

минимизирует человеческий фактор за счет полной механизации процесса. Однако существует проблема усталостного разрушения сварного соединения [1, 2].

Причинами разрушения являются неоднородность химического состава, недостаточная шероховатость поверхности свариваемых кромок, осевое смещение в сварочной головке, каплеударная эрозия, межкристаллитная коррозия и др. При выведении решения перечисленные факторы учитывались как отдельно взятые, так и в совокупности.

Легирование церием или иттрием приводит к образованию интерметаллидных включений, а именно CeFe_5 и CeFe_2 , которые очень благотворно влияют на структуру и свойства в целом. Помимо этого, образуются и другие тугоплавкие соединения в виде оксидов и даже соединения с серой, которое разлагается, за счет чего и происходит десульфурация.

Но стоит отметить, что количество серы и кислорода нужно снижать до концентраций 0,015 % и меньше для наибольшего эффекта еще до введения РЗМ [3].

Существует огромное множество техник введения легирующих компонентов в материал, однако при сварке речь идет о присадочном материале. Для усиления сварного соединения необходим присадочный материал с большой долей содержания церия или иттрия, так как именно они оказывают наибольшее влияние в данном процессе. В итоге сварное соединение получается практически равнопрочным материалу основы, еще до термической обработки, которая необходима для введения изделия в эксплуатацию. Ввиду вышеизложенного, одно из рациональных решений массы вопросов по причинам разрушения трубопроводов, которые работают в агрессивных средах и экстремальных условиях – легирование сварного соединения, которое, очевидно, в данном случае является слабым звеном.

Список литературы

1 Effect of Thin Polymer Coatings on the Mechanical Properties of Steel Plates / A.V. Babaytsev [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2017. – Vol. 2017, no 13. – P. 1170–1175.

2 Применение пантографической конструкции, полученной методом SLM-печати, и исследование влияния постобработки с нанесением демпфирующих покрытий / А. А. Зайцев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 83–89.

3 Davies, I. G. Metals Technology / I. G. Davies, M. Randle, R. Widdouson. – 1974. – S. 241/48.

УДК 539.3

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕКРЕСТНО-АРМИРОВАННОГО АУКСЕТИЧНОГО КОМПОЗИТА

Д. А. ЧЕРНОВС

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время в различных отраслях строительства и машиностроения широко используются волоконно-армированные композиты на полимерных матрицах. Изменяя направление армирования и комбинируя элементы с различной ориентацией волокон, можно в широких диапазонах варьировать значения механических характеристик данных анизотропных материалов. В частности, при определенных условиях коэффициента поперечной деформации (коэффициенты Пуассона) перекрестно-армированного слоистого эластомера принимают отрицательные значения [1]. Определению эквивалентных упругих характеристик армированных ауксетичных (с отрицательным коэффициентом Пуассона) материалов посвящен ряд научных публикаций [1, 2]. Описанная в данных работах расчетная методика основана на элементарной теории армирования [2]. При этом приемлемая точность расчетных оценок обеспечивается только для относительно малых (менее 20 %) значений объемной доли волокон. Кроме того, в известных публикациях не уделяется должного внимания прогнозу характеристик прочности исследуемых материалов.

В связи с вышесказанным целью настоящего исследования является совершенствование математической модели перекрестно-армированного ауксетичного композита, направленное на уточнение прогноза упругих характеристик, а также на получение расчетных оценок параметров прочности композита.

В перекрестно-армированном композите (рисунок 1) волокна переплетены так, что угол между двумя направлениями армирования составляет 2α [1]. Сам α может изменяться от 0 до 90°. Объем-

ные доли волокон для обоих направлений армирования одинаковы. Полученный таким образом композит является ортотропным и имеет три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии, которые совпадают с координатными плоскостями в системе XYZ (рисунок 1).

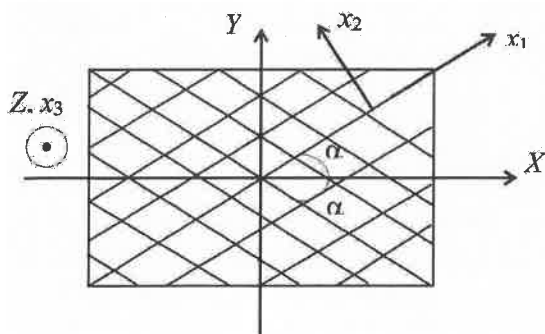


Рисунок 1 – Структура перекрестно-армированного ортотропного ауксетичного композита

При расчете эквивалентных упругих характеристик перекрестно-армированного композита первоначально задаются компоненты матрицы упругих податливостей одноосно-армированного композита в системе координат $x_1x_2x_3$ (см. рисунок 1). Для этого используется трехфазная модель волоконно-армированного композита, подробно описанная в монографии [3]. Затем по известным соотношениям теории упругости [4] производится перерасчет компонент матрицы податливостей для системы координат, повернутой относительно системы $x_1x_2x_3$ на угол α вокруг оси x_3 . Определяется матрица модулей упругости как обратная к матрице упругих податливостей. Структура поперечно-армированного композита позволяет определять матрицу модулей упругости данного композита путем простого усреднения соответствующих матриц для угла α и $-\alpha$. Затем определяется матрица упругих податливостей для поперечно-армированного композита. Зная компоненты этой матрицы, можно определить все характеристики упругости композита. В рамках настоящего исследования изучались, главным образом, модуль упругости E_X , соответствующий оси X , и коэффициент Пуассона ν_{XZ} , определяющий деформацию вдоль оси Z при нагружении вдоль оси X .

При оценке прочности композита первоначально задается определенный режим нагружения. Не снижая общности дальнейших выкладок, будем рассматривать одноосное напряженное состояние при котором отлична от нуля только одна компонента тензора макроскопических напряжений – σ_{XX} . Затем, используя ранее вычисленные значения эквивалентных характеристик композита, определяются значения макроскопических деформаций в системе XYZ . Производится перерасчет компонент тензора деформаций для вспомогательной системы координат $x_1x_2x_3$ (см. рисунок 1). Данные деформации являются макроскопическими для трехфазной модели одноосно-армированного композита. Эта модель позволяет не только определить упругие характеристики композита, но и описать напряженно-деформированное состояние армирующего элемента и приграничного объема матрицы. Для этого константы в общих решениях задачи теории упругости в перемещениях [3] следует умножить на соответствующие макроскопические деформации, определенные описанным выше способом. Зная распределение компонент упругого смещения, по известным формулам теории упругости [4] устанавливается распределение компонент тензора напряжений для элементов трехфазной модели (волокна и матрицы). После этого определяется распределение интенсивности тензора напряжений. Для каждого элемента трехфазной модели (волокно и приграничный объем матрицы) определяется максимальное значение интенсивности σ_u . В рамках настоящего исследования пределом текучести композита σ_{Tk} при рассматриваемом режиме нагружения будем считать значение осевого напряжения σ_{XX} , при котором максимальное значение интенсивности тензора напряжений в матрице достигает предела текучести материала матрицы σ_{Tm} .

Таким образом, в результате исследований разработана новая методика расчетного определения деформационно-прочностных характеристик перекрестно-армированных композитов, проявляющих свойство ауксетичности. Данная методика основана на использовании трехфазной модели однонаправлено армированного композита. В качестве расчетного примера рассматривался перекрестно-армированный композит, в котором резиновая смесь армирована синтетическим кордом [5]. Показано, что ранее использованная для анализа подобных композитов упрощенная методика приводит к заниженным расчетным оценкам модуля упругости E_X и завышенным (по модулю) оценкам коэффициента Пуассона ν_{XZ} исследуемого материала. Получены зависимости предела текучести композита при симметричном относительно перекрестных направлений армирования одноосном напряженном состоянии от угла между направлениями армирования и нагружения. Установлено, что в диапазоне значений угла армировки, соответствующем проявлению свойства ауксетичности ($5 < \alpha < 40^\circ$), предел текучести композита превышает соответствующее значение для материала матрицы. При значениях данного угла более 40° предел текучести композита меньше предела текучести матрицы и практически не изменяется при дальнейшем увеличении угла армировки.

Список литературы

- 1 Textile Structural Composites / ed. by T.-W. Chou and F. Ko. – Amsterdam – Oxford – New York – Tokio : Elsevier, 1989. – 420 p.
- 2 **Малмейстер, А. К.** Сопротивление жестких полимерных материалов / А. К. Малмейстер, В. П. Тамуж, Г. А. Тетерс. – Рига : Зинатне, 1972. – 500 с.
- 3 **Кристенсен, Р.** Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М. : Мир, 1982 – 334 с.
- 4 **Старовойтов, Э. И.** Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2001. – 344 с.
- 5 **Хотько, А. В.** Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности / А. В. Хотько, С. В. Шилько, С. Н. Бухаров // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 4. – С. 11–18.

УДК 539.3;539.4.

РАЗРАБОТКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХСЖИМАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИДЕ НАПРАВЛЕННО-АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛО- И УГЛЕПЛАСТИКОВ

*С. В. ШИЛЬКО, Т. В. ДРОБЫШ, А. П. САЗАНКОВ,
Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

*С. И. РОМАНОВИЧ
ОАО «Пеленг», г. Минск, Республика Беларусь*

Обсуждаются возможности создания инновационных сверхсжимаемых материалов конструкционного назначения, обладающих аномально низким коэффициентом Пуассона, путем направленного армирования полимерной/эластомерной матрицы стекло- и углеродными тканями. Изготовлены композиты с различной схемой укладки волокон и проведены статические испытания указанных материалов на растяжение и изгиб. Определены значения модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве, а также предел прочности и модуль упругости при изгибе. Анализируются особенности деформационного поведения и области использования исследуемых композитов.

В настоящее время внимание материаловедов привлекают методы повышения эксплуатационных характеристик изделий путем реализации нетривиальных (аномальных) деформационных свойств. К таким аномалиям можно отнести специфическую моду деформирования сверхсжимаемых материалов с близким к нулю и даже отрицательным коэффициентам Пуассона ν (ауксетиков), способных расширяться/сужаться в направлении, перпендикулярном направлению растяжения/сжатия соответственно.

Существование материалов с аномально низкими значениями коэффициента Пуассона допускается соотношениями теории упругости. Для изотропных тел верхний предел $\nu = 0,5$ соответствует несжимаемым материалам типа резины и полиуретана, деформирующимся с сохранением объема при изменении формы, а нижний предел коэффициента Пуассона $\nu = -1$ проявляется в сохранении геометрических пропорций образца при изменении его объема.

Ряд природных, в том числе биологических, материалов демонстрирует сверхсжимаемость (пробка) и ауксетичное (разновидности кварца, древесина в определенных направлениях) поведение. Создание искусственных ауксетиков отражает современную тенденцию проектирования структуры инновационных метаматериалов с заранее заданными свойствами. Обилие публикаций последних лет, описывающих результаты исследований и технические приложения ауксетиков в виде пористых и дисперсно-наполненных материалов, отражено в ряде обобщающих статей, включая первый русскоязычный обзор [1–5].

Деформационные особенности рассматриваемых аномально упругих материалов могут быть использованы в различных технических инновациях. Так, свойственное им повышенное поглощение энергии обеспечивает отличную демпфирующую способность и звукопоглощение; значительное