

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТКАННЫХ КОМПОЗИТОВ

**Н.Н. Берендеев, А.К. Любимов, В.В. Шабаров,
С.Г. Дербенев, В.Н. Каратаев**

Нижний Новгород

В работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований свойств тканых композитов и конструктивных элементов амфибийных судов, выполненных на их основе. Рассмотрено влияние масштабного эффекта и скорости нагружения на деформационные и прочностные характеристики композитов. Проведено исследование влияния температуры на прочностные характеристики конструктивных элементов при расслаивании.

Введение

Повышение требований к экологии стимулировало развитие малых и средних амфибийных судов на воздушной подушке. В конструкции последних широко используются пневматические оболочки, из которых выполнены гибкие ограждения. Длины оболочек достигают 15 м, а температуры при эксплуатации изменяются от -40 до $+80$ °С.

В качестве материалов для изготовления оболочек широко используются технические ткани типа “Арктика”. Подобные материалы представляют собой тканый композит. В качестве арматуры композита используются волокнистые каркасы, изготовленные текстильными методами. Уникальное сочетание гибкости, легкости, высокой прочности и вязкости разрушения, характерное для текстильных армирующих структур, определяет их преимущество при изготовлении гибких ограждений амфибийных судов.

Конструктивные элементы амфибийных судов, выполненные с использованием тканых материалов, достаточно разнообразны и работают при различных видах нагружения. В то же время заводы-изготовители предоставляют данные только о максимальных разрывных усилиях, определенных на образцах длиной 0,2 м и шириной 0,05 м при нормальных (комнатных) температурах, что является недостаточным для проведения расчетов на прочность и долговечность на стадии проектирования [1–3].

В работе проводится системное изучение влияния масштабного эффекта на процесс деформирования тканых композитов, а также исследуется влияние температуры на ход процесса разрушения расслаиванием выполненных из них конструктивных элементов. Изучается характер разрушения, его динамика, прочностные характеристики элемента при расслаивании и их зависимость от температуры. Испытания выполнены и обработаны с помощью экспериментального комплекса.

1. Экспериментальный комплекс

Для проведения экспериментальных исследований на кафедре теории упругости и пластичности Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского создан экспериментальный комплекс (рис. 1), включающий в себя:

- разрывную машину LR5K Plus;
- программное обеспечение для обработки результатов экспериментов;
- установку, обеспечивающую проведение испытаний при отрицательных температурах.



Рис. 1

Разрывная машина LR5K Plus позволяет проводить высокоточные испытания на растяжение–сжатие плоских и круглых образцов, выполненных из металлов, полимеров, древесины, картона, фанеры и др., испытания на малоцикловую усталость а также испытания на растяжение, раздир и расслаивание различных тканей и пленок. Максимальная нагрузка испытаний определяется емкостью силоизмерительного датчика. Ее наибольшее значение для данной машины составляет 5 кН при разрешающей способности менее 0,005% емкости датчика; точность измерения нагрузки – 0,25 Н.

Максимальный ход траверсы (без захватов) составляет 975 мм, скорость рабочего хода траверсы изменяется в диапазоне от 0,01 до 1020 мм/мин и определяется с точностью менее 0,2% от установленного значения скорости. Величина перемещения находится измерением положения подвижного захвата машины с точностью до 1 мкм.

Информация о текущих величинах нагрузки и перемещения отображается на дисплее а также передается на компьютер, который выполняет обработку результатов эксперимента на основе специализированного программного обеспечения. Температурная камера, входящая в состав комплекса, позволяет проводить испытания образцов в диапазоне температур от –70 до +300 °С с точностью до 0,5 °С. Внутренние размеры камеры составляют 600В×290Ш×280Г мм. Положительные температуры обеспечиваются с помощью нагревательных элементов, расположенных

в самой камере. Скорость нагрева камеры в области положительных температур составляет 10 °С/мин. Поддержание отрицательных температур в камере обеспечивается с помощью созданной специальной установки с использованием жидкого азота. Время вывода камеры на режим отрицательной температуры, равной –40 °С, составляет 45÷55 минут.

Съем данных (сведения о перемещении траверсы и показания силоизмерительного датчика) с разрывной машины производится в цифровом виде. Для обработки поступающих цифровых сигналов и управления разрывной машиной используется оригинальное программное обеспечение, которое позволяет задавать различные режимы нагружения, выполнять программирование собственных режимов нагружения и условий завершения испытания. Экспериментальные данные отображаются в режиме реального времени на экране компьютера в виде первичных диаграмм. По окончании эксперимента данные могут быть преобразованы во вторичные диаграммы. Программное обеспечение предоставляет возможность обработки данных, приводящей к автоматическому определению модуля Юнга, предела текучести, предела пропорциональности, предела прочности и т.п. В программном обеспечении заложена также возможность статистической обработки результатов серии экспериментов.

2. Испытываемые материалы и образцы

Экспериментальное исследование деформационных и прочностных свойств тканых композитов было выполнено для технических тканей VP 6545, VP 6580-620. В указанных материалах в качестве армирующих элементов используются капроновые нити, которые объединяются в текстильную форму путем сложения, и называются трощеным жгутом [4]. Армирующая ткань получается путем переплетения последних по схеме полотняного переплетения, при этом каждый жгут основы и утка проходят поочередно сверху и снизу ортогонально пересекающихся жгутов, что приводит к ортотропности данного материала. С обеих сторон армирующая ткань покрыта герметизирующей пленкой, образующей матрицу композита.

Исследование прочностных и деформационных свойств указанных материалов выполнялось путем проведения экспериментов на разрыв образцов, которые представляли собой полосу материала с заданными шириной и длиной рабочей части. Продольная ось образцов, а также направление нагрузки, совпадали с направлением жгутов, образующих армирующую ткань. В процессе испытаний, которые проводились при различных скоростях нагружения и температурах, строилась диаграмма деформирования, изучалось влияние скорости нагружения, температуры и масштабного фактора на прочностные и деформационные характеристики.

Широко используемым конструктивным элементом, выполненным с применением рассматриваемых тканых композитов, является их клеевое соединение с каким-либо пленочным материалом (полиуретановая пленка и т.п.). Такие конструктивные элементы могут работать на растяжение, расслаивание, сдвиг. В данной работе в качестве объекта исследования рассматривалось клеевое соединение ткани VP 6580-620 с полиуретановой пленкой ТПУ, выполненное с помощью клея ПУ 900.

3. Результаты экспериментов

3.1. Технические ткани. С целью исследования влияния масштабного эффекта, скорости нагружения и температуры на прочностные характеристики тканей были

проведены эксперименты на растяжение (разрыв). Использовались образцы шириной 10, 15, 20, 25 мм и длиной рабочей части 40, 50, 70, 80 мм, выполненные из ткани VP 6545.

Типичные диаграммы деформирования для данного материала при комнатной температуре и скоростях нагружения $V=10$ мм/мин (кривая 1) и $V=100$ мм/мин (кривая 2) приведены на рис. 2.

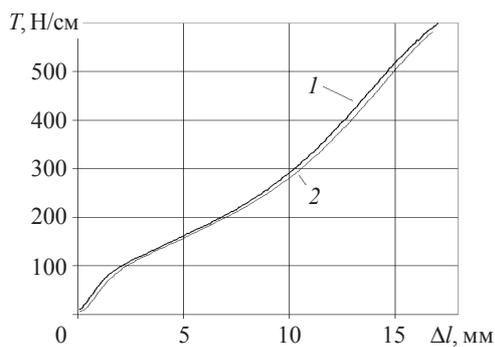


Рис. 2

Диаграммы построены в осях $T - \Delta l$, где T – натяжение, то есть усилие на единицу ширины образца (Н/см), Δl – удлинение образца (мм). Результаты испытаний образцов при комнатной температуре обобщены в табл. 1.

Таблица 1

№ образца	Ширина, мм	Длина, мм	Скорость нагружения, мм/мин	Максимальное усилие на ед. ширины, Н/см
1	2	3	4	5
1	10	40	10	570,840
2	10	50	10	578,551
3	10	70	10	582,711
4	10	80	10	544,71
5	15	40	10	604,244
6	15	50	10	604,199
7	15	70	10	596,995
8	15	80	10	593,154
9	20	40	10	623,793
10	20	50	10	621,575
11	20	70	10	554,869
12	20	80	10	579,49
13	25	40	10	610,547
14	25	50	10	604,297
15	25	70	10	598,115
16	25	80	10	600,607
17	10	40	100	554,75
18	10	50	100	619,999
19	10	70	100	561,139
20	10	80	100	541,187
21	15	40	100	641,595
22	15	50	100	643,056
23	15	70	100	648,435
24	15	80	100	633,135

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
25	20	40	100	622,849
26	20	50	100	577,409
27	20	70	100	643,089
28	20	80	100	653,749
29	25	40	100	654,913
30	25	50	100	585,326
31	25	70	100	588,904
32	25	80	100	585,998

Базовым материалом, который применялся в рассматриваемых конструктивных элементах, являлась ткань VP 6580-620. Исследовалось поведение данного материала при положительных и отрицательных температурах в экспериментах на растяжение. На рис. 3 представлены диаграммы деформирования для образцов из ткани VP 6580-620 при температуре 20 °С (кривая 1) и при температуре –40 °С (кривая 2). Скорость нагружения равнялась 20 мм/мин.

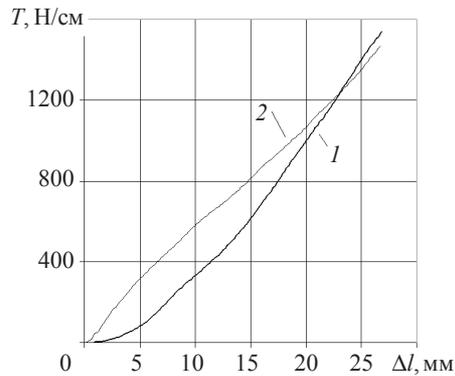


Рис. 3

3.2. Конструктивный элемент. Важным типом эксперимента, который, во-первых, дает достаточно полное описание одного из наиболее характерных случаев разрушения рассматриваемого конструктивного элемента, а, во-вторых, не проводится поставщиками материалов, является эксперимент на расслаивание конструктивного элемента. На рис. 4 представлена схема нагружения конструктивного элемента при проведении эксперимента. На рисунке введены следующие обозначения: 1 – ткань VP 6580-620, 2 – клеевой слой, 3 – пленка ТПУ, F – сила, растягивающая конструктивный элемент.

Испытание конструктивного элемента на расслаивание проводилось при значениях температуры –40, 20, 50, 80 °С и скорости нагружения $V = 120$ мм/мин. Рассматривались образцы с длиной рабочей части 13 см и шириной 2,5 см. Диаграммы деформирования, полученные при проведении экспериментов, представлены на рис. 5: кривая 1 соответствует температуре испытания –40 °С, 2 – 20 °С, 3 – 50 °С, 4 – 80 °С. По вертикальной оси здесь

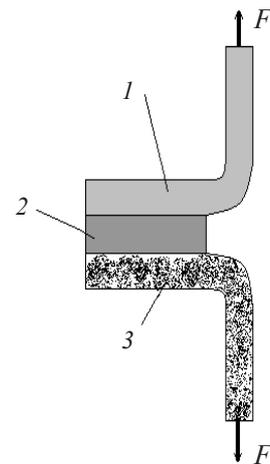


Рис. 4

откладывалась величина \bar{T} натяжения, нормированного максимальным его значением, возникающим в ходе эксперимента, по горизонтальной – ход траверсы испытательной машины Δl .

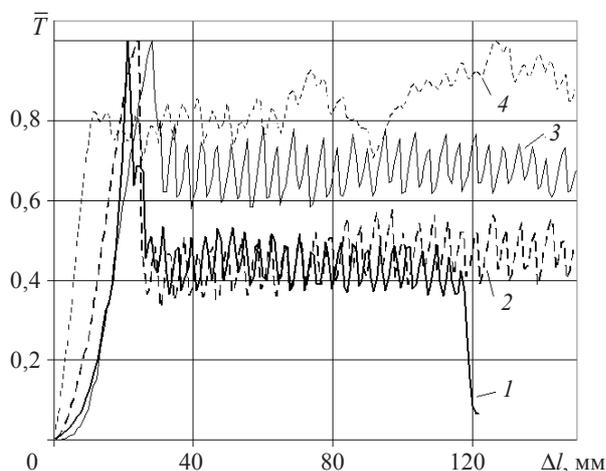


Рис. 5

Диаграммы деформирования на рис. 5 имеют два ярко выраженных участка. На первом участке не происходит нарушения сплошности (расслаивание) элемента, и этот участок диаграмм имеет такой же вид, что на рис. 2 и 3. На втором участке процесс разрушения носит циклический характер, что обусловлено структурой тканного материала. Процесс нарушения сплошности связан как с величиной среднего натяжения T_{cp} , так и с величиной размаха ΔT , которые являются характеристиками циклического процесса изменения величины натяжения T .

В табл. 2 приведены усредненные значения размахов натяжения ΔT и средних натяжений при расслаивании T_{cp} в зависимости от температуры, при которой проводился эксперимент, $T_{нач}$ – величина натяжения, соответствующая началу процесса разрушения.

$t, ^\circ\text{C}$	-40	20	50	80
$T_{нач}, \text{Н/см}$	175	110	80	30
$\Delta T, \text{Н/см}$	21	18	11	4
$T_{cp}, \text{Н/см}$	75	55	53	30

4. Анализ экспериментальных данных

С целью исследования влияния длины, ширины образца, скорости нагружения на максимальное значение натяжения образца был выполнен дисперсионный анализ [5] экспериментальных данных, приведенных в табл. 1. Его результаты показывают, что с уровнем значимости 0,05 длина образца и скорость нагружения не влияют на исследуемую характеристику (максимальное значение натяжения), а с уровнем значимости 0,015 не наблюдается влияния на указанную характеристику и ширину образца. На основании этого можно сделать вывод о том, что указанные факторы не оказывают существенного влияния на результаты эксперимента по определению максимального значения натяжения, то есть влиянием масштабного фактора с

достаточной степенью точности можно пренебречь.

Анализ диаграмм, полученных в результате проведения экспериментов для конструкционного элемента на расслаивание, показывает, что с ростом температуры испытания происходит уменьшение величины натяжения T , при которой начинается процесс разрушения (см. табл. 2).

Наблюдается и изменение характера разрушения. Разрушение при температурах $-40, 20^\circ\text{C}$ начинается по слою матрицы в ткани. При температуре 50°C первый акт разрушения происходит по слою матрицы, в дальнейшем ход процесса разрушения определяется разрушением клеевого слоя. При 80°C процесс разрушения начинается разрушением клеевого слоя. Этим можно объяснить исчезновение первоначального пика при температуре 80°C на диаграмме деформирования (рис.5, кривая 4).

Дальнейший процесс разрушения также во многом определяется величиной температуры. При температурах от -40 до 50°C процесс разрушения имеет ярко выраженный периодический (скачкообразный) характер, причем величина скачка разрыва, соответствующая удлинению образца Δl на рис.5, определяется размером ширины жгута, из которого выполнена армирующая ткань. При увеличении температуры и развитии разрушения в клеевом слое скачкообразность процесса практически исчезает, что наглядно отражается на соответствующей диаграмме (рис. 5, кривая 4).

Аналогичные результаты были получены и в случае, когда конструктивный узел был выполнен из ткани VP 6580-620 и лавсановой ткани ТЛФ-5, соединенных с помощью клея ПУ 900.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования механических свойств тканых композитов позволяют сделать вывод о том, что такая важнейшая характеристика, как максимальное натяжение на разрыв, слабо зависит от ширины и длины образца, а также от скорости деформирования в рассмотренном диапазоне $10-100$ мм/мин. Эксперименты по исследованию поведения конструктивного элемента, изготовленного из тканного композита и полиуретановой пленки, показали изменение характера разрушения по мере роста температуры, выявили наличие двух стадий процесса разрушения.

Литература

1. *Legorju-jago, K.* Fatigue initiation and propagation in natural and synthetic rubbers / K. Legorju-jago, C. Bathias // Int. J. of Fat. – 2002. – Vol. 24. – P. 85–92.
2. *Filis, P.A.* Classical fatigue analysis and load cycle mix-event damage accumulation in fibre reinforced laminates / P.A. Filis, I.R. Farrow, I.P. Bond // Int. J. of Fat. – 2004. – Vol. 26. – P. 565–573.
3. Композиционные материалы. В 8-ми т. Т. 8. Анализ и проектирование конструкций / Под ред. К. Чамиса. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
4. Композиционные материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарпопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 540 с.
5. *Смирнов, Н.В.* Теория вероятностей и математическая статистика в механике / Н.В. Смирнов, И.В. Дудин-Барковский. – М.: Физматгиз, 1965. – 554 с.

[30.06.2006]

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WOOVEN COMPOSITE
DEFORMATION PROPERTIES**

N.N. Berendeyev, A.K. Ljubimov, V.V. Shabarov, S.G. Derbenev, V.N. Karataev

The experimental results of investigating the properties of woven composites and structural elements of amphibian ships, built using these materials are discussed in the paper. The effect of a scale factor and a loading velocity to the deformation and strength characteristics of the composites is considered. An analysis of the structural element strength characteristics under splitting is performed using various temperatures.