

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИТНОГО АНИЗОГРИДНОГО ЭЛЕМЕНТА

А. Е. Буров, Е. В. Москвичев

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярский филиал  
660049, просп. Мира, 53, г. Красноярск, Российская Федерация

В настоящей работе выполнено численное моделирование деформирования и разрушения композитного анизогридного элемента, спицы рефлектора космических антенн зонтичного типа, при кручении, чистом изгибе и осевом сжатии. Анализ выполнен на основе алгоритма прогрессирующего разрушения, который связывает зарождение и развитие повреждений с деградацией механических свойств.

## ВВЕДЕНИЕ

Анизогридные структуры состоят из двух симметричных систем спиральных ребер и системы кольцевых ребер, проходящих внутри участков спиральных ребер, расположенных между точками их пересечения. Композитные анизогридные элементы широко используются в несущих конструкциях современных космических аппаратов [1] (рис. 1). Их основное преимущество по сравнению со сплошными аналогами определяется весовой эффективностью, которая обусловлена сочетанием высоких удельных показателей механических свойств композитов и сетчатой топологией. Теоретические и экспериментальные исследования, посвященные методам анализа механического поведения и оптимального проектирования таких конструкций, достаточно хорошо представлены в литературе [2 - 7].

Несмотря на то что методы проектирования и анализа анизогридных элементов достаточно хорошо разработаны, некоторые аспекты их механического поведения требуют дополнительных исследований. Прежде всего это относится к моделированию возможных предельных состояний и прогнозированию несущей способности при различных видах нагружения [8].

В инженерной практике определение максимально возможной нагрузки для композитных элементов обычно основывается на критерии «разрушения первого слоя», который предполагает, что исчерпание несущей способности слоистого материала наступает при достижении напряжений своих предельных значений хотя бы в одном слое. Такая интерпретация наступления предельного состояния, как правило, ведет к консервативной оценке несущей способности. Хорошо известно, что разрушение композитных конструкций представляет собой многостадийный процесс, охватывающий различные масштабные уровни, а разрушение наименее прочного слоя является лишь его инициацией [9]. Это определяет актуальность разработки новых методов расчетов на прочность, учитывающих накопление повреждений и дискретный характер процесса разрушения.

В настоящей работе выполнено численное моделирование деформирования и разрушения композитного анизогридного элемента, спицы рефлектора космических антенн зонтичного типа, при кручении, чистом изгибе и осевом сжатии. Анализ выполнен на основе алгоритма прогрессирующего разрушения, который связывает зарождение и развитие повреждений с деградацией механических свойств композита.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ

Спица рефлектора антенны зонтичного типа представляет собой цилиндрическую оболочку, сетчатая структура которой сформирована из двух симметричных систем спиральных ребер и системы кольцевых ребер (рис.1). Спиральные ребра расположены под углами  $\pm\phi$  к продольной оси оболочки. Кольцевые ребра проходят через середины сегментов спиральных ребер, расположенных между точками их пересечения. Диаметр спицы составляет порядка 0,1 м; длина – 3 м; количество пар спиральных ребер – 8. Ребра имеют следующие параметры: площадь сечения 9 мм<sup>2</sup>; модули упругости материала по осям ортотропии  $E_1 = 160$  ГПа;  $E_2 = 8$  ГПа; модуль сдвига  $G_{12} = 3,8$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\nu_{12} = 0,32$ , угол наклона к продольной оси порядка 15 градусов.

Моделирование спицы рефлектора и процесса разрушения выполнено с помощью комплекса конечно-элементного анализа ANSYS [10]. Использовался 4-х узловой конечный элемент оболочки первого порядка с опцией слоистого тела. Внешняя нагрузка задавалась в виде перемещений концов спицы (рис. 3). В моделях учитывался процесс непрерывной намотки волокон на оправку спицы, который обуславливает увеличение сечения, возникающее при пересечении между собой спиральных ребер и спиральных и кольцевых ребер.

Моделирование деформирования и разрушения анизогридной спицы осуществлялось на основе алгоритма прогрессирующего разрушения, который включает следующий цикл: расчет напряженного состояния в элементах; проверку выполнения критериев разрушения и идентификацию его типа (4 типа - разрушение волокон и матрицы при сжатии и растяжении), используя подход Хашина [11]; определение параметров поврежденности и перерасчет на их основе жесткостных характеристик материала поврежденных элементов; линейное приращение нагрузки, если конструкция сохраняет несущую способность. Основные соотношения для поврежденного ортотропного материала и закон накопления повреждений представлены на рис. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Инициация разрушения анизогридной структуры при всех видах нагружения возникает в областях пересечения спиральных ребер по механизму разрушения волокон, затем в этих местах возникают повреждения по механизму разрушения матрицы. При возрастании нагрузки повреждения на пересечениях спиральных и кольцевых ребер. Для случая осевого сжатия спицы инициация разрушения на пересечении спиральных и спиральных/кольцевых ребер возникает практически при одной и той же нагрузке. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к развитию поврежденности и локализации разрушения в указанных зонах, что ведет к потере несущей способности всей конструкции. Вид нагружения определяет не только распределения повреждений в элементе конструкции, но и скорость развития поврежденности от инициации повреждений до окончательного разрушения (следовательно, и относительную скорость деградации механических свойств композита).

Кинетика накопления повреждений в наиболее нагруженных частях спицы для различных расчетных схем при различном уровне от предельной внешней нагрузки представлены на рис. 4-6. На шкале указано значения параметра поврежденности. Выполненные исследования показали эффективность анализа прогрессирующего разрушения в прогнозировании показателей прочности и живучести анизогридных структур. Результаты также могут быть использованы для оценки механического поведения анизогридных конструкций при различных уровнях исходной поврежденности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Vasiliev VV, Razin AF. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications // Composite Structures. 2006. V. 76. P. 182-189.
- Vasiliev VV, Barynin VA, Rasin AF, Petrokovskii SA, Khalimanovich VI. Anisogrid composite lattice structures – development and space applications // Composites and Nanostructures. 2009. V.3. P. 38-50.
- Анизогридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике / Васильев В. В., Барынин В.А., Разин А. Ф. и др. // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38-50.
- Vasiliev VV, Barynin VA, Razin AF. Anisogrid composite lattice structures – development and aerospace applications // Composite Structures. 2012. V.94. P. 1117-1127.
- Totaro G, Gurdal Z. Optimal design of composite lattice shell structures for aerospace applications // Aerospace Science and Technology. 2009. V.13. P. 157-164.
- Paschero M, Hyer MW. Axial buckling of an orthotropic circular cylinder: Application to orthogrid concept // International Journal of Solids and Structures. 2009. V.46. P. 2151-2171.
- Totaro G. Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells // Composite Structures. 2012. V. 94. P. 446-452.
- Азиков Н.С., Зинин А.В. Модель процесса разрушения анизогридной композитной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 49-56.
- Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5-7.
- ANSYS User Manual. ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, USA.
- Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites // ASME Journal of Applied Mechanics. 1980. V. 47, P. 329-334.

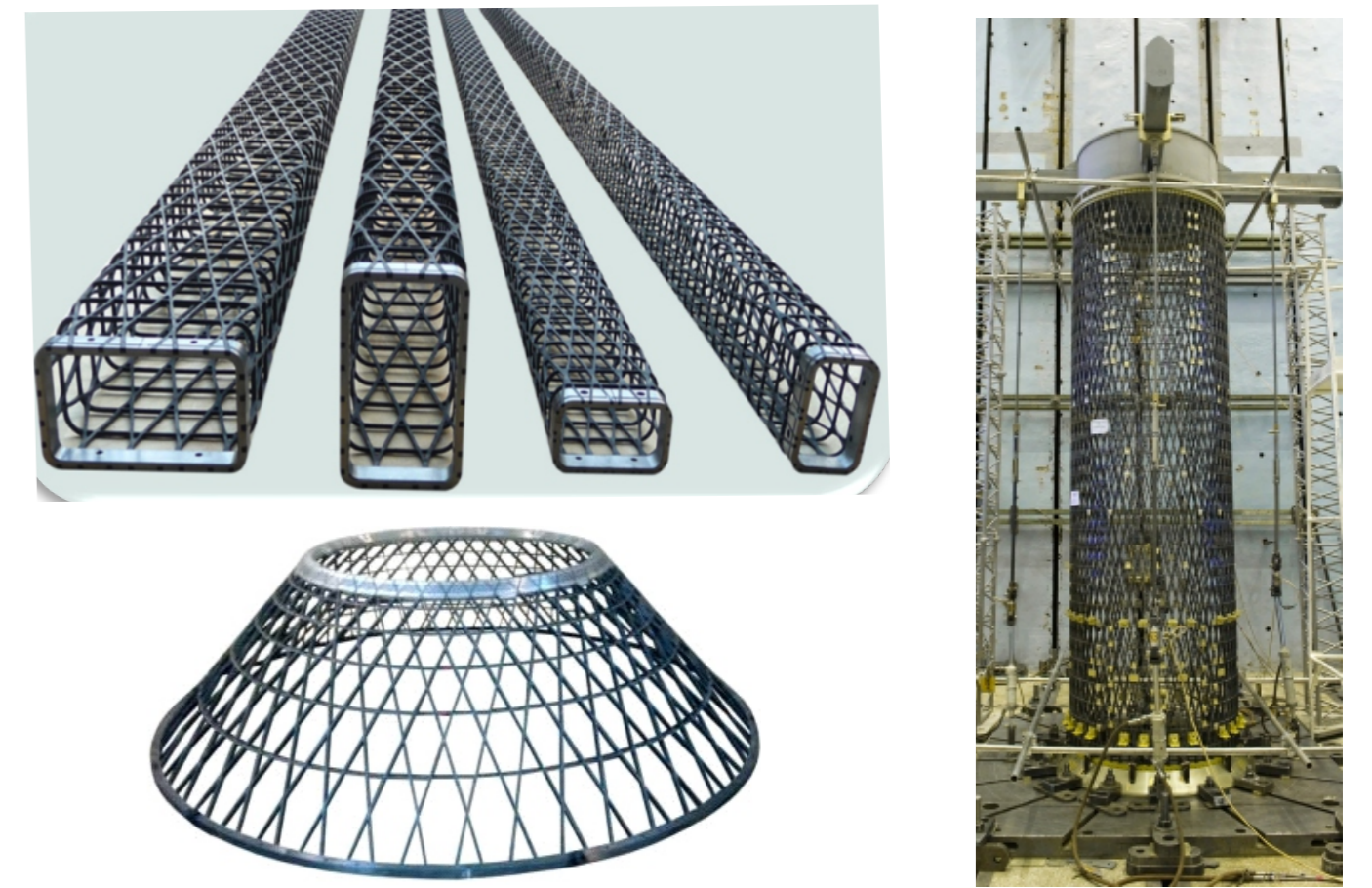


Рис. 1 - Анизогридные конструкции космических аппаратов

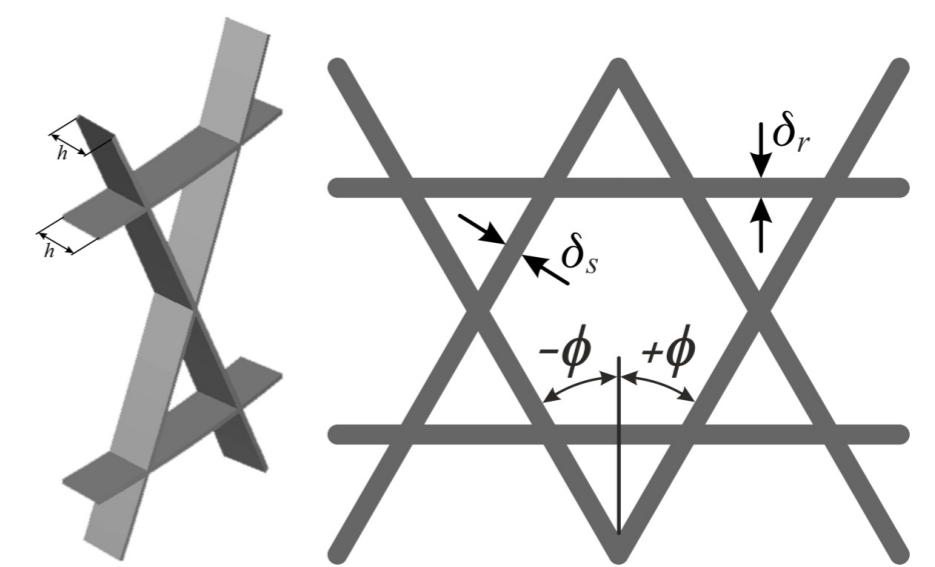


Рис. 2 - Геометрические параметры сетчатой структуры

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} S_{11}/(1-d_r) & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22}/(1-d_m) & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33}/(1-d_m) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}/(1-d) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}/(1-d_s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}/(1-d_s) \end{bmatrix}^{-1}$$

Разрушение волокон при растяжении  $u_{eq} = L_e \sqrt{\epsilon_{11}^2 + \alpha \epsilon_{12}^2}$   
 $\sigma_{eq} u_{eq} = L_e (\sigma_{11} \epsilon_{11}) + \alpha \sigma_{12} \epsilon_{12}$

Разрушение волокон при сжатии  $u_{eq} = L_e (-\epsilon_{11})$ ,  $\sigma_{eq} = (-\sigma_{11})$

Разрушение матрицы при растяжении  $u_{eq} = L_e \sqrt{\epsilon_{22}^2 + \epsilon_{12}^2}$   
 $\sigma_{eq} u_{eq} = L_e (\sigma_{22} \epsilon_{22}) + \sigma_{12} \epsilon_{12}$

Разрушение матрицы при сжатии  $u_{eq} = L_e \sqrt{(-\epsilon_{22})^2 + \epsilon_{12}^2}$   
 $\sigma_{eq} u_{eq} = L_e (-\sigma_{22} \epsilon_{22}) + \sigma_{12} \epsilon_{12}$

$\sigma_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и деформаций,

$\langle \alpha \rangle = (\alpha + |\alpha|) / 2$ ,  $L_e$  – характерный размер элемента.

Параметр поврежденности  $d = 1 - \frac{u_{eq}^0 (u_{eq}^c - u_{eq}^0)}{u_{eq}^c (u_{eq}^c - u_{eq}^0)}$ ;  $u_{eq}^0 \leq u_{eq} \leq u_{eq}^c$

$u_{eq}^0$  эквивалентные перемещения инициации разрушения.



Рис. 3 - Определяющие соотношения для ортотропного поврежденного материала

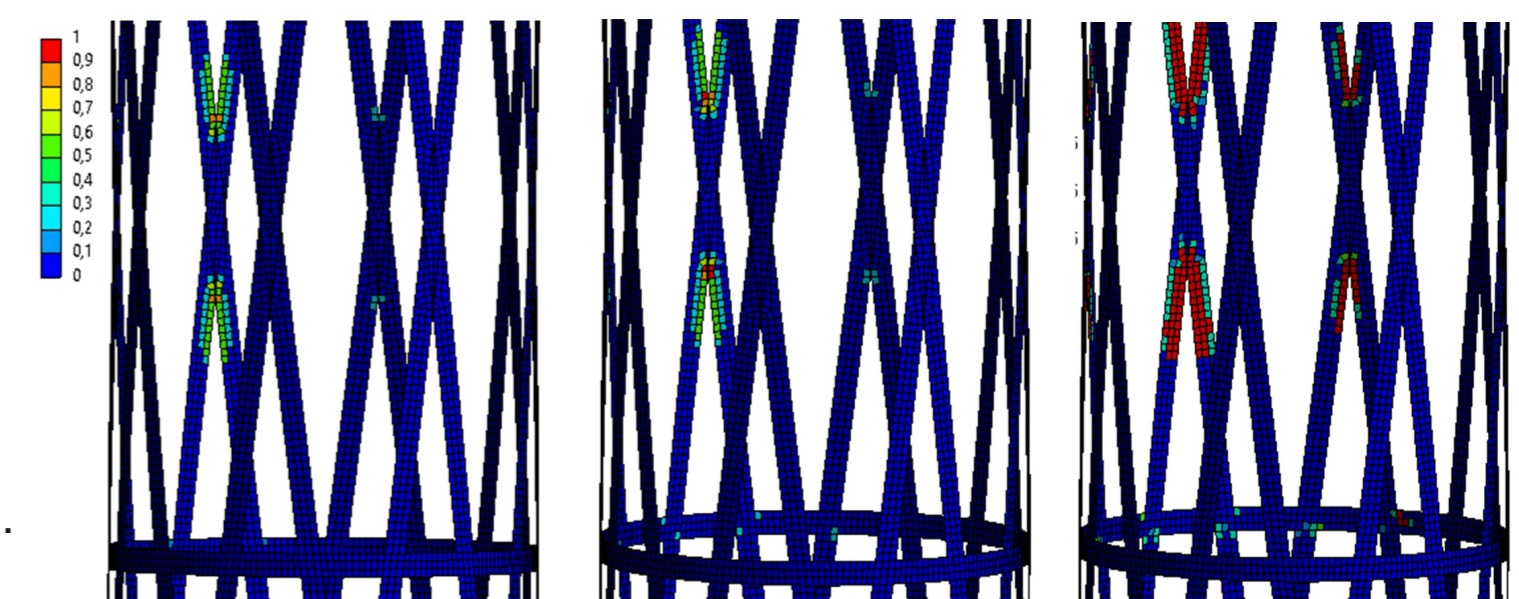


Рис. 4 - Развитие повреждений в анизогридной спице при кручении

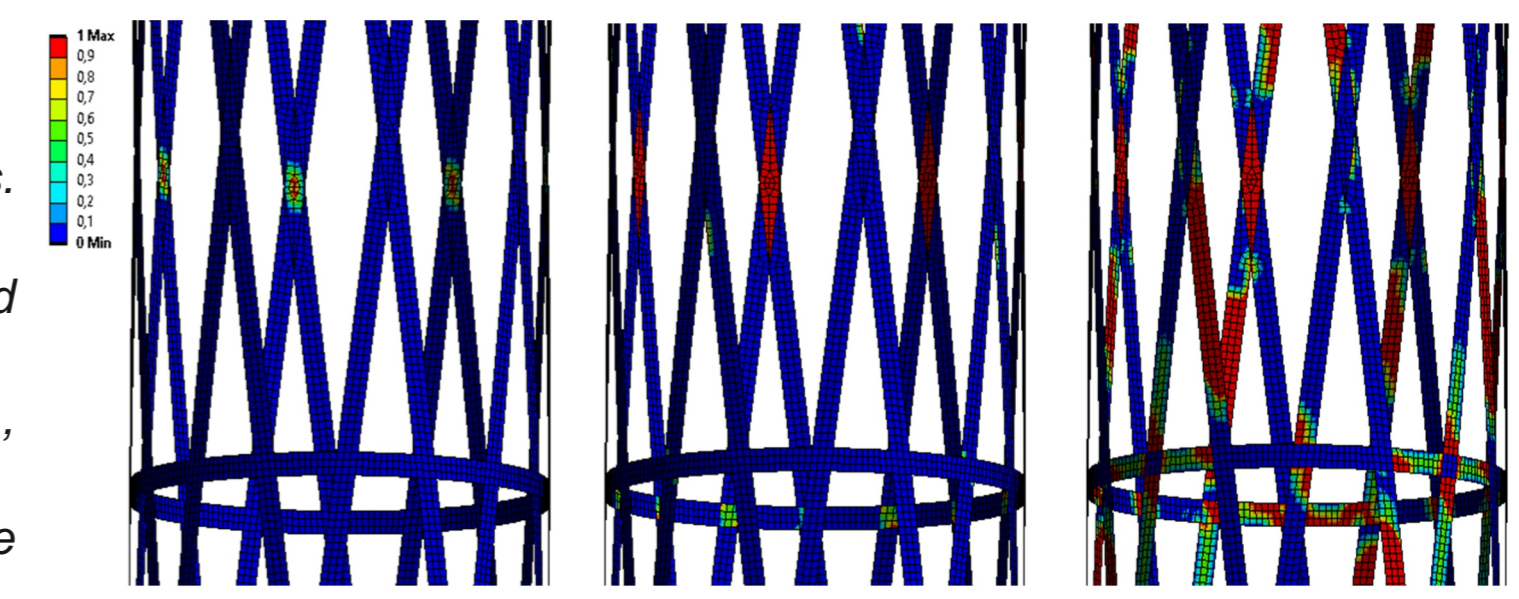


Рис. 5 - Развитие повреждений в анизогридной спице при чистом изгибе

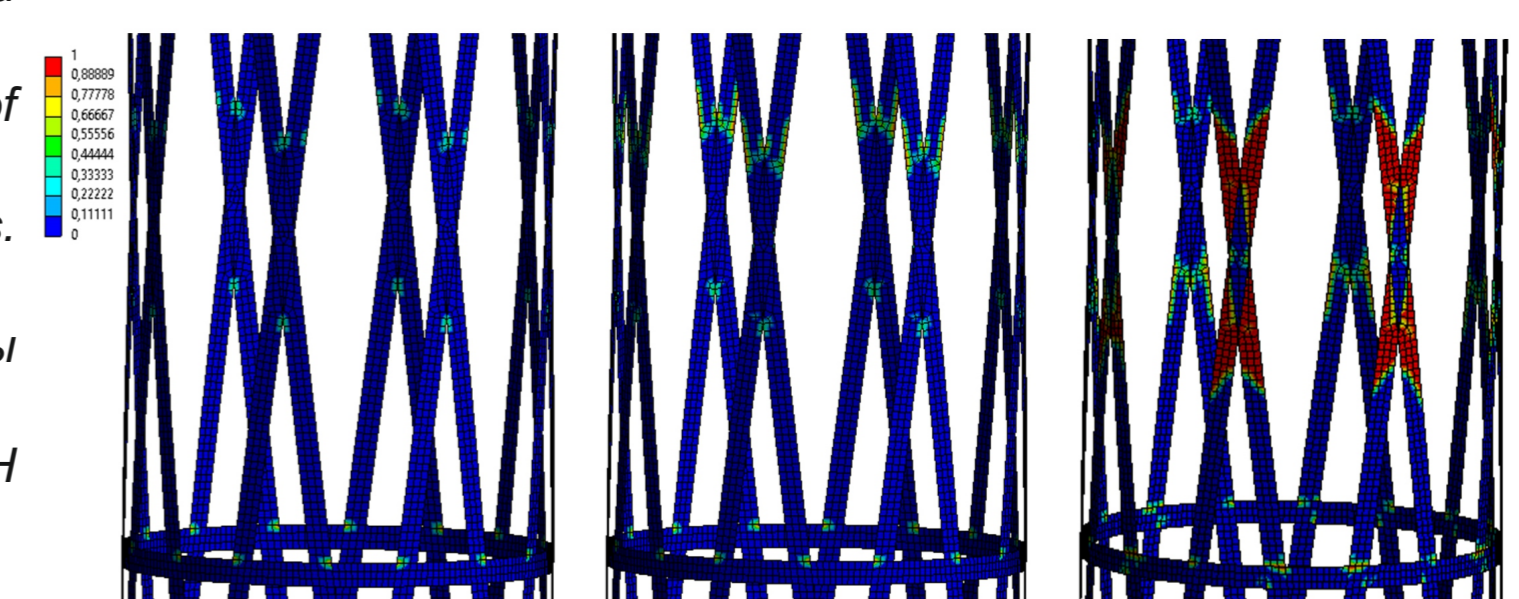


Рис. 6 - Развитие повреждений в анизогридной спице при осевом сжатии