

УДК 678.5.067.5.057

А.В. ЧЕСНОКОВ, Е.Е. БАКСТ

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ПЛЕТЕНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Обоснована необходимость введения трансверсального армирования в плетеные армирующие каркасы. Приведены результаты исследований трансверсального армирования прошивкой плетеных слоев углепластиковыми стержнями. Определена причина увода иглы при армировании и способ ее устранения. Определено влияние схемы расположения стержней, шага и угла их наклона на прочность при поперечном отрыве. Приведено описание спроектированных лабораторных приспособлений для введения полой иглы и измерения усилия при ее вводе в плетеный слой. Определены силовые параметры армирования и спроектировано устройство для трансверсального армирования, работающее в автоматическом режиме.

углерод-углерод, композиционные материалы, трансверсальное армирование, плетение, прочность, прошивка

Первоначально создание углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) основывались на двухнаправленном армировании. Они обладали лучшей прочностью в плоскости армирования по сравнению с монолитным поликристаллическим графитом, но уступали по прочности в направлении нормальном к плоскости армирования. Введение трансверсальной арматуры существенно повышает прочность при межслойном сдвиге и поперечном отрыве [1].

Трехмерно-армированные материалы могут быть созданы прошивкой нитями или стержнями пакета однонаправленных или тканых слоев. Армирование толстостенных изделий в трансверсальном направлении эффективно выполнять стержнями. Для этого применяют различные устройства трансверсального армирования (ТВА), позволяющие механизировать процесс прошивки [2]. В зависимости от жесткости и прочности применяемых для ТВА стержней, прошивка выполняется либо непосредственно стержнем, либо при помощи полой иглы. В случае применения стержней с низкими физико-механическими показателями применяют устройства с полой иглой. При такой схеме прошивка производится полой иглой с заведенным в нее стержнем; после внедрения

иглы со стержнем в пакет стержень притормаживается, игла извлекается; далее следует обрезка и переход к следующей позиции.

Для повышения эксплуатационных свойств УУКМ на основе плетеных армирующих каркасов предлагается использовать ТВА. В соответствии с условиями насыщения и эксплуатации деталей из УУКМ, в качестве ТВА применяют стержни из углеродного волокна (УВ) на поливиниловом спирте (ПВС). После выжигания связующего такие стержни имеют открытую пористость, что обеспечивает возможность качественного насыщения материала углеродом, образующим матрицу композита. Для изучения влияния параметров процесса ТВА на межслойную прочность необходимо проведение экспериментальных исследований. Результаты этих экспериментов послужат основанием для разработки автоматизированного устройства ТВА, необходимого при изготовлении пространственно-армированных оболочек из УУКМ.

Целью настоящей работы является оценка влияния структурных параметров ТВА на прочность КМ с плетеной структурой армирующего каркаса, при поперечном отрыве и по результатам исследований проектирование устройства ТВА.

Исследования проводились на толстостенном пакете плетеных слоев ($b = 30$ мм), схемы ТВА реализовывались с помощью специального кондукторного приспособления, позволяющего вводить ручную полую иглу со стержнем в пакет. В приспособлении предусмотрены сменные кондукторные планки, позволяющие изменять шаг расстановки стержней, а также вводить иглу под разными углами.

Предварительные технологические эксперименты показали, что при введении иглы происходит ее увод в направлении острия. Это связано с воздействием материала пакета на клиновую заточку иглы. Для проведения последующих экспериментов использовали вращение иглы вокруг ее оси при введении в пакет, совершая один оборот на каждые 8...10 мм глубины внедрения.

На основании анализа известных методов испытаний на прочность при поперечном отрыве была принята методика испытаний, предложенная в работе [3]. Согласно этой методике при нагружении разрезного кольца (рис. 1, а) моментами по схеме, изображенной на рис. 1, б, в части кольца, противоположной разрезу, возникает напряженное состояние, близкое к чистому поперечному отрыву. При этом величину радиальных напряжений, действующих в трансверсальном направлении, с учетом обозначений рис. 1 можно определить по формуле:

$$\sigma_r^{\max} = \frac{3Pl}{b(R^2 - r^2)}. \quad (1)$$

Ширина рабочего участка образца меньше ширины образца в зонах закрепления консолей. В общем случае, при нагружении моментами разрезного кольца, расслоение – это результат совместного дей-

ствия напряжений σ_r и $\tau_{r\Theta}$. Чем меньше длина рабочего участка, тем меньше величина $\tau_{r\Theta}^{\max}$ на границе $\phi = \pm\phi_0$. Соотношение между касательными и нормальными напряжениями определится по формуле:

$$\tau_{r\Theta}^{\max} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi + 2l/(R+r)} \sigma_r^{\max}. \quad (2)$$

Разрушение образца может быть вызвано окружающими нормальными напряжениями σ_Θ . Для их оценки при $R/r > 0,8$ и $E_\Theta/E_r < 50$ можно пользоваться обычными формулами сопротивления материалов. Для того чтобы разрушение происходило путем межслоевого отрыва, необходимо, чтобы размеры образца удовлетворяли неравенству:

$$\frac{2h}{R+r} > \frac{4\sigma_r^e}{\sigma_\Theta^e}, \quad (3)$$

где σ_r^e и σ_Θ^e – предельные нормальные радиальные и окружные напряжения, соответственно.

Исходя из рекомендаций, изложенных выше, были определены геометрические размеры образца ($R = 38$ мм, $r = 30$ мм, $b = 25$ мм, $l = 300$ мм), спроектировано и изготовлено приспособление для испытаний. В качестве ТВА использовались углепластиковые стержни $\varnothing 1,18 \pm 0,04$ мм, полученные методом пултрузии на основе УВ УКН-5000 и водного раствора ПВС в качестве связующего.

Образцы для испытаний изготавливались путем нанесения требуемого количества плетеных слоев на оправку и последующей прошивкой стержнями при помощи полой иглы. После насыщения углеродом матрицы образцы испытывались на машине Р-0,5.

На первой стадии исследований оценивалось

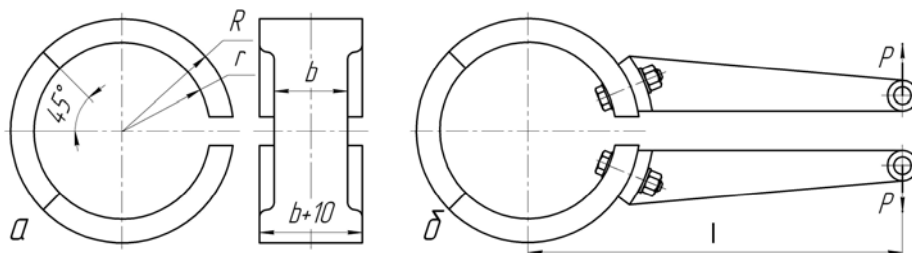
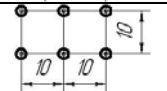


Рис. 1. Образец и схема испытаний на поперечный отрыв

влияние схемы расстановки стержней на межслоевую прочность. С этой целью экспериментально сравнивались две схемы расстановки трансверсальных стержней, при одинаковом количестве их на единицу площади поверхности – шахматная и прямоугольная, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1
Влияние схемы расстановки ТВА на прочность

Схема расстановки стержней	Прочность σ_r , МПа
Шахматная 	25
Прямоугольная 	31,5

Анализ полученных результатов показывает, что предпочтительной является прямоугольная схема расположения стержней. Для объяснения приведенных выше результатов можно предположить, что определяющим прочностью структурным параметром является максимальное расстояние между трансверсальными стержнями по одной из осей ортотропии плетеного слоя. Все последующие эксперименты проводились для прямоугольной схемы расстановки стержней при разном шаге расстановки; для сравнительной оценки эффективности ТВА была выбрана величина изменения трансверсальной прочности в сравнении с неармированным образцом. Результаты этих экспериментов иллюстрирует график (рис. 2). На этом графике по оси абсцисс – относительное повышение трансверсальной прочности, по оси ординат количество стержней на единицу площади поверхности.

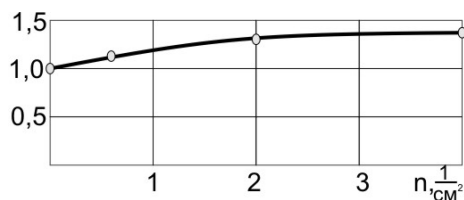


Рис. 2. Влияние шага расстановки ТВА на изменение прочности при поперечном отрыве

Анализ этого этапа исследований показывает, что с уменьшением шага расстановки стержней повышается трансверсальная прочность, однако уменьшение

шага целесообразно лишь до некоторого предела (примерно 5 мм). Дальнейшее увеличение количества стержней на единицу поверхности образца не приводит к росту межслоевой прочности. Это объясняется эффектом ослабления структуры при близком расположении стержней, связанным с концентрацией напряжений вблизи стержня.

Для определения влияния угла наклона трансверсальных стержней на межслоевую прочность были изготовлены партии образцов с одинаковым шагом расстановки стержней (15 мм) и различными углами наклона стержней к оси образца. Исследовались образцы с углами 15° и 30°. Результаты испытаний сопоставлялись с данными, полученными на образцах, армированных стержнями без наклона (0°). Результаты этих экспериментов отображены на рис. 3, здесь на графике по оси ординат – угол наклона трансверсальной арматуры к оси образца, по оси абсцисс – относительное изменение межслоевой прочности в сравнении с контрольным образцом. Анализ этого этапа исследований показывает, что отклонение ТВА от нормали к слою резко снижает межслоевую прочность при поперечном отрыве. Сопоставление полученных результатов с данными по влиянию шага расстановки стержней на прочность позволяет сделать вывод, что снижение прочности вследствие отклонения стержней от нормали может быть столь значительным, что его невозможно компенсировать уменьшением шага расстановки стержней.

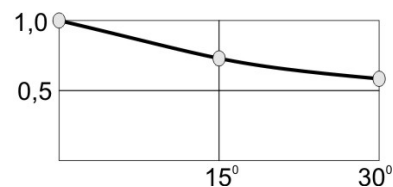


Рис. 3. Влияние угла наклона стержней на прочность при поперечном отрыве

Для разработки конструкции автоматизированного устройства ТВА необходимо иметь данные по усилию, необходимому для введения иглы в пакет. Соответствующая схема измерения усилия изображена на рис. 4. Результаты эксперимента иллюстрируются графиком на рис. 5. Анализ этих экспери-

ментов позволяет предположить, что применение типовых малоразмерных пневмоцилиндров (диаметр поршня около 50 мм) в качестве привода автоматизированного устройства ТВА обеспечит его нормальное функционирование.

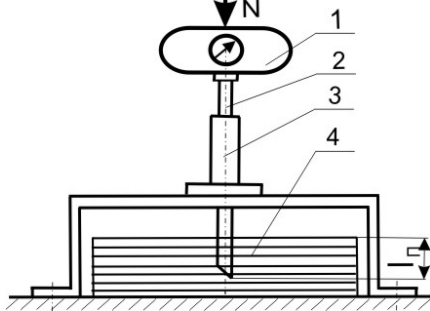


Рис. 4. Схема измерения усилия при введении иглы в пакет:

1 – динамометр; 2 – игла; 3 – кондукторная втулка; 4 – плетеный пакет

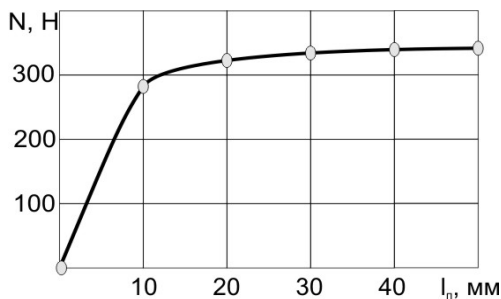


Рис. 5. Зависимость усилия сопротивления внедрению иглы от глубины проникновения

Для оценки влияния ТВА на основные физико-механические характеристики материала воспользуемся данными работы [4]. В ней показано, что для случаев, когда площадь сечения ТВА составляет не более 5% от площади армируемой поверхности, это влияние крайне незначительно. Как было показано выше, оптимальной может быть принята схема, когда на площадь в 1 см приходится 2...4 стержня, расположенных в углах квадрата. В этом случае показатели соотношения площади стержней к общей площади – 2...4%. Следовательно, влияние ТВА на физико-механические показатели материала в плоскости плетеного слоя будет незначительно и его можно не учитывать.

На основании приведенных данных было спроектировано и изготовлено (рис. 6) устройство для ТВА с вращением и пневмоприводом перемещения иглы,

работающее в автоматическом режиме и позволяющее обеспечить необходимые схемы армирования.

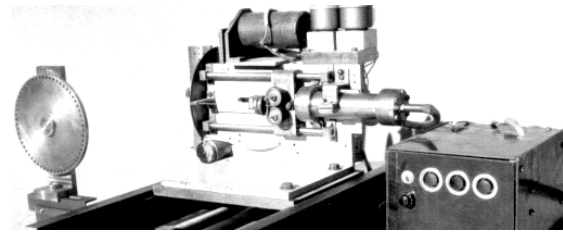


Рис. 6. Устройство для ТВА

Выводы

Результаты исследований влияния схемы и шага расположения стержней, а так же угла их наклона на прочность при поперечном отрыве позволили выработать рекомендации по расположению стержней при ТВА. Полученные данные по предотвращению увода иглы и силовым параметрам процесса ТВА в комплексе с требованиями к проведению процесса позволили спроектировать автоматическое устройство для ТВА.

Литература

1. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник / Ю.М. Тарнопольский, И.Г. Жигун, В.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
2. Краснов В.И., Кузнецов В.А., Максиков А.Ю. Автоматизированный способ трансверсального армирования композитов коротковолнистой арматурой // Механика композитных материалов. – 1987. – № 3. – С. 205-210.
3. Mortensen A. Concise Encyclopedia of Composite Materials / Elsevier. – 2007. – 1050 p.
4. Локтионов В.Д. Влияние введения трансверсального армирования на физико-механические характеристики композита // Тезисы VI Всесоюзной конференции по механике композиционных материалов. – Рига, 1990. – С. 32-33.

Поступила в редакцию 13.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Витренко, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск.