

УДК 692.47

Д. А. КОЖАНОВ, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики; А. В. ГУРИН, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМЕ РАСЧЕТА СОЕДИНЕНИЙ ТЕНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ОБЗОР)

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел. (831) 430-54-88;
эл. почта: artemxan96@mail.ru

Ключевые слова: тканые композиты полотняного плетения, тентовые конструкции, соединения тентов, мембраны с полимерным покрытием.

Приводится обзор современных научных и нормативных источников по тематике: «Расчет соединений тентовых конструкций». Проведен анализ отечественных норм с прикладной точки зрения. Приведены данные публикаций, касающиеся испытаний тентовых материалов, влияния концентраторов напряжений на прочность и вязкость разрушения образцов, критерии для проверки прочности образца, исследования поведения тканей под воздействием природных условий, данные о процессе разрушения, а также влияния длительности нагрузки на механические характеристики композита.

В конце статьи приводится список использованных сокращений: КСТ, НДС, ПВХ, ПТФЭ, ПУ.

Тенты являются перспективным типом конструкции, сочетающим в себе следующие положительные свойства: низкая масса, быстровозводимость и возможность быстрого демонтажа, простота транспортировки, эстетичность и архитектурная выразительность (рис. 1). В то же время конструкция имеет ряд особенностей, усложняющих ее проектирование: анизотропия свойств, физическая нелинейность и большие деформации, вязкоупругое поведение, старение и повреждаемость мембраны в результате природных воздействий, зависимость механических характеристик от температуры, сложная модель разрушения и, как правило, двухосное НДС. Исследований материалов мембран и самих оболочек достаточно много [1–13], чего нельзя сказать об исследованиях соединений и узлов оболочек [14, 15].

На данный момент вопрос о расчете соединений тентовых конструкций проработан недостаточно. Практически отсутствуют экспериментальные исследования соединений, а также не существует методики оценки их несущей способности. В опубликованных исследованиях [14, 15] не выведен четкий критерий прочности, но приводятся конструкционные параметры соединений, при которых наблюдаются характерные сценарии разрушения. В данных исследованиях [15] не учтен важнейший фактор – фактор влияния угла направления нагрузки по отношению к нитям на прочность и жесткость композита. Этим обусловлена необходимость проведения экспериментальных исследований для разработки методики расчета соединений тентовых конструкций.

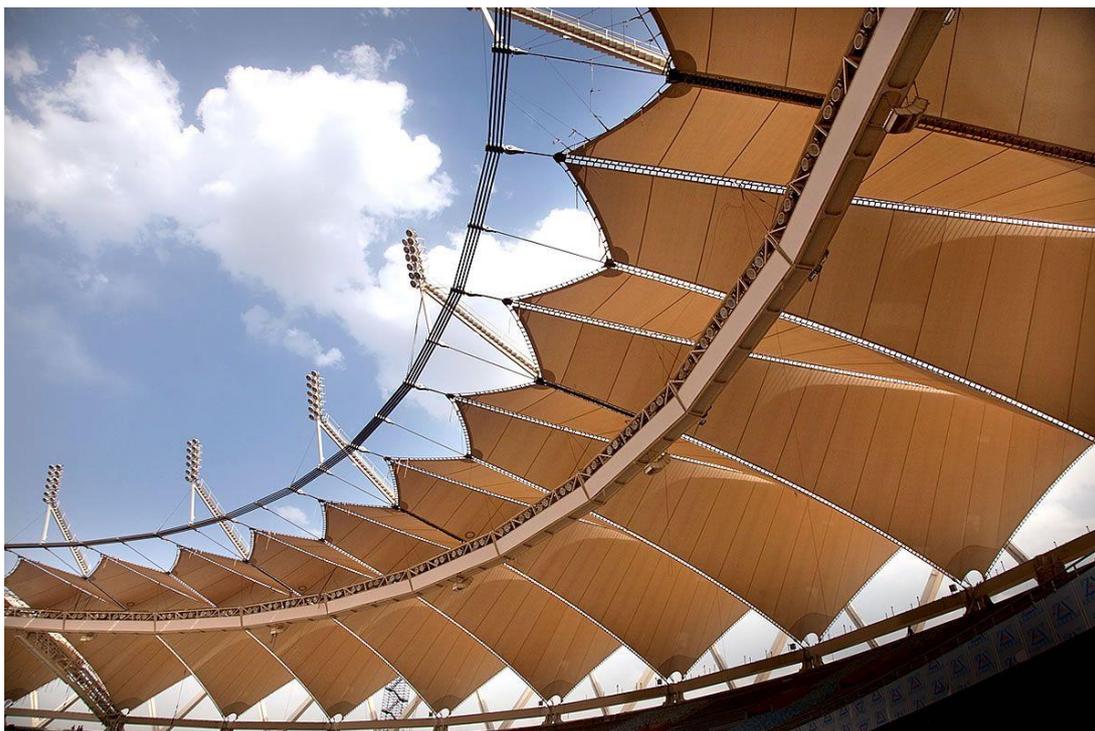


Рис. 1. Пример тентовой конструкции

Состояние вопроса в отечественных нормах

Основной нормативный документ, устанавливающий правила проектирования тентовых конструкций – СП 384.1325800.2018 «Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования» [16].

Тентовый материал состоит из текстильной основы и защитного покрытия: полиэфирные волокна с ПВХ/ПУ/силиконовым защитным покрытием, стеклоткань с силиконовым/ПТФЭ защитным покрытием.

Отечественные стандарты представляют собой стандарты на текстильную основу либо материал волокон, но не тентовый материал комплексно. Исключением является тент с ПВХ покрытием [17], для которого определены требования к физико-механическим характеристикам, проведению испытаний, приемке, транспортировке и хранению.

Перечень текстильных основ, фигурирующих в [16], являющихся наиболее распространенными: полиэфирная ткань [18], стеклоткань [19], ткань ПТФЭ.

В соответствии с [16], расчет КСТ необходимо производить по нитям, расположенным вдоль ткани (далее нити основы) и поперек ткани (далее нити утка), отдельно. Расчетное сопротивление при этом следует назначать с учетом коэффициента надежности, который для оболочек со стеклотканевой основой определяется по данным испытаний, а с полиэфирной основой и ПВХ покрытием вычисляется по [16, ф. 4]:

$$K_H = K_O \cdot K_D \cdot K_C \cdot K_{Ш} = 4,8, \quad (1)$$

где K_O – коэффициент однородности материала, равный 1,33; K_D – коэффициент длительной прочности материала, равный 1,43; K_C – коэффициент старения материала, равный 2,2; $K_{Ш}$ – коэффициент старения сварных швов, равный 1,15.



Коэффициент длительной прочности соответствует требованию [20, п. 5.2.1.4] о том, что по истечении 5 лет прочность на растяжение не должна быть менее 70 % начального значения. Расчетная методика с коэффициентами к нагрузкам на конструкцию приведена в [20, п. 7.6], также присутствует требование к температуре при испытаниях (23 °С) и положения об интерпретации исследовательских данных к другим материалам и условиям испытаний.

Нормируемые механические характеристики КСТ, необходимые для оценки несущей способности: прочность и удлинение при растяжении, прочность на раздир (разрыв) – прочность на растяжение при наличии в образце концентратора напряжений в виде прорези.

Механические характеристики тентовых материалов из полиэфирных тканей с ПВХ покрытием и стеклотканей с покрытием ПТФЭ даны в [16]. Модули упругости основы и утка определяются с учетом нелинейности на основании лабораторных испытаний по диаграмме напряжения – деформация одноосного растяжения. При практических расчетах предлагается принимать секущий модуль упругости для заданного диапазона напряжений, коэффициент Пуассона и модули сдвига определяются по результатам лабораторных исследований.

Расчет при двухосном напряженно-деформированном состоянии допускает линеаризацию [16] в пределах до 40 % от разрывной прочности с предпосылкой о классе сооружения по уровню ответственности КС-1 [21] (пониженный уровень ответственности). Деформации возможно определять приближенно по результатам двухосных испытаний, а также по упрощенной методике, использующей результаты одноосных испытаний [22, 23]. Отечественные нормы не располагают стандартами на двухосные испытания, что затрудняет выполнение требований СП, однако, существует зарубежный стандарт [24] для тканей с резиновым или пластмассовым покрытием.

Конструкции узлов, приведенные в [16], не сопровождаются расчетными методиками и конструкционными параметрами.

Прочность сварных швов на данный момент возможно оценивать по [20] с учетом коэффициентов условий работы либо непосредственно испытаниями по [17].

Примечания:

1. В нормах в силу недостаточного количества нормативных данных упор сделан на определение характеристик материала лабораторными испытаниями.

2. Отсутствуют отечественные нормативные методики проведения испытаний на двухосное растяжение текстильных материалов.

3. Существует единый стандарт на тентовые материалы с ПВХ покрытием [17]. Стандарт задает требования к характеристикам материала, не учитывая при этом особенности текстильной основы. Тентовые материалы с другими типами покрытия не нормируются.

4. Отсутствуют нормативные методики расчета соединений, а также конструктивные требования к узлам, что затрудняет проектирование тентовых конструкций.

Испытания образцов

Для получения механических характеристик материалов необходимо проводить испытания [16], имеющие ряд особенностей, за исключением испытания на одноосное растяжение.

Испытания на двухосное растяжение проводятся на крестообразных образцах [24]. Из-за больших деформаций ткани искажается форма испытуемого образца, НДС при этом неоднородно, и определение характеристик материала



затруднено. Измерения проводятся в центральной области, где НДС можно считать однородным. Размеры этой области зависят от следующих факторов [25]:

1. Формы зон сопряжения рукавов с центральной областью образца.
2. Количество разрезов рукавов, за которые растягивается образец.
3. Радиус отверстия, пробиваемого в устье разреза.
4. Угол раскроя рукавов.

Для оценки разрывной прочности образца с надрезом при двухосном растяжении применяется та же методика испытаний [11].

Для оценки прочности материала на разрыв применяется ряд методов [6]: разрыв образца с надрезом в центре, разрыв трапецеидального образца, разрыв образца с надрезом на кромке, разрыв крыловидного образца, разрыв образца в форме брюк (единичный раздир) [7], разрыв образца с тремя язычками (двойной раздир). На последние два испытания существуют отечественные нормы [26]. Наиболее подходящим с точки зрения условий эксплуатации является метод испытаний образца с надрезом в центре [27].

Разрушение тканевых композитов

Разрушение тканевых композитов – комплексный процесс. При этом наблюдаются в основном следующие стадии разрушения, наступающие вслед друг за другом и развивающиеся впоследствии совместно: растрескивание матрицы, нарушение сцепления волокна с матрицей, разрыв волокна за пределами трещины и его выдергивание из матрицы, разрыв волокна в пределах трещины. В работе [28] испытывались образцы препрегов из углеродных волокон. При помощи метода акустической эмиссии отслеживалась прогрессия стадий разрушения в образцах с различными диаметрами отверстия при одноосном растяжении, каждому режиму соответствовала своя пиковая частота. Растрескивание матрицы имело более низкую частоту, чем разрушение волокон, остальные режимы заняли промежуточное положение. Это позволило идентифицировать начало того или иного режима разрушения [28]. Был оценен вклад каждой составляющей в процесс разрушения: с увеличением диаметра отверстия вклад растрескивания матрицы снижается, а вклад потери сцепления увеличивается [28].

Угол нагрузки по отношению к нитям

Угол нагрузки по отношению к нитям – важнейший фактор в расчете мембран. С изменением угла от 0° до 45° и от 90° до 45° деформации образца при разрыве растут, а прочность образца и модуль деформации снижается [6, 13, 29], зависимость прочности от угла *U*-образная (рис. 2 [6]), для оценки прочности может быть применен критерий Цая-Хилла. Диаграммы деформирования материала не линейны и имеют при 0° и 90° 3 участка, а при других значениях угла – 2 участка [30]. Большие деформации при угле 45° обусловлены низкой сдвиговой жесткостью ткани, существенное влияние на сдвиговую жесткость оказывает изгибная жесткость нитей, количество пересечений нитей на единицу площади и величина сил трения [12]. Деформации при растяжении вдоль нитей утка больше, чем вдоль нитей основы, так как нити утка в процессе производства оказываются более изогнутыми.

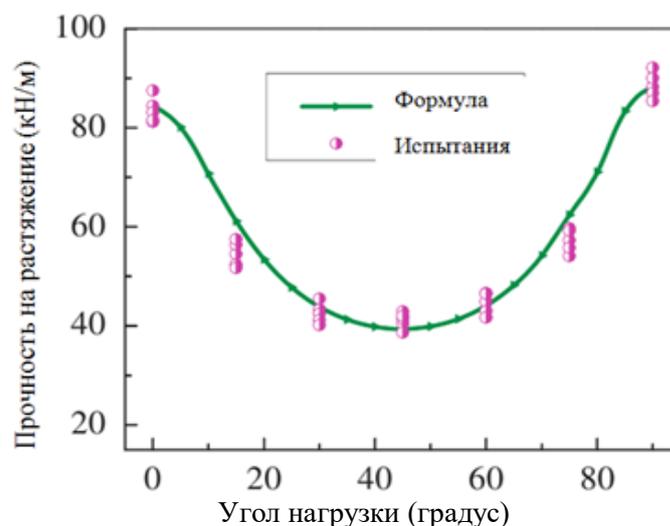


Рис. 2. Зависимость прочности на растяжение от угла приложения нагрузки [6]

Концентрация напряжений

Существуют экспериментальные исследования, в которых рассматривается явление концентрации напряжений в образцах с отверстиями [28], а также в образцах с разрезами [3, 5, 6].

При испытаниях образцов с концентратором в виде прорези несущая способность образца при ориентации нитей под 45° , а прорези под 90° к нагрузке — не минимальна [6]. Зависимость прочности от угла наклона нитей не *U*-образная, а *W*-образная с локальным максимумом при 45° (рис. 3 [6]). Ориентация надреза при одинаковом числе перерезанных рабочих нитей, практически не влияет на прочность. Таким образом, основным фактором, влияющим на прочность, является число перерезанных нитей [5]. Сопротивление разрыву принято равным средним напряжениям в образце при начале распространения трещины. Для оценки прочности на разрыв может быть применен модифицированный критерий, основанный на критерии Цая-Хилла [6]. Наименьшая прочность оказывается [6] для углов 30° и 60° , наибольшие деформации при этом наблюдаются у образца с углом 45° . Трещина распространяется поперек нитей, находящихся под меньшим углом к нагрузке [5, 6], с ростом зон концентрации напряжений (дельта-зон) и образованием складок в окружающем разрыв месте. При различных углах ориентации нитей и надреза, трещина может быть в форме: прямой линии с открытием в форме эллипса, буквы Z, параллелограмма.

Работу образца можно разделить на 4 участка:

1. Участок совместных деформаций основы и матрицы.
2. Участок деформирования нитей (сдвиговых деформаций, для углов отличных от нулевого).
3. Участок плато.
4. Участок разрушения.

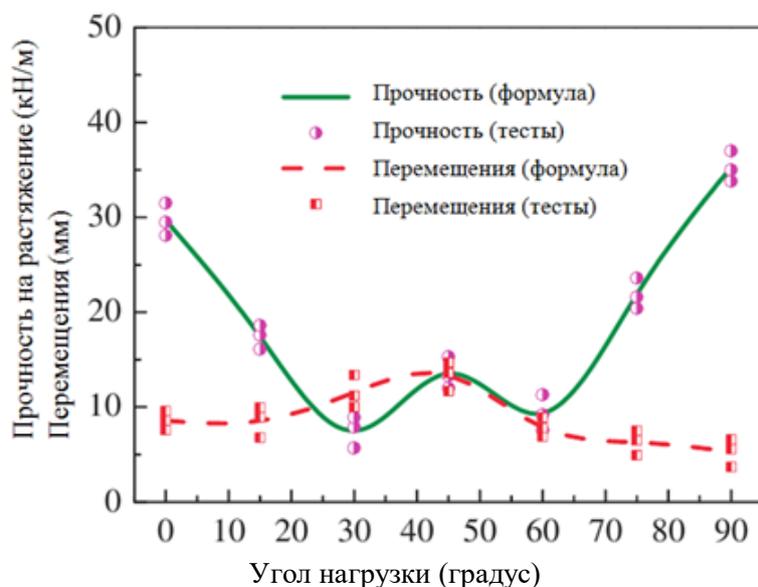


Рис. 3. Зависимость прочности на разрыв и перемещений точек ткани от угла приложения нагрузки [6]

При ориентации нитей 0° и 90° разрушение происходит при чистом растяжении, участок плато при этом почти отсутствует, а разрушение происходит резко. При других углах, разрушение происходит постепенно, с наличием сдвига (для 45° – чистый сдвиг). Участок плато при этом протяжен, а также имеет множественные колебания, обусловленные поочередным выключением нитей из работы, что требует больших затрат энергии на рост трещины [3]. Таким образом, существует 2 сценария разрушения: резкий (хрупкий) и вязкий [5, 6]. Различие в сценариях разрушения обусловлено количеством накопленной энергии в испытуемом образце и количеством перерезанных нитей [3].

Распределение напряжений вблизи надреза при одноосном растяжении принимается по формуле [31, ф. 3]:

$$\sigma(r) = \sigma_C + A \cdot e^{-B \cdot r}, \quad (2)$$

где σ_C – средние напряжения, находящиеся на удалении от разреза; A, B – константы, определяемые из эксперимента; r – расстояние от кончика трещины до рассматриваемой точки.

Распределение напряжений изображено на рис. 4 [31]. Формула дает погрешность вследствие гипотезы о линейном поведении материала, что не соответствует действительности [4, 10, 27].

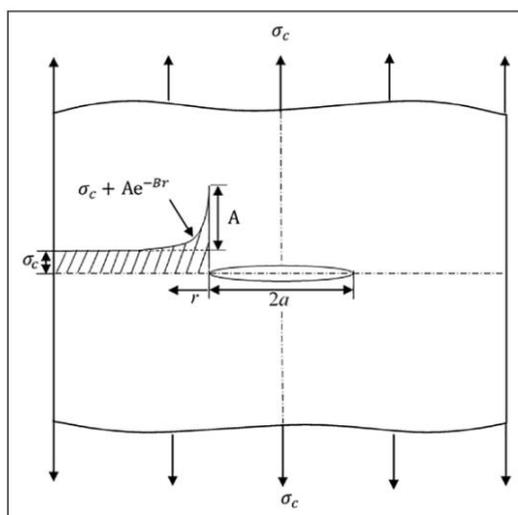


Рис. 4. Распределение напряжений вблизи надреза [31]

При определении прочности на разрыв (σ_c) при одноосном растяжении наибольшее совпадение [4, 5] с результатами эксперимента дает эмпирический критерий Тиле [32]:

$$\sigma_c = \frac{C_l \cdot C_s}{L^n \cdot \left(1 + \frac{L}{r}\right)}, \quad (3)$$

где C_l, n – константы, определяемые по данным испытаний методом наименьших квадратов [32]; L – длина надреза; r – радиус кривизны оболочки (для плоского образца $r = \infty$); C_s – сопротивление разрыву, определенное по [33].

В исследованиях [5, 11] проводились двухосные испытания образцов с центральным надрезом. Направление роста трещины зависит от соотношения вязкостей групп нитей [11], угла ориентации надреза [5, 11] и соотношения нагрузок в двух направлениях [5]. Увеличение нагрузки, параллельной направлению развития надреза, увеличивает сопротивление образца разрыву до 50 % [5], особенно при небольшом числе перерезанных нитей.

В исследовании [27] рассмотрены линейные модели для определения прочности на разрыв образца с концентратором и модели, учитывающие образование зоны пластических деформаций в кончике трещины. Предложен параметр-константа материала, в зависимости от которого определяется сценарий разрушения [5, 6], также добавлен промежуточный сценарий квазихрупкого разрушения. Сделан вывод, что увеличение вязкости повышает прочность на разрыв при надрезах любой длины, следовательно, вязкость является более важной характеристикой материала при работе на разрыв. Различные способы определения вязкости разрушения рассматриваются в работе [3]: теория Минами, метод разности площадей диаграмм деформирования, метод площади параллелограмма. Последний дает результаты, не зависящие от параметров образца и метода испытаний, что делает его наиболее приемлемым для определения вязкости разрушения материала.

В работе [28] оценивается уровень общих напряжений и деформаций в углепластиковом образце с круглым отверстием, при котором начинаются стадии



разрушения [28, п. 4.2]. Методом корреляции цифрового изображения определялось поле деформаций в момент перехода на следующую стадию. Концентрация напряжений возникала в момент перехода к процессу разрушения и выдергивания волокон, в образце с наименьшим диаметром отверстия (2,5 мм) концентрация не наблюдалась также в образце без отверстия [28]. Предельное сопротивление (принимается в сечении, удаленном от концентратора напряжений) уменьшалось с увеличением диаметра отверстия и аппроксимировалось формулой [28, ф. 2]:

$$\sigma_U = Ae^{Md} + Be^{Nd}, \quad (4)$$

где e – основание натурального логарифма; A , B , M , N – постоянные эксперимента.

Модель материала

Традиционно при решении задач, связанных с композиционными материалами, применяется аппарат теории упругости анизотропного тела, при этом вводится ряд гипотез: тело является сплошным, деформации малы, зависимость между напряжениями и деформациями линейная. Однако в случае композита с тканевой основой и податливой матрицей гипотезу о малых деформациях следует отбросить, так как нити в такой структуре распрямляются под нагрузкой и изменяют жесткость [1, 34, 35]. Деформации образца при этом имеют порядок десятков процентов [13], а гипотеза о линейной зависимости напряжения-деформации не соответствует действительности [13]. Модель текстильного материала подразделяется на 3 уровня: микро-, мезо-, макроуровень [36, 37] либо: волокно, нить, ткань [38]. Вследствие этого прочность изделия подвержена влиянию масштабного эффекта, проявляющегося на каждом из уровней. Обзор моделей материалов приводится в статье [39].

Конструкции соединений тентовых конструкций

Исследования соединений тканевых конструкций немногочисленны. В одном из них исследуется прочность соединений ПВХ тентов с полиэфирной основой [15]. Авторы выделяют 3 типа соединений: швы, соединения с гибким контуром, соединения с жестким контуром. Исполнение соединений может отличаться. В данной работе испытывались следующие варианты: сварной и клеевой шов, соединение с зажимными пластинами, соединение с замком.

При испытании шовных соединений авторы выделяют 3 модели разрушения для двух типов шва (сварной или клеевой):

1. Разрушение по шву или примыкающему материалу.
2. Проскальзывание или отклеивание.
3. Выдергивание нитей.

Клеевой шов показывал 80 % от сопротивления мембраны, сварной – 90 %. Разброс значений при испытаниях клеевых швов больше. В исследовании [14] испытывались образцы ПВХ мембраны со сварным швом, разрушение происходило по примыкающему материалу мембраны.

При испытании соединений с замком [15], разрушение происходит по одному из следующих сценариев:

1. Разрушение по сварному шву.
2. Разрыв мембраны.
3. Разрыв кармана для кедера.
4. Выдергивание кедера из замка.



Сценарии разрушения 3 и 4 наблюдаются в слишком жестких и слишком податливых замках соответственно. Ожидаемые сценарии при правильном выборе замка – 1 и 2. Прочность при этом достигает 90 % прочности мембраны.

При испытании соединений с зажимными пластинами [15] разрушение происходит по одному из следующих сценариев:

1. Разрыв мембраны.

2. Разрыв мембраны в зоне под болтами в результате перераспределения напряжений после запрессовывания кедера между зажимными пластинами.

3. Разрушение по сварному/клеевому шву.

При сценарии 1 прочность соединения наибольшая, при сценарии 3 – наименьшая. Сценарии 2 и 3 исключаются правильным подбором параметров соединения. Существенное влияние на сценарий разрушения оказывает расстояние между болтами, толщина зажимных пластин и диаметр кедера. Сценарии 1 и 3 более соответствуют хрупкому или квазихрупкому разрушению, сценарий 2 – вязкому [27].

Влияние температуры

В исследовании [15] оценивается влияние температуры на сварные соединения ПВХ мембран, диапазон эксперимента составлял от -20 до 70 °С. С ростом температуры среднее значение прочности шва снижалось до 20 %. Влияние температуры на мембраны со стеклотканевой основой и тефлоновым покрытием в том же диапазоне составляет не более 3 % [13]. Основная тенденция при снижении температуры – повышение прочности жесткости образцов, хрупкости нитей и снижение ползучести материала. Воздействие температуры может быть оценено коэффициентом, численно равным отношению прочности при наибольшей температуре эксплуатации к прочности при температуре 23 °С [13].

Влияние длительности нагрузки

Материалы мембран обладают ярко выраженной ползучестью, их прочность и деформативность изменяются с течением времени, что влияет на несущую способность соединений. В исследованиях [9, 40] проводились одноосные испытания образцов на ползучесть и релаксацию с различной начальной нагрузкой. Более половины деформаций ползучести происходит за первые 30 минут испытания. После 24 часов в сечении образца остается менее 80 % начальных напряжений, после 48 часов релаксация прекращается. Испытания при различных температурах показали: с повышением температуры ползучесть усиливается [9, 40]. Для описания процессов ползучести используется модель Финдли [9, ф. 3]:

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 + A \cdot t^n, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{(t)}$ – полная деформация за время t ; A – амплитуда переходной ползучести; ε_0 – начальная упругая деформация; n – константа, не зависящая от уровня напряжений.

Влияние природных воздействий

Эксплуатация тентов происходит при воздействии природных условий, способствующих появлению в полимерном покрытии микротрещин, через которые влага проникает внутрь; зоны торцов и соединения также являются слабыми местами. Существенные изменения в прочности после длительного вымачивания наблюдаются для стеклоткани [41], после высушивания образцы восстанавливают свою прочность полностью [42]. Для полиэфирной ткани с ПВХ



покрытием изменения механических характеристик при абразивном воздействии и намокании несущественны, однако воздействие температуры (70 и 120 °С) оказывает влияние на их прочность [43].

Список сокращений

КСТ – конструкция тентовая строительная;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

ПВХ – поливинилхлорид;

ПТФЭ – политетрафторэтилен;

ПУ – полиуретан.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожанов, Д. А. Моделирование поведения гибких тканых композитов при растяжении : 01.02.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Кожанов Дмитрий Александрович ; [Место защиты: ФГАОУВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского»]. – Нижний Новгород, 2017. – 117 с. – Текст : непосредственный.
2. Alam, Md Samsu. Development and experimental validation of a mathematical model of shear rigidity of woven fabric structures / Alam Md Samsu, Majumdar Abhijit, Ghosh Anindya // The Journal of the Textile Institute. – 2021. – № 113. – P. 1–9. – 10.1080/00405000.2021.1906489.
3. Bao, Han. Study on tearing tests and the determination of fracture toughness of PVC-coated fabric / Bao Han, Wu Minger, Zhang Xubo // Journal of Industrial Textiles. – 2021. – № 51. – P. 977–1006. – 10.1177/1528083721993943.
4. Bao, Han. Influencing factors and evaluation methods of tearing resistance of coated fabric membranes / Bao Han, Wu Minger, Zhang Xubo // Journal of Industrial Textiles. – 2022. – № 52. – 152808372211363. 10.1177/15280837221136308.
5. Bao, Han. Tearing analysis of PVC coated fabric under uniaxial and biaxial central tearing tests / Bao Han, Wu Minger, Zhang, Xubo // Journal of Industrial Textiles. – 2020. – № 51. – 152808372093451. 10.1177/1528083720934513.
6. Fracture failure analysis and bias tearing strength criterion for a laminated fabric / Chen Jianwen, Chen Wu-jun, Zhou Han, Zhao Bing, Wang Mingyang, Sun Weiwei, He Shizan // Journal of Industrial Textiles. – 2017. – № 47. – 152808371769583. 10.1177/1528083717695839.
7. Daniel, Pîrvulescu. Studies on tensile and tear fracture of the S8210 tarpaulin / Daniel Pîrvulescu, Ioan Stoia, Liviu Marşavina // Vibroengineering PROCEDIA. – 2022. – № 46. – P. 80–85. – 10.21595/vp.2022.22952.
8. Behavior of woven fabric composite under tensile loads in different directions using acoustic emission / Dehnad Milad, Kamali Dolatabadi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Mehdi Asghar Ali, Jeddi Ali. // Journal of Industrial Textiles. – 2022. – № 52. – P. 1–21. – 10.1177/15280837221117611.
9. Characterization of tensile creep behavior of fabric-reinforced PVC flexible composites / Guo S., Shen W., Li R., Shao H., Jiang J., Chen N. // The Journal of the Textile Institute. – 2021. – P. 1–8. – doi:10.1080/00405000.2021.1944522.
10. He, Rijin. Central crack tearing test and fracture parameter determination of PTFE coated fabric / He Rijin, Sun Xiaoying, Wu Yue // Construction and Building Materials. – 2019. – № 208. – P. 472–481. – 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.046.
11. Biaxial tearing properties of woven coated fabrics using digital image correlation / He Rijin, Sun Xiaoying, Wu Yue, Tang Guowen, Carvelli Valter // Composite Structures. – 2021. – № 272. – 114206. 10.1016/j.compstruct.2021.114206.
12. Analysis of shear characteristics of woven fabrics and their interaction with fabric integrated structural factors / Shanbeh Mohsen, Johari Majid, Zarrebini M., Barburski Marcin,



Komisarczyk Agnieszka // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2019. – № 14. – 155892501986752. 10.1177/1558925019867520.

13. Mechanical properties of PTFE coated fabrics / Zhang Yingying, Zhang Qilin Zhou, Chuanzhi, Zhou Ying // Journal of Reinforced Plastics and Composites – J REINF PLAST COMPOSITE. – 2010. – № 29. – P. 3624-3630. –10.1177/0731684410378542.

14. Huttner, Miloš. Carrying Capacity Testing of Membrane Connection / Huttner Miloš, Fajman Petr // Applied Mechanics and Materials. – 2016. – № 825. – 15-18.10.4028 /www.scientific.net/ AMM.825.15.

15. Research on the mechanical properties of membrane connections in tensioned membrane structures / Zhang Yingying, Zhang Qilin, Li Yang, Chen Lu. // Structural Engineering and Mechanics. – 2014. – № 49. – 10.12989/sem.2014.49.6.745.

16. СП 384.1325800.2018. Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. N 516/пр и введен в действие с 14 февраля 2019 г. : введен впервые. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/551394509?ysclid=lggdld2kzd225383024>. – Текст : электронный.

17. ГОСТ 29151-91. Материалы тентовые с поливинилхлоридным покрытием для автотранспорта : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 10.12.91 N 1904 : дата введения 1993-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019183?ysclid=lggendzd6r735650872/>. – Текст : электронный.

18. ГОСТ 27504-87. Ткани полиэфирные тентовые. Технические условия : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 10.12.87 N 4436 : введен впервые. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020534?ysclid=lggf637cnp516593886>. – Текст : электронный.

19. ГОСТ 19170-2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия (с Изменением N 1) : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол N 19 от 24 мая 2001 г.) : дата введения 2002-10-01 : взамен ГОСТ 19170-70*. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200028598?ysclid=lggfbnpr1q484802765>. – Текст : электронный.

20. ГОСТ Р 56439-2015. Комплекты каркасно-тентовых укрытий для спортивных площадок : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 июня 2015 г. N 657-ст : дата введения 2016-07-01 : введен впервые. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121755?ysclid=lggfh22qol770635926>. – Текст : электронный.

21. ГОСТ 27751-2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2014 г. N 72-П) : Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. N 1974-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 27751-2014 : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2015 г. : дата введения 2015-07-01 : введен впервые. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736?ysclid=lggfrdlpfm427382541>. – Текст : электронный.

22. ГОСТ 29104.4-91. Ткани технические. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 27.09.91 N 1541 : дата введения 1993-01-01 : взамен ГОСТ 3813-72. – URL:



<https://docs.cntd.ru/document/1200018945?ysclid=lgggwg3t5q196962719>. – Текст : электронный.

23. ГОСТ 29104.22-91. Ткани технические. Метод определения компонентов полного удлинения при растяжении нагрузкой, меньше разрывной : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 27.09.91 N 1552 : дата введения 1993-01-01 : введен впервые. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019028?ysclid=lgh1c7pti410818565>. – Текст : электронный.

24. DIN EN 17117-1:2019-02. Rubber or plastics-coated fabrics – Mechanical test methods under biaxial stress states – Part 1: Tensile stiffness properties. – URL: <https://cdn.standards.itech.ai/samples/35957/bc8d45b5bae843aea5425f399dd8719e/SIST-EN-17117-1-2019.pdf>.

25. Мохирева, К. А., (2014). Определение формы образцов для экспериментов на двухосное растяжение / К. А. Мохирева, А. Л. Свистков, В. В. Шадрин. – Текст : электронный // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – № 7(4). – С. 353–362. – <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2014.7.4.34>. – URL: <https://journal.permsc.ru/index.php/ccm/article/view/CCMv7n4a34/657>.

26. ГОСТ ISO 4674-1-2021. Материалы с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение сопротивления раздиру. Часть 1. Методы испытания на раздир с постоянной скоростью : принят Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 сентября 2021 г. N 985-ст межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 4674-1-2021 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июня 2022 г. : дата введения 2022-06-01 : взамен ГОСТ 30304-95. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180923?ysclid=lggkofh9tx679204109>. – Текст : электронный.

27. Sun, Xiaoying. A novel tearing residual strength model for architectural coated fabrics with central crack / Sun Xiaoying, He Rijin, Wu Yue // Construction and Building Materials. – 2020. – № 263. – 120133. [10.1016/j.conbuildmat.2020.120133](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120133).

28. Investigation on damage evolution of open-hole plain woven composites under tensile load by acoustic emission signal analysis / Yuhang Liu, Li Zhang, Zhixing Li, Zhanguang Chen, Kai Huang, Licheng Guo // Composite Structures. – 2023. – Volume 305. – 116481, ISSN 0263-8223. – <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116481>.

29. Shape Effect Analysis of the Mechanical Properties of PVC-Coated Fabrics under Off-Axis Tension / Zhang Lanlan, Zhang Yingying, Zhao Qichong, Junhao Xu, Xue Jigang // Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – 1–12. – [10.1155/2020/9634120](https://doi.org/10.1155/2020/9634120).

30. A nonlinear damage constitutive model of PVC coated fabrics / Lanlan Zhang, Zhang Yingying, Wei Song, Junhao Xu, Jigang Xue // Structures. – 2021. – № 30. – P. 368–377. – [10.1016/j.istruc.2021.01.027](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.027).

31. Investigation of tear strength of an airship envelope fabric by theoretical method and uniaxial tear test / Chen Yonglin, Li Shuai, Ding Kai, Wang Fengxin, Fu Gongyi // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2019. – № 14. – 155892501987929. [10.1177/1558925019879295](https://doi.org/10.1177/1558925019879295).

32. Tear Propagation of a High-Performance Airship Envelope Material / Maekawa Shoji, Shibasaki Kouichi, Kurose Toyotoshi, Maeda Toshiyuki, Sasaki Yoshitaka, Yoshino Tatsuya // Journal of Aircraft – J AIRCRAFT. – 2008. – № 45. – P. 1546–1553. – [10.2514/1.32264](https://doi.org/10.2514/1.32264).

33. FAA-P8110-2 CHG 2. Airship Design Criteria. Federal Aviation Administration, 1995.

34. Basit, Munshi. A simplified constitutive and finite element model of plain weave fabric reinforcements for the biaxial loading / Basit Munshi, Luo Shen-Yi, Mitra Aniruddha // Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. – 2019. – № 2. – [10.1007/s41939-019-00051-4](https://doi.org/10.1007/s41939-019-00051-4).

35. Yanchao, Wang. An Analytical Model for the Tension-Shear Coupling of Woven Fabrics with Different Weave Patterns under Large Shear Deformation / Yanchao Wang, Zhang



Weizhao, Ren Huaqing, Huang Zhengming, Geng Furong Li, Yongxiang, Zhu Zengyu // Applied Sciences. – 2020. – 10.1551.10.3390/app10041551.

36. Multiscale modelling of scaling effects in the impact response of plain woven composites / Xu Ziwen, Chen Yanhong, Cantwell W.J., Guan Zhongwei // Composites Part B: Engineering. – 2020. – № 188. – 107885. 10.1016/j.compositesb.2020.107885.

37. Herath, Sumudu. Multiscale modelling of woven and knitted fabric membranes. – 2020. – 10.17863/CAM.57314.

38. Модель, Анализ 3D-структуры и метод расчета физико-механических характеристик материалов / Д. А. Трофимов, С. И. Шалгунов, В. И. Соколов, И. Д. Симонов-Емельянов // Конструкции из композиционных материалов. – 2022. – Вып. 3. DOI: 10.52190/2073-2562_2022_3_10.

39. Кустов, А. А. Математические модели технических тканей с покрытием / А. А. Кустов, А. М. Ибрагимов. – (Материалы и оборудование). – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2017. – № 1/2. – С. 94–98 : ил. – ISSN 0585-430X.

40. Zhang, Ying. The Visco-Elastic Behaviors of PVC Coated Fabrics under Different Stress and Temperatures / Zhang Ying, Zhang Qilin, Zhou Chuan, Advanced Materials Research. – 2010. – P. 168–170. 1476–1479. – 10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.1476.

41. Asadi, Hastia. Water infiltration impact on tensile strength and breaking strain of architectural fabrics / Asadi Hastia, Uhlemann Jorg, Stranghoner Natalie. Advances in Structural Engineering. – 2018. – № 21. – 136943321875600. 10.1177/1369433218756005.

42. Ambroziak, Andrzej. Influence of Water-Induced Degradation of Polytetrafluoroethylene (PTFE) / Ambroziak Andrzej, Klosowski Pawel // Coated Woven Fabrics Mechanical Properties. Materials. – 2022. – № 15. – 1. 10.3390/ma15010001.

43. Investigation of some weathering impacts on tearing properties of PVC-coated fabrics used for architectural purposes / Dobilaitė Vaida, Juciene Milda, Bliudzius Raimondas, Sveikauskaitė Loreta // Journal of Industrial Textiles. – 2020. – № 51. – 152808372098238. 10.1177/1528083720982384.

KOZHANOV Dmitriy Aleksandrovich, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; GURIN Artyom Vitalevich, postgraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics

ANALYSIS OF MODERN RESEARCHES ON THE TOPIC OF TENSION MEMBRANE CONNECTIONS CALCULATIONS (REVIEW)

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 432-05-76;
e-mail: artemxan96@mail.ru

Key words: plain-woven composites, membrane tension constructions, membrane connections, coated fabrics.

In article considered review of modern scientific sources and standards on the topic of tension membrane connections calculations. Analysis of Russian standards from the practice point of view was carried out. Publications concerning membrane materials tests, influence of stress concentrators on specimen strength and fracture toughness, criteria for bearing capacity evaluation, researches of fabrics under natural conditions impact, fracture process data, and influence of load duration on the composite's mechanical properties were considered.

At the end of the article there is a list of abbreviations used: КСТ, НДС, ПВХ, ПТФЭ, ПВ.



REFERENCES

1. Kozhanov D. A. Modelirovanie povedeniya gibkikh tkannykh kompozitov pri rastyazhenii [Modeling the behavior of flexible woven composites under tension] : 01.02.04 : dissert. ... kand. fiziko-matemat. nauk; Mesto zaschity: Natsional. issled. Nizhegorod. gos. un-t im. N.I. Lobachevskogo. Nizhny Novgorod, 2017. 117 p.
2. Alam Md Samsu, Majumdar Abhijit, Ghosh Anindya. Development and experimental validation of a mathematical model of shear rigidity of woven fabric structures. *The Journal of the Textile Institute*. 2021. № 113. P. 1–9. 10.1080/00405000.2021.1906489.
3. Bao Han, Wu Minger, Zhang Xubo. Study on tearing tests and the determination of fracture toughness of PVC-coated fabric. *Journal of Industrial Textiles*. 2021. № 51. P. 977–1006. 10.1177/1528083721993943.
4. Bao Han, Wu Minger, Zhang Xubo. Influencing factors and evaluation methods of tearing resistance of coated fabric membranes. *Journal of Industrial Textiles*. 2022. № 52. 152808372211363. 10.1177/15280837221136308.
5. Bao, Han & Wu, Minger & Zhang, Xubo. (2020). Tearing analysis of PVC coated fabric under uniaxial and biaxial central tearing tests. *Journal of Industrial Textiles*. 51. 152808372093451. 10.1177/1528083720934513.
6. Chen Jianwen, Chen Wu-jun, Zhou Han, Zhao Bing, Wang Mingyang, Sun Weiwei, He Shizan. Fracture failure analysis and bias tearing strength criterion for a laminated fabric. *Journal of Industrial Textiles*. 2017. № 47. 152808371769583.10.1177/1528083717695839.
7. Daniel Pîrvulescu, Ioan Stoia, Liviu Marşavina. Studies on tensile and tear fracture of the S8210 tarpaulin. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2022. № 46. P. 80–85. 10.21595/vp.2022.22952.
8. Dehnad Milad, Kamali Dolatabadi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Mehdi Asghar Ali, Jeddi Ali. Behavior of woven fabric composite under tensile loads in different directions using acoustic emission. *Journal of Industrial Textiles*. 2022. № 52. P. 1–21. 10.1177/15280837221117611.
9. Guo S., Shen W., Li R., Shao H., Jiang J., Chen N. Characterization of tensile creep behavior of fabric-reinforced PVC flexible composites. *The Journal of the Textile Institute* . 2021. P. 1–8. doi:10.1080/00405000.2021.1944522.
10. He Rijin, Sun Xiaoying, Wu Yue. Central crack tearing test and fracture parameter determination of PTFE coated fabric. *Construction and Building Materials*. 2019. № 208. P. 472-481. 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.046.
11. He Rijin, Sun Xiaoying, Wu Yue, Tang Guowen, Carvelli Valter. Biaxial tearing properties of woven coated fabrics using digital image correlation. *Composite Structures*. 2021. № 272. 114206. 10.1016/j.compstruct.2021.114206.
12. Shanbeh Mohsen, Johari Majid, Zarrebini M., Barburski Marcin, Komisarczyk Agnieszka. Analysis of shear characteristics of woven fabrics and their interaction with fabric integrated structural factors. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2019. № 14. 155892501986752. 10.1177/1558925019867520.
13. Zhang Yingying, Zhang Qilin, Zhou Chuanzhi, Zhou Ying. Mechanical properties of PTFE coated fabrics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites – J REINF PLAST COMPOSITE*. 2010. № 29. P. 3624-3630. 10.1177/0731684410378542.
14. Huttner Miloš, Fajman Petr. Carrying Capacity Testing of Membrane Connection. *Applied Mechanics and Materials*. 2016. № 825. 15-18.10.4028/www.scientific.net/AMM.825.15.
15. Zhang Yingying, Zhang Qilin, Li Yang, Chen Lu. Research on the mechanical properties of membrane connections in tensioned membrane structures. *Structural Engineering and Mechanics*. 2014. № 49. 10.12989/sem.2014.49.6.745.
16. SP 384.1325800.2018. Konstruktsii stroitelnye tentovye. Pravila proektirovaniya [Tensile membrane constructions. Design rules] : utverzhdyon prikazom Min-va stroitelstva i zhilishchno-kommunal. khoz-va RF ot 13 avgusta 2018 g. N 516/pr i vved. v deystvie s 14



fevralya 2019 g. : vved. v pervye. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/551394509?ysclid=lgdld2kzd225383024>.

17. GOST 29151-91. Materialy tentovye s polivinilkhloridnym pokrytiem dlya avtotransporta [Membrane materials with polyvinyl chloride coating for vehicles] : utverzhd. i vved. v deystvie Postanovleniem Komiteta standartizatsii i metrologii SSSR ot 10.12.91 N 1904 : data vved. 1993-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019183?ysclid=lggendzd6r735650872/>.

18. GOST 27504-87. Tkani poliefirnye tentovye. Tekhnicheskie usloviya [Polyester tent fabrics. Technical conditions] : utverzhd. i vved. v deystvie Postanovleniem Gos. komiteta SSSR po standartam ot 10.12.87 N 4436 : vved. v pervye. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020534?ysclid=lggf637cnp516593886>.

19. GOST 19170-2001. Steklovolokno. Tkan konstruktsionnogo naznacheniya Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniem N 1) [Fiberglass. Fabric for structural purposes. Technical specifications (with Amendment N 1)] : prinyat Mezhhgosudarstvennym Sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (protokol N 19 ot 24 maya 2001 g.) : data vved. 2002-10-01 : vzamen GOST 19170-70*. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200028598?ysclid=lggfbnpr1q484802765>.

20. GOST R 56439-2015. Komplekty karkasno-tentovykh ukrytiy dlya sportivnykh ploschadok [Sets of frame-tent shelters for sports grounds] : utverzhd. i vved. v deystvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 15 iyunya 2015 g. N 657-st : data vved. 2016-07-01 : vved. v pervye. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121755?ysclid=lggfh22qol770635926>.

21. GOST 27751-2014. Mezhhgosudarstvenny standart. Nadyozhnost stroitelnykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya [Interstate standard. Reliability of building structures and foundations. General] : prinyat Mezhhgosudarstvennym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (protokol ot 14 noyabrya 2014 g. N 72-P) : Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 11 dekabrya 2014 g. N 1974-st mezhhgosudarstvenny standart GOST 27751-2014 : vved. v deystvie v kachestve natsionalnogo standarta RF s 1 iyulya 2015 g. : data vved. 2015-07-01 : vved. v pervye. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736?ysclid=lggfrdlpfm427382541>.

22. GOST 29104.4-91. Tkani tekhnicheskie. Metod opredeleniya razryvnoy nagruzki i udlineniya pri razryve [Technical fabrics. Method for determining the breaking load and elongation at break] : utverzhd. i vved. v deystvie Postanovleniem Komiteta standartizatsii i metrologii SSSR ot 27.09.91 N 1541 : data vved. 1993-01-01 : vzamen GOST 3813-72. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200018945?ysclid=lgggwg3t5q196962719>.

23. GOST 29104.22-91. Tkani tekhnicheskie. Metod opredeleniya komponentov polnogo udlineniya pri rastyazhenii nagruzkoj, menshe razryvnoy [Technical fabrics. A method for determining the components of total elongation when stretched by a load, less discontinuous] : utverzhd. i vved. v deystvie Postanovleniem Komiteta standartizatsii i metrologii SSSR ot 27.09.91 N 1552 : data vved. 1993-01-01 : vved. v pervye. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019028?ysclid=lggh1c7pti410818565>.

24. DIN EN 17117-1:2019-02. Rubber or plastics-coated fabrics – Mechanical test methods under biaxial stress states – Part 1: Tensile stiffness properties. – URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/35957/bc8d45b5bae843aea5425f399dd8719e/SIST-EN-17117-1-2019.pdf>.

25. Mokhireva K. A., Svistkov A. L., Shadrin V. V. Opredelenie formy obraztsov dlya eksperimentov na dvukhosnoe rastyazhenie [Shape determination of samples for biaxial stretching experiments]. Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred [Computational Continuum Mechanics]. 2014. № 7(4). P. 353–362. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2014.7.4.34> – URL: <https://journal.permisc.ru/index.php/ccm/article/view/CCMv7n4a34/657>.

26. GOST ISO 4674-1-2021. Materialy s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Opredelenie soprotivleniya razdiru. Chast 1. Metody ispytaniya na razdir s postoyannoy



skorostyu [Materials with rubber or plastic coating. Determination of tear resistance. Part 1. Methods of testing for tearing at a constant speed] : prinyat Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 17 sentyabrya 2021 g. N 985-st mezhgosudarstvenny standart GOST ISO 4674-1-2021 vved. v deystvie v kachestve natsionalnogog standarta RF s 1 iyunya 2022 g. : data vved. 2022-06-01 : vzamen GOST 30304-95. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180923?ysclid=lggkofh9tx679204109>.

27. Sun Xiaoying, He Rijin, Wu Yue. A novel tearing residual strength model for architectural coated fabrics with central crack. *Construction and Building Materials*. 2020. № 263. 120133. 10.1016/j.conbuildmat.2020.120133.

28. Yuhang Liu, Li Zhang, Zhixing Li, Zhanguang Chen, Kai Huang, Licheng Guo. Investigation on damage evolution of open-hole plain woven composites under tensile load by acoustic emission signal analysis. *Composite Structures*. 2023. Vol. 305. 116481, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116481>.

29. Zhang Lanlan, Zhang Yingying, Zhao Qichong, Junhao Xu, Xue Jigang. Shape Effect Analysis of the Mechanical Properties of PVC-Coated Fabrics under Off-Axis Tension. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. 1-12. 10.1155/2020/9634120.

30. Lanlan Zhang, Zhang Yingying, Wei Song, Junhao Xu, Jigang Xue. A nonlinear damage constitutive model of PVC coated fabrics. *Structures*. 2021. № 30. P. 368–377. 10.1016/j.istruc.2021.01.027.

31. Chen Yonglin, Li Shuai, Ding Kai, Wang Fengxin, Fu Gongyi. Investigation of tear strength of an airship envelope fabric by theoretical method and uniaxial tear test. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2019. № 14. 155892501987929. 10.1177/1558925019879295.

32. Maekawa Shoji, Shibasaki Kouichi, Kurose Toyotoshi, Maeda Toshiyuki, Sasaki Yoshitaka, Yoshino Tatsuya. Tear Propagation of a High-Performance Airship Envelope Material. *Journal of Aircraft – J AIRCRAFT*. 2008. № 45. P. 1546–1553. 10.2514/1.32264.

33. FAA-P8110-2 CHG 2 “Airship Design Criteria”, Federal Aviation Administration, 1995.

34. Basit Munshi, Luo Shen-Yi, Mitra Aniruddha. A simplified constitutive and finite element model of plain weave fabric reinforcements for the biaxial loading. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2019. № 2. 10.1007/s41939-019-00051-4.

35. Yanchao Wang, Zhang Weizhao, Ren Huaqing, Huang Zhengming, Geng Furong, Li Yongxiang, Zhu Zengyu. An Analytical Model for the Tension-Shear Coupling of Woven Fabrics with Different Weave Patterns under Large Shear Deformation. *Applied Sciences*. 2020. 10.1551.10.3390/app10041551.

36. Xu Ziwen, Chen Yanhong, Cantwell W. J., Guan Zhongwei. Multiscale modelling of scaling effects in the impact response of plain woven composites. *Composites Part B: Engineering*. 2020. № 188. 107885. 10.1016/j.compositesb.2020.107885.

37. Herath Sumudu. Multiscale modelling of woven and knitted fabric membranes. 2020. 10.17863/CAM.57314.

38. Trofimov D. A., Shalgunov S. I., Sokolov V. I., Simonov-Emelyanov I. D. Model, Analiz 3D-struktury i metod raschyota fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik materialov [Model, Analysis of 3D structure and method of calculation of physical and mechanical characteristics of materials]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Constructions made of composite materials]*. 2022. Issue 3. DOI: 10.52190/2073-2562_2022_3_10.

39. Kustov A. A., Ibragimov A. M. Matematicheskie modeli tekhnicheskikh tkaney s pokrytiem [Mathematical models of coated technical fabrics]. – (Materialy i oborudovanie [Materials and equipment]). – *Stroitelnye materialy [Building materials]*. – 2017. – № 1/2. – P. 94–98 : il. – ISSN 0585-430X.

40. Zhang Ying, Zhang Qilin, Zhou Chuan. The Visco-Elastic Behaviors of PVC Coated Fabrics under Different Stress and Temperatures. *Advanced Materials Research*. 2010. P. 168–170. 1476-1479. 10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.1476.



41. Asadi Hastia, Uhlemann Jorg, Stranghoner Natalie. Water infiltration impact on tensile strength and breaking strain of architectural fabrics. *Advances in Structural Engineering*. 2018. № 21. 136943321875600. 10.1177/1369433218756005.

42. Ambroziak Andrzej, Klosowski Pawel. Influence of Water-Induced Degradation of Polytetrafluoroethylene (PTFE)//Coated Woven Fabrics Mechanical Properties. *Materials*. 2022. № 15. 1. 10.3390/ma15010001.

43. Dobilaitė Vaida, Juciene Milda, Bliudzius Raimondas, Sveikauskaite Loreta. Investigation of some weathering impacts on tearing properties of PVC-coated fabrics used for architectural purposes. *Journal of Industrial Textiles*. 2020. № 51. 152808372098238. 10.1177/1528083720982384.

© Д. А. Кожанов, А. В. Гурин, 2023

Получено: 27.02.2023 г.