Zanina E.A. Chislennoe issledovanie udarnogo vzaimodeystviya fragmentov pnevmatika aviatsionnoy shiny s panel'yu iz ugleplastika [Numerical study of impact interaction of pneumatic fragments of an aircraft tire with a carbon fiber panel]. *TRUDY MAI*, 2024, no. 137. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181874> (accessed March 2, 2026).
- [15] Medvedsky A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Zanina E.A. Chislenny analiz vozdeystviya grada na panel iz ugleplastika [Numerical analysis of hail impact on a carbon-fiber-reinforced plastic panel]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy*, 2024, vol. 30, no. 3, pp. 387–399. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2024.30.03.07 (accessed March 2, 2026).
- [16] Vestyak V.A., Zanina E.A., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. Modelirovanie mnozhestvennykh povrezhdeniy vysokoy plotnosti pri udarnom vzaimodeystvii s poverkhnost'yu kompozitnogo paketa [Modeling of high-density multiple damage under impact interaction with the surface of a composite laminate]. In: *Sbornik trudov 14-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy, slozhnykh i geterogennykh sred" im. I.F. Obratsova i Yu.G. Yanovskogo* [Proceedings of the 14th All-Russian Scientific Conference "Mechanics of Composite Materials and Structures, Complex and Heterogeneous Media" named after I.F. Obratsov and Yu.G. Yanovskiy], 2024, pp. 48–58. DOI: 10.33113/conf.mkmk.ras.2024.6 (accessed March 2, 2026).
- [17] Giannaros E., Kotzakolios A., Kostopoulos V., Campoli G. Hypervelocity impact response of CFRP laminates using smoothed particle hydrodynamics method: implementation and validation. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 123, pp. 56–69. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.016 (accessed March 2, 2026).

- [18] Giannaros E., Kotzakolios S., Tsantzalis S., Kostopoulos V., Campoli G. Novel simulation of composite material behavior subjected to hyper-velocity impact (HVI) and produced secondary debris by using smoothed-particle-hydrodynamics code (SPH) methodology in LS-DYNA. In: *Proceedings of the 11th European LS-DYNA Conference*. Salzburg, Austria, 2017, pp. 9–11.
- [19] Seri S., Khodaei Z.S. Numerical investigation of hypervelocity impact simulation with FEM/SPH. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, vol. 187, art. 104926. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104926 (accessed March 2, 2026).
- [20] Sun P.N., Colagrossi A., Marrone S., Antuono M., Zhang A.M. Multi-resolution Delta-plus-SPH with tensile instability control: towards high Reynolds number flows. *Computer Physics Communications*, 2018, vol. 224, pp. 63–80. DOI: 10.1016/j.cpc.2017.11.016 (accessed March 2, 2026).

**Vestyak V.A.**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Software Tools and Mathematical Methods, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: v.a.vestyak@mail.ru

**Martirosov M.I.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: michaelmartirosov@yandex.ru

**Zanina E.A.**, Postgraduate Student, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: zanina.elya@yandex.ru