

УДК 539.4
DOI 10.53403/9785951505071_2022_19

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

Н. А. Абросимов, Д. Ю. Дьянов, А. В. Елесин, А. Ю. Константинов

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Композитные материалы находят все большее применение при разработке современных конструкций различного назначения, подвергающихся действию интенсивных импульсных нагрузок. При этом одной из ключевых проблем является выбор расчетной модели оценки несущей способности элемента конструкции с учетом совокупности нескольких факторов деформирования: сложного напряженно-деформированного состояния, влияния прогрессирующего разрушения, неоднородности полей напряжений и деформаций, нестационарности деформирования, влияния скорости деформирования и т. д.

Решение данной многоплановой задачи осложняется тем, что разрушение композитных материалов является многофакторным и многостадийным процессом, реализующимся на различных масштабных и структурных уровнях композитных материалов. Кроме того, характерная особенность конструкций из композитных материалов состоит в том, что материал и конструкция создаются одновременно – в рамках единого технологического процесса. Поэтому разработка моделей деформирования и разрушения композитных материалов является актуальной проблемой.

Для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки динамической прочности элементов конструкций, выполненных из композиционных материалов, используются различные модели прогрессирующего разрушения ортотропных материалов [1-8]. Целью настоящего исследования является разработка 3D модели прогрессирующего разрушения ортотропных материалов при динамическом нагружении (аналог MAT_ORTHOTROPIC_SIMPLIFIED_DAMAGE в коммерческом пакете программ LS-DYNA [9,10]). Разработанная модель вводилась через возможность реализации пользовательской модели материала в ПП ЛОГОС [11–13].

Ключевые слова: моделирование, ортотропные материалы, ЛОГОС, композитные материалы.

Определяющие соотношения модели

Определяющие соотношения композитного ортотропного материала устанавливаются на основе закона Гука в сочетании с теорией эффективных модулей [14].

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \chi_{12} \\ \chi_{23} \\ \chi_{31} \end{bmatrix}.$$

Элементы матрицы жесткости C_{ij} ($i, j = \overline{1,6}$) для ортотропного тела находятся согласно следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - \nu_{32}\nu_{23}}{E_{22}E_{33}\Delta}; & C_{12} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{21}}{E_{22}E_{33}\Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_{11}E_{33}\Delta}; \\ C_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_{22}E_{33}\Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_{11}E_{22}\Delta}; & C_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_{11}E_{33}\Delta}; \\ C_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_{11}E_{33}\Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_{11}E_{22}\Delta}; & C_{33} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_{11}E_{22}\Delta}; \\ C_{44} &= G_{12}; & C_{55} &= G_{23}; & C_{66} &= G_{31}, \end{aligned}$$

где $\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_{11}E_{22}E_{33}}$, E_{ii} ($i = \overline{1,3}$) – модули упругости, G_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) – модули сдвига, ν_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) – коэффициенты Пуассона ортотропного материала.

В случае ортотропного материала между коэффициентами упругости C_{ij} ($i, j = \overline{1,6}$) и коэффициентами податливости s_{ij} ($i, j = \overline{1,6}$) существуют следующие зависимости [15]:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{s_{22}s_{33} - s_{23}^2}{s}; & C_{12} &= \frac{s_{13}s_{23} - s_{12}s_{33}}{s}; \\ C_{22} &= \frac{s_{33}s_{11} - s_{13}^2}{s}; & C_{13} &= \frac{s_{12}s_{23} - s_{13}s_{22}}{s}; \\ C_{33} &= \frac{s_{11}s_{22} - s_{12}^2}{s}; & C_{23} &= \frac{s_{12}s_{13} - s_{23}s_{11}}{s}; \\ C_{44} &= \frac{1}{s_{44}}; & C_{55} &= \frac{1}{s_{55}}; & C_{66} &= \frac{1}{s_{66}}, \end{aligned}$$

где $s = s_{11}s_{22}s_{33} - s_{11}s_{23}^2 - s_{22}s_{13}^2 - s_{33}s_{12}^2 + 2s_{12}s_{23}s_{13}$.

Рассматриваемая модель ортотропного материала включает в себя модель повреждаемости и критерий разрушения. Модель учитывает взаимное влияние различных механизмов разрушения через зависимость прочностных свойств от вида напряженно-деформированного состояния и ортотропию параметров, управляющих этой зависимостью. Модель можно использовать только с объемными конечными элементами.

Для расчета развития повреждений в матрицу податливости вводятся шесть параметров повреждаемости для корректировки трех модулей упругости E_{11} , E_{22} , E_{33} и трех модулей сдвига G_{12} , G_{23} , G_{31} и вычисляется матрица податливости поврежденного материала, которая связывает тензоры эффективных деформаций и напряжений.

Принятая модель учитывает девять взаимосвязанных механизмов разрушения: шесть критериев разрушения при растяжении и сжатии по трем локальным осям и три критерия разрушения при сдвиге в 3-х координатных плоскостях (12, 13 и 23). В модели принимается линейный закон эволюции повреждений. До достижения деформации возникновения повреждений монослоев εS (точка А, рис. 1) связь между напряжениями и деформациями принимается линейно-упругой.

Затем происходит линейное разупрочнение материала (линия АС) до полного разрушения материала (элемента) εC (точка С). Разгрузка материала из произвольного состояния на линии АС также принимается линейной (линия ВО). Повторное нагружение материала происходит по линии ОВ. Разница в тангенсах угла наклона ОА и ОВ количественно характеризует деградацию упругих свойств материала. Значения величин εS и εC определяются из экспериментальных диаграмм деформирования растяжения, сжатия и сдвига элементарных образцов с однонаправленной укладкой слоев при нагружении вдоль и поперек волокон.

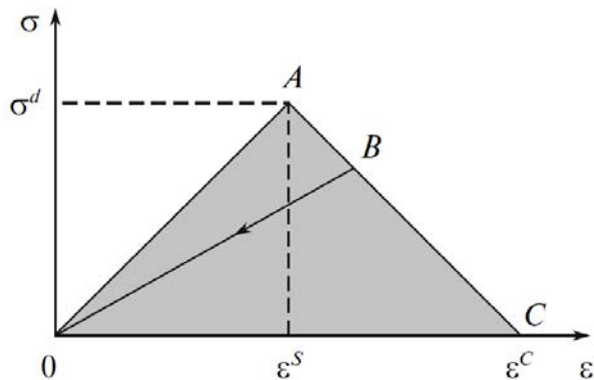


Рис. 1. Эволюция повреждений

Учет деградации материала осуществляется путем корректировки трех модулей упругости E_{11} , E_{22} , E_{33} и трех модулей сдвига G_{12} , G_{23} , G_{31} , для чего в матрицу податливости вводятся шесть параметров повреждаемости и вычисляется матрица податливости поврежденного материала, которая связывает тензоры эффективных деформаций и напряжений $\{\varepsilon\} = [S^{dam}] \{\sigma\}$, где

$$S^{dam} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}(1-d_{1t/c})} & \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{22}(1-d_{2t/c})} & \frac{-\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & \frac{-\nu_{32}}{E_{33}} & \frac{1}{E_{33}(1-d_{3t/c})} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}(1-d_{12})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}(1-d_{23})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}(1-d_{31})} \end{pmatrix}.$$

Здесь $d_k = \max \left(d_k ; D_k^c \left\langle \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_k^s}{\varepsilon_k^c - \varepsilon_k^s} \right\rangle_+ \right)$, $k = 1t, 2t, 3t, 1c, 2c, 3c, 12, 23, 31$ – индексы направления нагрузки

(индекс t – растяжение вдоль указанного направления, индекс c – сжатие), в угловых скобках $\langle \rangle_+$ берут положительную часть числа. Коэффициенты D принимаются равными единице, до возникновения повреждений все параметры повреждаемости d_k равны нулю.

В данной модели материала считается, что до начала процесса повреждения материал ведет себя линейно упруго. Чтобы отследить начало повреждения, в этой модели материала используется предельная деформация разрушения – критерий разрушения, основанный на виде разрушения. Такой критерий разрушения является простым способом предсказания начала разрушения без анализа зависимости между напряжением и деформацией в различных направлениях:

при растяжении в направлении оси 1: $\varepsilon_{11} > \varepsilon'_{11}$ ($\varepsilon_{11} > 0$);

при сжатии в направлении оси 1: $|\varepsilon_{11}| > \varepsilon^c_{11}$ ($\varepsilon_{11} < 0$);

при растяжении в направлении осей 2 и 3: $\varepsilon_{22} > \varepsilon'_{22}$ ($\varepsilon_{22} > 0$); $\varepsilon_{33} > \varepsilon'_{33}$ ($\varepsilon_{33} > 0$);

при сжатии в направлении осей 2 и 3: $|\varepsilon_{22}| > \varepsilon^c_{22}$ ($\varepsilon_{22} < 0$); $|\varepsilon_{33}| > \varepsilon^c_{33}$ ($\varepsilon_{33} < 0$);

при плоском сдвиге: $|\chi_{12}| > \Gamma_{12}$;

при неплоском сдвиге: $|\chi_{13}| > \Gamma_{13}$; $|\chi_{23}| > \Gamma_{23}$.

Когда несколько или все деформации отвечают критерию разрушения, начинается соответствующий процесс повреждения.

Для моделирования прогрессирующего разрушения разработанная модель содержит 9 критериев. Разрушение может проходить по трем ортотропным направлениям, при растяжении, при сжатии и при сдвиговом поведении. Разрушением управляют девять деформаций разрушения:

при растяжении в направлении оси 1: $\varepsilon_{11r} \geq \varepsilon_{11rf}$ ($\varepsilon_{11r} > 0$);

при сжатии в направлении оси 1: $|\varepsilon_{11c}| \geq \varepsilon_{11cf}$ ($\varepsilon_{11c} < 0$);

при растяжении в направлении осей 2 и 3: $\varepsilon_{22r} \geq \varepsilon_{22rf}$ ($\varepsilon_{22r} > 0$); $\varepsilon_{33r} \geq \varepsilon_{33rf}$ ($\varepsilon_{33r} > 0$);

при сжатии в направлении осей 2 и 3: $|\varepsilon_{22c}| \geq \varepsilon_{22cf}$ ($\varepsilon_{22c} < 0$); $|\varepsilon_{33c}| \geq \varepsilon_{33cf}$ ($\varepsilon_{33c} < 0$);

при плоском сдвиге: $|\chi_{12}| \geq \Gamma_{12f}$;

при неплоском сдвиге: $|\chi_{13}| \geq \Gamma_{13f}$; $|\chi_{23}| \geq \Gamma_{23f}$.

При наступлении разрушения элементы уничтожаются (эрозия). Разрушение возможно при разрушении только одной, нескольких или всех точек интегрирования конечно-элементной модели.

Параметры модели для конкретного композитного материала определяются экспериментальным путем.

Таким образом, модель позволяет учесть деградацию жесткостных характеристик композитного материала при растяжении, сжатии и сдвиге. При превышении пороговых значений деформаций происходит полное разрушение материала и удаление элемента расчетной области.

Программная реализация модели в ПП ЛОГОС

На основе разработанной 3D модели прогрессирующего разрушения ортотропных материалов при динамическом нагружении были сформулированы требования к заданию параметров модели в ЛОГОС-ПреПост, необходимые для реализации пользовательских интерфейсов. В соответствии с имеющейся технологией добавления в пакет программ ЛОГОС нового пользовательского материала был создан модуль, реализующий 3D модель прогрессирующего разрушения ортотропных материалов.

Блок-схема разработанного модуля представлена на рис. 2, где $Strg$ – массив, содержащий константы, описывающие материал.



Рис. 2. Блок-схема разработанного модуля

Для проверки работы процедуры, отвечающей за расчет тензора напряжений в материале (процедуры, реализующей модель материала), использовались задачи с заданным изменением компонент тензора деформаций в элементарной ячейке. Тестирование проводилось на элементарном объеме материала при реализации простого и сложного напряженно-деформированного состояния. Указанный подход позволяет верифицировать именно реализацию модели материала, исключая влияние остальных модулей расчетного комплекса, способных повлиять на точность решения: схему интегрирования уравнений, формулировку конечных элементов, контактные алгоритмы, схемы стабилизации решения и пр.

Значения параметров модели материала в задачах тестирования были взяты из работы [16], полученные результаты решения 15-ти задач подтверждают работоспособность реализованного модуля.

Решены две исследовательские задачи. Рассматривалась балка квадратного сечения 10×10 мм длиной 30 мм, консольно закрепленная с одного торца (ориентация балки – вдоль оси Z , рис. 3). На другом торце балки задавалось перемещение в направлении оси Y по закону заданному таблично (табл. 1).

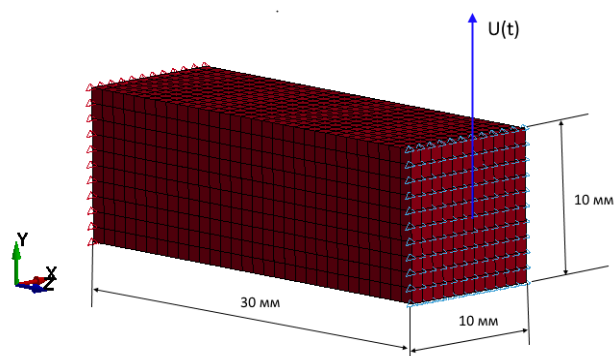


Рис. 3. Постановка задачи

Таблица 1
Закон смещения узлов торца балки

Время, мс	Смещение, мм
0	0
1	2

На рис. 4 приводится поле нормальных напряжений (МПа) в направлении оси Z в различные моменты времени. Ось Y на рисунках направлена вниз. Видно, что разрушение начинается на плоскости консольного закрепление в зоне сжатия, поскольку критическая деформация при сжатии в 2 раза меньше, чем деформация разрушения при растяжении.

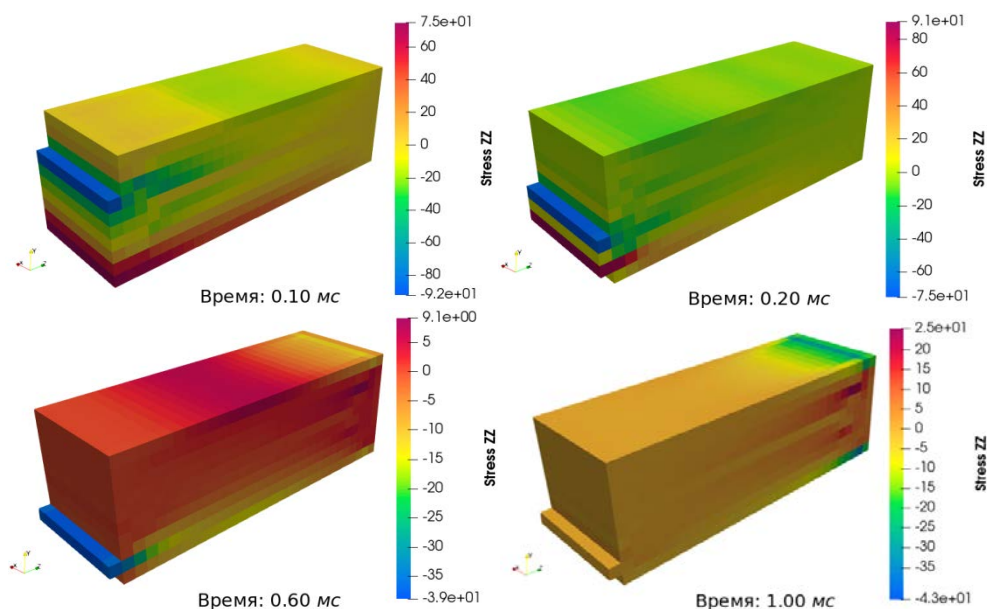


Рис. 4. Поле нормальных напряжений в направлении Z , Мпа

Рис. 5 иллюстрирует относительную массу удаленных элементов с течением времени.

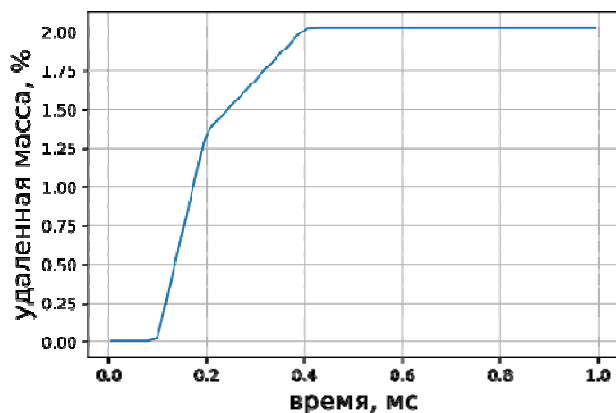


Рис. 5. Масса удаленных элементов

Далее рассматривалась задача о низкоскоростном ударе жесткого шарика по композиционной пластине. Диаметр шарика составлял 60 мм. Начальная скорость шарика 20 м/с. Размеры пластины 500×500 мм. Толщина пластины равна 2 мм. Пластина жестко закреплена по контуру.

На рис. 6 приводятся результаты расчета на разные моменты времени, отображен процесс деформирования и эрозии элементов.

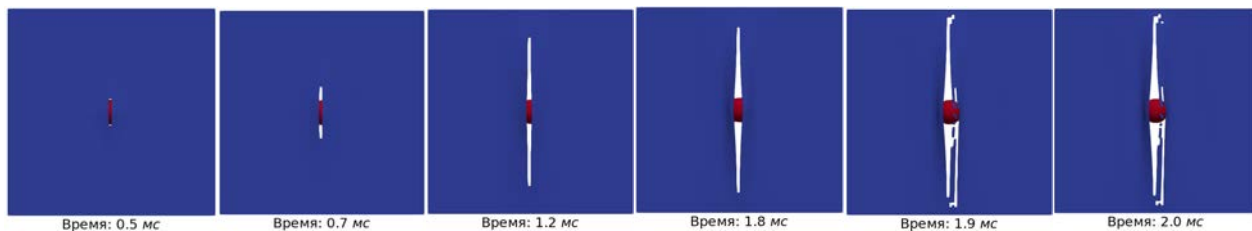


Рис. 6. Результаты решения задачи об ударном нагружении пластины шариком

Рис. 7 иллюстрирует относительную массу удаленных элементов с течением времени, определенную в расчетах с использованием ПП ЛОГОС.

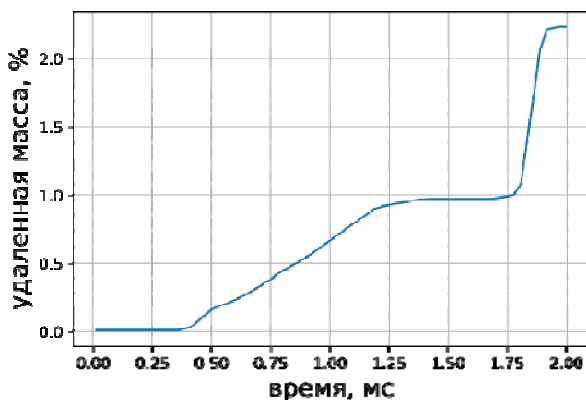


Рис. 7. Масса удаленных элементов

Заключение

Разработанная 3D модель прогрессирующего разрушения ортотропных материалов при динамическом нагружении позволяет учесть ортотропию деформационных и прочностных характери-

стик композиционного материала, а также различную скорость накопления поврежденности. Модель используется с объемными конечными элементами.

Модель достаточно хорошо описывает динамическое хрупкое разрушение ортотропного материала, однако не учитывает упрочнение материала и ряд иных нелинейных эффектов, сопровождающих процесс прогрессирующего разрушения композитных материалов. К недостаткам модели следует также отнести несвязанность процессов накопления повреждений и деградации свойств материала в разных направлениях и для разных знаков нагружения. Указанная модель может быть успешно использована для оценки прочности конструкций из композиционных материалов при нагружениях, для которых за точкой зарождения поврежденности наблюдается одномерное напряженно-деформированное состояние и сохраняется знак до достижения деформаций удаления элемента из расчета.

В соответствии с имеющейся технологией добавления в пакет программ ЛОГОС нового пользовательского материала был создан модуль, содержащий программный код, реализующий разработанную 3D модель прогрессирующего разрушения ортотропных материалов при динамическом нагружении. Решены контрольные и исследовательские задачи.

Литература

1. Gunel M., Kayran A. Non-linear progressive failure analysis of open-hole composite laminates under combined loading / *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2013. V. 15, No. 3. P. 309–339.
2. Эллул Б., Камиллери Д., Беттс Дж. Анализ прогрессирующего разрушения пластин из волокнисто-армированных композитов, подверженных изгибу из плоскости. *Механика композитных материалов*. 2013. Т. 49, № 6. С. 911–932.
3. Chen X., Li Z., and Wang H. Progressive failure analysis of an open-hole composite laminate by using the s-version finite-element method . *Mechanics of Composite Materials*. 2014. V. 50, No. 3. P. 279–294.
4. Чернякин С. А., Скворцов Ю. В. Анализ роста расслоений в композитных конструкциях // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. Решетнева*. 2014. Вып. 4(56). С. 249–258.
5. Shroff S., Kassapoglou C. Progressive failure modelling of impacted composite panels under compression // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. V. 34, No. 19. P. 1603–1614.
6. Козлов М. В., Шешенин С. В. Моделирование прогрессирующего разрушения слоистых композитов. *Механика композитных материалов*. 2015. Т. 51, № 6. С. 991–1006.
7. Абросимов Н. А., Елесин А. В. Численное моделирование нелинейного деформирования и прогрессирующего разрушения композитных цилиндрических оболочек при несесимметричных взрывных воздействиях. *Механика композитных материалов*. 2016. Т. 52, № 3. С. 547–562.
8. Беклемышева К. А., Васюков А. В., Ермаков А. С., Петров И. Б. Численное моделирование при помощи сеточно-характеристического метода разрушения композиционных материалов // *Матем. моделирование*, – 28:2 (2016), С. 97–110.
9. LS-DYNA® Keyword User's Manual Volume II Material Models March 26, 2012 (revision: 1275) Version 971 (LS-DYNA_Manual_Volume_II_R10.0.pdf) С. 879–886.
10. LS-DYNA® Keyword User's Manual Volume II Material Models LS-DYNA R10.0 10/16/17 (r:9024). С. 1114–1122. http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_II_R10.0.pdf.
11. Цибереv К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Обзор текущих возможностей для решения задач прочности // XIV международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование»: Сборник научных трудов. – Саров. 2013. С. 599–609.
12. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Цибереv К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов* 2018. Вып.1. С. 3–14.
13. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Цибереv К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения динамических задач прочности // *Супервычисления и математическое моделирование. Труды XVII Международной конференции / Под ред. Р. М. Шагалиева*. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. С. 210–219.

14. Абросимов Н. А., Баженов В. Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002.
15. Скудра А. М., Булавс Ф. Я. Прочность армированных пластиков. – М.: Химия, 1982.
16. Сергеичев И. В., Антонов Ф. К., Сафонов А. А., Ушаков А. Е. Оценка остаточной прочности элементов композитных конструкций после низкоскоростного удара // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 1. С. 36–44.

PROGRESSIVE FRACTURE SIMULATION OF ORTHOTROPIC MATERIALS UNDER DYNAMIC LOADING IN LOGOS SOFTWARE PACKAGE

N. A. Abrosimov, D. Yu. Dyanov, A. V. Elesin, A. Yu. Konstantinov

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

Composite materials are more and more widely used when developing modern structures of different purpose that undergo intensive pulse loading. And one of the basic problems here is selection of a computational model to evaluate the strength of the structural element with the account for several strain factors: complex stress-and strain state, the effect of progressing fracture, non-uniformities in the stress and strain fields, strain non-stationarity, the effect of strain rates etc.

The solution of this extensive problem is complicated by the fact that the destruction of composite materials is a multi-factor and multi-stage process that is realized at different scale and structure levels of composite materials. Besides, a characteristic specific feature of composite material structures lies in the fact that both the material and the structure are created at the same time – within one technological process. So, the development of strain and destruction models for composite materials is an urgent problem.

Different models of progressive fracture of orthotropic materials are used for computations on stress-and-strain state and evaluation of dynamic strength of structural elements of composite materials [1–8]. The goal of the present research is the development of 3D model of progressive fracture of orthotropic materials under dynamic loading (analogous to MAT_ORTHOTROPIC_SIMPLIFIED_DAMAGE LS-DYNA commercial software package [9, 10]). The developed model was introduced using the possibility to realize a user model of the material in LOGOS software package [11–13].

Key words: *simulation, orthotropic materials, LOGOS, composite materials.*