

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**COMPUTER SIMULATION OF DEFORMATION AND  
DESTRUCTION OF COMPOSITE MATERIALS**

**Омелюсик А. В.**, канд. техн. наук, **Шмелев А. В.**, канд. техн. наук,  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь  
A. Amialiusik, Ph. D. in Eng., A. Shmialiou, Ph. D. in Eng.,  
The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus,  
Minsk, Belarus

*Приведены результаты испытаний на растяжение образцов стеклопластиков из тканей TR-0,56 и T-10(80). Исследовались образцы с углами ориентации волокон к направлению прикладываемой нагрузки 0°, 45°, 90°. Представлены методические рекомендации к определению значений параметров модели пластического деформирования тканевых стеклопластиков. Выполнена валидация полученных параметров модели материала путем компьютерного моделирования механических испытаний на растяжение образца стеклопластика из ткани TR-0,56 в программном комплексе ANSYS LS-DYNA с использованием гомогенного типа модели и критериев разрушения.*

*The results of tensile tests on fiberglass samples made from TR-0.56 and T-10(80) fabrics are presented. Samples with fiber orientation angles to the direction of the applied load of 0°, 45°, 90° were studied. Methodological recommendations for determining the values of the parameters of the model of plastic deformation of fabric fiberglass are presented. The obtained parameters of the material model were validated by computer simulation of mechanical tensile tests of a fiberglass sample made of TR-0.56 fabric in the ANSYS LS-DYNA software package using a homogeneous model type and failure criteria.*

**Ключевые слова:** *стеклопластик, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, прочность, гомогенная модель материала, ANSYS LS-DYNA.*

**Keywords:** *fiberglass, computer modeling, finite element method, strength, homogeneous material model, ANSYS LS-DYNA.*

## ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития техники заключаются в снижении веса силовых конструкций машин и компонентов. Это требует, в том числе, применения новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные материалы. Основным классом таких материалов, обеспечивающих минимизацию массы конструкции и высокую прочность, являются стеклопластики [1]. Как правило, они состоят из стеклянного наполнителя и синтетического полимерного связующего [2]. Наибольшей прочностью и жесткостью обладают стеклопластики, содержащие ориентированно расположенные непрерывные волокна. Изменяя ориентацию волокон, можно в широких пределах регулировать механические свойства изделия.

При численном решении прикладных задач механики деформируемого твердого тела проводят экспериментальные исследования механических свойств стеклопластиков. Результаты испытаний используются для идентификации значений параметров компьютерных моделей материала, описывающих свойства конструкции, исследуемой с применением специализированных программных комплексов. Как правило, для реализации численного моделирования используются программные средства на основе метода конечных элементов (МКЭ), такие как ANSYS, Abaqus, LS-DYNA и др. При этом главным вопросом в процессе практического использования МКЭ является корректность выбора модели материала, т.е. модели деформирования и разрушения, а также определение соответствующих значений параметров выбранных моделей, описывающих свойства конкретного материала.

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

В работе [3] приводится достаточно полный перечень существующих подходов, применяемых при численном моделировании стеклопластиков в зависимости от уровня детализации рассмотрения состава материала.

Для практических расчетов распространение получили подходы макроуровня, основанные на гомогенном описании свойств материала, мезоуровневое моделирование на уровне слоев и на уровне нитей, микроуровневое моделирование на уровне представительных ячеек ткани. Моделирование на уровне волокон в пучке нити, которое также можно отнести к микроуровневому, используется гораздо реже и преимущественно для описания узкого класса специфических явлений. Остальные подходы относятся к молекулярному уровню и применяются только в фундаментальных исследованиях.

В программном комплексе ANSYS LS-DYNA используется широкий ряд моделей деформирования и разрушения стеклопластиков. С целью определения значений параметров моделей материалов тканевых стеклопластиков необходимо выполнить следующие этапы:

1. Провести экспериментальные исследования механических характеристик стеклопластиков с различной ориентацией армирующих волокон.

*Испытания проводятся путем растяжения образцов стеклопластиков, подготовленных по ГОСТ 11262-2017 [4]. Рекомендуемые углы расположения волокон в образцах 0°, 45° и 90°;*

2. Выполнить компьютерное моделирование натурального эксперимента с учетом полученных при испытаниях свойств материалов.

*Моделирование осуществляется в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA. Рекомендуется применять модель упруго-пластического деформирования материала MAT\_059 COMPOSITE\_FAILURE\_SOLID\_MODEL, которая позволяет учитывать разрушение стеклопластика по девяти критериям. Полученные в эксперименте механические характеристики стеклопластика задаются в модель материала, а недостающие данные допускается задавать путем корректировки параметров материала-аналога;*

3. Дать качественную и количественную оценку полученным результатам компьютерного моделирования эксперимента.

*Качественная оценка заключается в сопоставлении характера разрушения стеклопластика, полученного при эксперименте и расчете. Сопоставление выполняется для образцов с разным расположением волокон. Также необходимо провести сопоставление результатов по значению предела прочности при растяжении, возникающем в образце при расчете и эксперименте. Погрешность по данному критерию, как правило для материалов, не должна превышать 5 % [5];*

4. Выработать рекомендации по дальнейшему использованию полученных значений параметров моделей стеклопластиков.

*Полученные значения параметров могут использоваться для расчета более сложных деталей машиностроения, таких как кузова автомобилей, панели обшивки и т.д. Так же значения параметров могут использоваться при валидации расчетных моделей и анализе прочностных характеристик стеклопластиков при различных углах ориентации волокон.*

Разработанные методические подходы позволяют определять значения параметров моделей пластического деформирования стеклопластиков и проводить расчетную оценку прочности более сложных изделий машиностроения.

## АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Для определения механических характеристик стеклопластиков были проведены испытания плоских образцов на основе стеклотканей TP-0,56 и T-10(80) при углах ориентации волокон  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ . Испытания по определению механических свойств проводилось на универсальной гидравлической испытательной машине INSTRON Satec 300LX, обеспечивающей погрешность измерения нагрузки не более 0,5% от измеряемого значения. Для регистрации деформаций использовался экстензометр INSTRON 2630-107 GL25MM с погрешностью измерения деформации не более 0,1 %.

В программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA PC (R800) была разработана гомогенная объемная конечно-элементная модель испытательного образца стеклопластика из ткани TP-0,56. Описание свойств материала образца выполнялось

с использованием модели материала MAT\_059 COMPOSITE\_FAILURE\_SOLID\_MODEL. Эта модель имитирует повреждение материала на основе трехмерного критерия разрушения по растягивающим, сжимающим и сдвиговым напряжениям.

Значения механических характеристик стеклопластика, включающие модуль упругости и прочность на растяжение в двух взаимоперпендикулярных плоскостях, приняты по результатам экспериментальных исследований. Недостающие значения механических характеристик приняты по литературным источникам [6]. Начальные и граничные условия соответствовали проведенным натурным испытаниям. Одна из захватных частей образца фиксировалась, а другой задавалось перемещение вдоль оси образца, тем самым вызывая его растяжение.

Расчет выполнен для образцов с ориентацией волокон  $0^\circ$  и  $45^\circ$ . На рис. 1 представлено сравнение разрушения натурального образца и компьютерной модели для образца с углом ориентации волокон  $45^\circ$ .

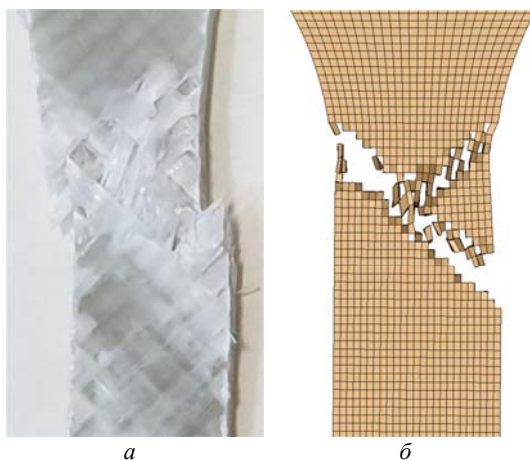


Рисунок 1 – Разрушение образца стеклопластика из ткани TP-0,56 с ориентацией волокон  $45^\circ$ :  
*a* – эксперимент, *б* – расчет

Как видно из рисунка, в расчетной модели разрушение образца происходит под углом  $45^\circ$  к направлению прикладываемой растягивающей нагрузки, что говорит о качественном соответствии процесса деформирования и разрушения, корректном выборе и задании

свойств модели материала в программном комплексе ANSYS LS-DYNA. При этом погрешность расчета по пределу прочности стеклопластика составила для образца с углом ориентации волокон  $0^\circ$  – 1,8%, с углом  $45^\circ$  – 3,0%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методические подходы определения параметров моделей деформирования волокнистых стеклопластиков позволят проводить расчетные исследования более сложных деталей машиностроительных конструкций, таких как кузовов автомобилей, панелей обшивки автобусов, бамперов, внутренней отделки и др. Также принятые подходы позволят выполнять валидацию расчетных моделей с учетом испытаний образцов стеклопластиков и давать рекомендации по расположению волокон в композите с целью снижения массы или обеспечения требуемой прочности и жесткости деталей и конструкций машин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы (часть 1) : учеб. пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов ; под. авт. ред. – А. Г. Филимошкина. – Томск: Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т, 2013. – 117 с.
2. Тулаева, Н. Н. Оценка прочности элементов конструкций из хаотически армированного стеклопластика : поясн. зап. к вып. квал. раб. / рук. С. Б. Сапожников. – Челябинск: Южн.-Ур. гос. ун-т, 2019. – 85 с. – 50403.2019.417. ПЗ ВКР.
3. Жихарев, М. В. Оценка прочности высоконагруженных пластин из композитных материалов при локальном ударном воздействии : дис. ... канд. тех. наук : 01.02.04 / Жихарев Михаил Владимирович. – Челябинск, 2019. – 125 с. – Библиогр.: с. 105–125.
4. ГОСТ 11262–2017 Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Методы испытания на растяжение. – Введ. 2018–10–01. М. : Стандартинформ, 2018. – 24 с.
5. Шмелев, А. В. Расчетно-экспериментальное определение параметров модели упрочнения материалов Купера-Саймондса для металлических балок / А. В. Шмелев, А. В. Омелюсик, В. И. Ивченко, С. В. Хитриков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – вып. 5.

6. Балданов, А. Б. Моделирование процессов деформирования и разрушения слоистых композиционных материалов при локальном ударе / А. Б. Балданов, Л. А. Бохоева, А. С. Бочектуева // Динамика механизмов и машин. – 2021. – Т. 9, № 6. – С. 2–7.

Представлено 16.05.2024