

УДК 539:374.002.62

Ю.В. ВАСИЛЕВИЧ, д-р физ.-мат. наук, В.М. САХОНЕНКО,
С.В. САХОНЕНКО, кандидаты физ.-мат. наук, К.А. ГОРЕЛЫЙ, Е.В. МАЛЮТИН
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕУПРУГОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СЖАТИЯ ТКАНИ Т-13

Получены расчетные формулы, установлены способы и разработаны методы по определению неупругого относительного сжатия семейств нитей у тканей гладкого переплетения и у биаксиальных тканей. Проведены испытания и определены максимальные значения неупругого относительного сжатия у тканей Т-13, и ВХ-470.

Ключевые слова: препрег, волокнистые материалы, ткань, сжатие, экспериментальное определение

Введение. Технологический процесс изготовления изделий из композиционно-волокнистых материалов состоит из следующих стадий: формование основных и свободных поверхностей заданной геометрии, т.е. получение полуфабрикатов в виде слоистой структуры семейств нитей пропитанных связующим; отверждение связующего; механическая обработка поверхностей изделия до требуемой точности. Особый интерес представляет стадия получения полуфабриката. Здесь можно производить некоторые дополнительные операции, позволяющие заменить механическую обработку после отверждения связующего. В этой связи альтернативой просверленным отверстиям является формование их методом прокалывания [1–2] в еще неотвержденном полимерно-волокнистом материале конструкции. В процессе формования таких отверстий происходит раздвигание нитей и перемещение их на конечные расстояния. При этом такие перемещения осуществляются практически за счет так называемых неупругих перемещений. Упругие перемещения малы, сопровождаются большими усилиями и даже приводят к разрушению армирующего материала.

Другой, не менее важной областью использования свойств неупругих перемещений является формование изделий на гибких оправках, например, торовых оболочек. Для этого на круглую оправку наматывается цилиндрическая оболочка. Дальнейшая трансформация оболочки происходит путем ее изгиба совместно с оправкой. В результате торовая оболочка не должна иметь утяжек и разрывов армирующего материала, складок на ее поверхности и внутренних расслоений. Такое возможно, если при деформации армирующий материал оболочки перемещается только в пределах неупругих деформаций. Это подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями.

Так, эксперименты, выполненные Л.-В. Чангом с соавторами [3] показали, что прочность на растяжение плоских образцов из тканых углепластиков и стеклопластиков с отформованными отверстиями диаметром 3,15...9,53 мм повышается на 2,7...38,3 % по сравнению с просверленными образцами.

Испытания на растяжение, проведенные на многослойных тканых стеклопластиковых образцах с отверстием 8 мм показали снижение прочности на растяжение по сравнению с цельными образцами на 31,7 % и 4,2 % соответственно для просверленных и отформованных отверстий [4]. Положительный результат с прокалыванием отверстий диаметром 16 мм в намотанном однонаправленном стеклопластике до-

стигнут при внеполосной заделке штуцера в тонкостенную оболочку при изготовлении торовых баллонов [5].

Рассмотренные примеры технологических приемов изготовления изделий приводят к необходимости знания одной общей характеристики препрегов — величины неупругой составляющей сжатия армирующего материала.

Исследуемые здесь препреги представляют собой слоистые композиты, армированные под углом $\pm\varphi_0$, т.е. не имеют регулярной структуры и, следовательно, обладают четко выраженной анизотропией каждого слоя. Такие препреги изготавливаются на основе тканей гладкого переплетения, либо с использованием мультиаксиальных тканей. Тканые материалы, являющиеся, в основном, двумерными структурами, проявляют хорошую стабильность свойств во взаимно-ортогональных направлениях основы и утка. Кроме того, тканые материалы характеризуются более сбалансированными свойствами в плоскости ткани. На этом основании, если рассматривать задачи, которые приводят к деформациям, не выходящим за рамки слоя, то такую систему можно рассматривать как плоскую. Это может служить оправданием применения в испытаниях плоских образцов, изготовленных из тканого материала.

Рассматривается задача об установлении неупругой составляющей сжатия ткани, которое осуществляется в ее плоскости. Отметим, что ввиду абсолютной гибкости нитей сжатие в обычном смысле в направлении нитей невозможно, так как оно приводит к потере устойчивости каркаса ткани. Существует и другой вид сжатия. Силы, осуществляющие такое сжатие, лежат в касательной плоскости к ткани и направлены поперек нитей. Такое сжатие может происходить, например, при изгибе цилиндрической оболочки в торовую, если эта оболочка находится в состоянии препрега, т.е. когда связующее еще не заполимеризовано, при проколе круглого отверстия. В результате армирующий материал такой оболочки имеет возможность сдвигаться на конечное расстояние без разрыва. Другим примером является сжатие, которое происходит при параллельном сдвиге нитей одного семейства относительно второго.

Определение неупругой составляющей сжатия тканей.

В условиях поставленной задачи сжатие осуществляется следующим образом. Происходят геометрические изменения параметров сечения нитей до установления тех размеров, которые обеспечивают целостность ее формы независимо от величины приложенной внешней нагрузки. Одновременно происходит параллельный сдвиг нитей, уменьшая расстояние между ними. Таким образом, рассматриваемое сжатие

можно трактовать как процесс, осуществление которого происходит в два этапа. На первом «недоуплотненная» нить получает «нормальное уплотнение». В этом случае сечение нити уменьшается за счет более компактного расположения в сечении элементарных нитей, из которых состоит сама нить. Количество таких нитей достигает более 1000 штук. Второй этап сжатия характеризуется только упругими деформациями. В какой-то мере этап упругого сжатия семейства нитей похож на сжатие упругого твердого тела. На этом основании можно руководствоваться построением линейных зависимостей между деформациями и напряжениями [6]:

$$\Delta W = \gamma + \gamma_1 P, \quad (1)$$

где γ и γ_1 — некоторые постоянные, причем γ описывает неупругое сжатие, а γ_1 — упругое; ΔW — деформация; P — нагрузка.

Геометрическая интерпретация сделанных предположений представлена на рисунке 1.

Здесь на участке OA графика деформация ткани осуществляется за счет неупругих перемещений при изменении параметров сечения нитей. Препятствием к таким изменениям являются силы трения. На участке AB перемещения осуществляются только за счет упругой деформации нитей ткани при сжатии. Очевидно, уменьшение или увеличение сил трения никак не может сказаться на величине неупругих деформаций, так как неупругие деформации — чисто геометрическая величина, характеризующая степень уплотнения препрегов армирующим материалом. Уменьшение сил трения приводит к изменению участка неупругих деформаций в сторону уменьшения. Графически такое изменение приводит к сближению точек A и C . Таким образом, величина γ , показанная на рисунке представляет собой неупругую составляющую и не зависит от изменения внутренних сил трения для одной и той же ткани. На этом основании для отыскания неупругой составляющей было сделано предположение о линейной зависимости между деформациями и напряжениями. Линейное представление, очевидно, допускает на начальной стадии нагружения значительную погрешность. Однако в дальнейшем, когда неупругие деформации преодолены, описание деформативности с использованием линейной зависимости становится приемлемым. Более того, эта погрешность не влияет на точность нахождения неупругой составляющей деформации сжатия препрегов.

Для определения относительного неупругого сжатия разработан прибор, который представляет собой четырехзвенник в виде ромба. Образец ткани в виде ромба со сторонами параллельными семействам нитей защемляется по сторонам четырехзвенника. Нагрузка прикладывается к противоположным углам четырехзвенника. На рисунке 2 представлена фотография этого прибора с закрепленным в нем образцом ткани.

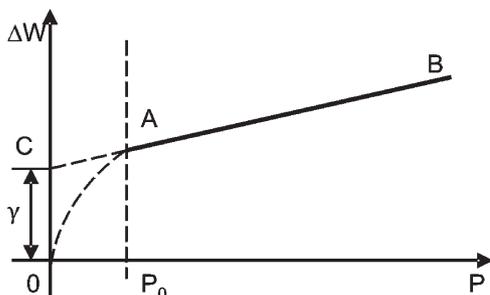


Рисунок 1 — Зависимость деформативности ткани от нагрузки

При испытаниях образец удлиняется в направлении действия силы и укорачивается в перпендикулярном направлении, оставаясь все время ромбом. В результате уменьшается расстояние между параллельными сторонами ромба, что приводит к сжатию семейств нитей. На рисунке 3 показано нагружение образца.

Предполагаем линейную зависимость перемещения ΔW от нагрузки P . Таким образом, должно быть справедливым соотношение (1). Постоянные γ и γ_1 найдем методом наименьших квадратов с использованием результатов проведенных испытаний:

$$m \cdot n \cdot \gamma + \left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i \right) \gamma_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij},$$

$$\left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i \right) \gamma + \left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i^2 \right) \gamma_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i W_{ij}. \quad (2)$$

Это окончательный вид так называемой нормальной системы способа наименьших квадратов, где n — количество испытаний, а m — количество измерений в каждом испытании. Из системы (2) находим γ и γ_1 , а затем подставляем их в эмпирическую формулу (1).

При испытаниях фиксируется усилие P , приложенное к рамке четырехзвенника и перемещение ΔW , которое равносильно изменению длины диагонали ромба. Результаты испытаний для ткани Т-13 представлены на диаграмме рисунок 4.

Здесь принятые обозначения $\blacklozenge, \dots, \blacksquare$ представляют собой точки с координатами $(P, \Delta W_{ij})$. Теоретическая зависимость результатов испытаний отождествляется с линейной зависимостью на том же рисунке.

Предполагая, что $\Delta W = \gamma$, легко установить следующие геометрические зависимости:

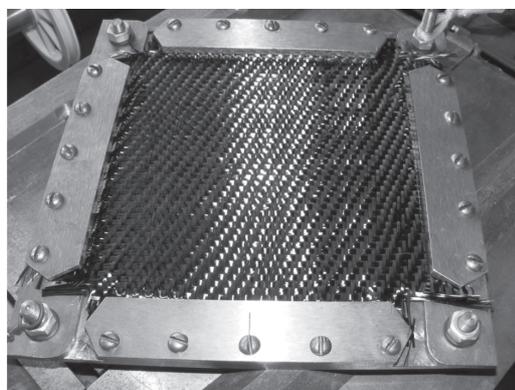


Рисунок 2 — Приспособление для проведения испытаний

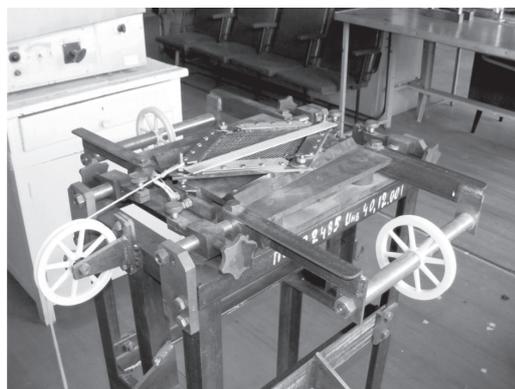


Рисунок 3 — Фотография образца в момент нагружения

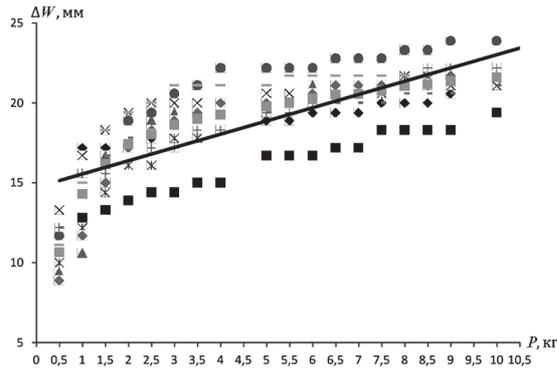


Рисунок 4 — Диаграмма зависимости перемещения ΔW при испытаниях ткани Т-13 от нагрузки P

$$\gamma_0 = \frac{\sin \varphi_0 - \sin \varphi}{\sin \varphi_0}, \quad (3)$$

$$2(a \cos \varphi_0 - a \cos \varphi) = \gamma,$$

где $2\varphi_0$ — угол между семействами нитей у образца до испытаний; 2φ — угол между семействами нитей у образца в результате деформации при испытаниях; a — длина стороны ромба у образца; γ — неупругое удлинение образца, установленное по результатам решения системы (3); γ_0 — относительная деформация при сжатии образца ткани в направлении перпендикулярном к линии действия нагрузки.

В результате решения предыдущей системы получим:

$$\gamma_0 = 2 \frac{\sin \varphi_0 - \sqrt{1 - \left(\cos \varphi_0 - \frac{\gamma}{2a} \right)^2}}{\sin \varphi_0}. \quad (4)$$

Для ткани Т-13 расчеты по формулам (2), (4) показывают, что неупругое удлинение диагонали ромба равно $\gamma = 14,36$ мм. При этом длина стороны ромба составляла 100 мм. Относительная неупругая составляющая $\gamma_0 = 0,12$.

Проведенные исследования для ткани Т-13 позволяют сделать вывод о том, что такие же результаты можно получить и для тканей гладкого переплетения (ткани, у которых нет механических связей в узлах переплетения). Также можно ставить вопрос об установлении неупругой составляющей для мультиаксиальных тканей. Мультиаксиальная ткань — это текстильный нетканый материал, состоящий из нескольких слоев нитей, прошитых полиэфирной нитью. Каждый слой состоит из однонаправленных нитей, ориентированных в направлении в соответствии с требуемой схемой армирования. Для подтверждения сказанного были проведены испытания биаксиальной ткани ВХ-470. Графическое изображение результатов испытаний представлено на рисунке 5.

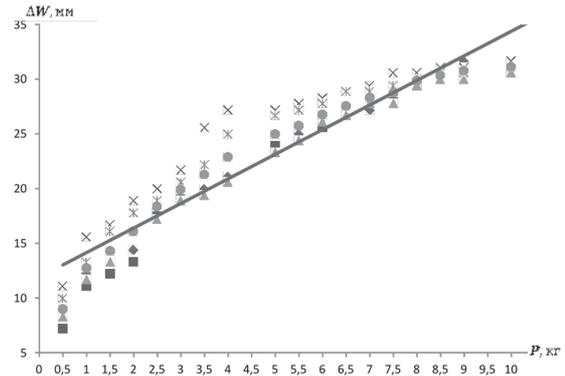


Рисунок 5 — Диаграмма зависимости перемещения ΔW при испытаниях биаксиальной ткани ВХ-470 от нагрузки P

Расчеты по формулам (2)—(4) показали, что $\gamma = 11,92$ мм, $\gamma_0 = 0,10$.

Заключение. Тканые материалы, обладающие свойствами, аналогичными свойствам тела с подвижной структурой, позволяют расширить технологический процесс изготовления изделий на стадии формования основных и свободных поверхностей заданной геометрии. При этом для управления такими операциями необходимо знание о величине неупругих перемещений при сжатии армирующего материала. Предложен способ нахождения максимального значения этого параметра.

Список литературы

1. Способ образования отверстий в изделиях из армированных пластмасс: а.с. / Е.П. Либерт, В.М. Сахоненко. — № 1431952; заявл. 01.09.86; опубл. 22.06.88.
2. Комков, М.А. Моделирование процесса формования отверстий в изделиях из неотвержденного полимерно-волоконистого материала / М.А. Комков, А.В. Колганов // Вестн. машиностроения МВГТУ им. Баумана. — 2004. — № 8. — С. 15—18.
3. Chahg, L.-W. Notched strength of woven fabric composites with molded-in holes / L.-W. Chahg, S.-S Yau, T.-W. Chou // Composites. — 1987. — № 18(3). — pp. 233—241.
4. Устройство для получения отверстий в изделиях: а.с. / А.В. Колганов, Е.П. Либерт, В.М. Сахоненко. — № 1431945; заявл. 16.12.86; опубл. 22.06.88.
5. Комков, М.А. Определение конструктивных и технологических параметров намотки композитных баллонов торовой формы / М.А. Комков. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. — 24 с.
6. Василевич, Ю.В. Деформационные характеристики текстильного каркаса препрега / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2008. — № 3(4). — С. 67—70.

Vasilevich Y.V., Sakhonenko V.M., Sakhonenko S.V., Gorely K.A., Malyutin E.V.

The theoretical and experimental studies on inelastic compression component determination for t-13 textile

The calculating formulas and practical methods to determine inelastic relative compression of yarn families are established for smooth weaving and biaxial fabrics. The maximum values of the inelastic relative compression for T-13 and ВХ-470 textiles are determined experimentally.

Поступила в редакцию 05.05.2011.