

## ПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ НА СРЕЗ

Данная статья посвящена вопросам определения предела прочности на срез – одного из самых противоречивых параметров, используемых при расчете механических соединений. В отличие от металлических деталей для композитных необходимо различать предел прочности на сдвиг и на срез. Если предел прочности на сдвиг в плоскости укладки слоев является паспортной характеристикой пакета, то предел прочности на срез – это предельный уровень касательных напряжений, предшествующий разрушению поверхности раздела отделяемого фрагмента и основной части детали в механическом соединении. По этой причине область применения термина «предел прочности на срез» ограничена именно механическим соединением и для его оценки необходимо использовать специальные подходы.

Авторы работ [1, 2] показали, что прочность на срез волокнистых композитов находится в пределах

$$\tau_{90,0} \leq \tau_{ср} \leq \tau_{0,90}, \quad (1)$$

где  $\tau_{90,0}$  – прочность на срез по плоскости, параллельной волокнам, а  $\tau_{0,90}$  – перпендикулярной (рис. 1).

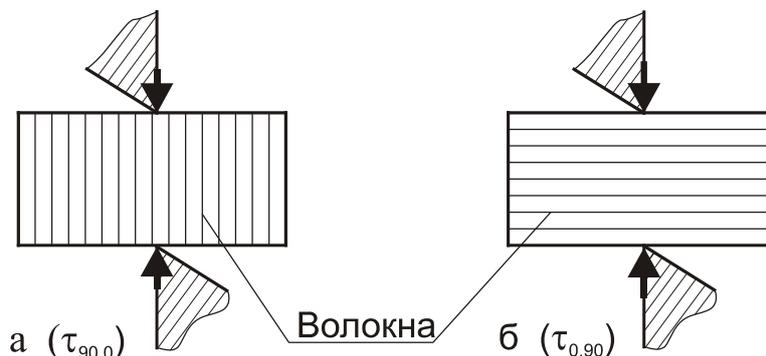


Рисунок 1 – К определению граничных значений предела прочности на срез

Такой подход нашел свое отражение в стандарте [3], где описан метод, который заключается в определении величины перерезывающей силы при срезе образца по двум плоскостям (рис. 2). Стандарт не распространяется на ячеистые материалы, листовые материалы толщиной менее 2 мм и на материалы с величиной модуля упругости менее 490 МПа. Согласно стандарту образцы должны быть в виде брусков прямоугольного сечения со следующими геометрическими параметрами: длина – не менее 100,0 мм; ширина –  $15,0 \pm 0,5$  мм; толщина –  $10,0 \pm 0,5$  мм. Образцы вырезать так, чтобы обеспечить срез в плоскости укладки.

Преимуществом данного подхода является возможность определения  $\tau_{90,0}$ ,  $\tau_{0,90}$ . Недостатками следует считать ограничения на геометрию листов КМ ( $\delta \geq 2$  мм), и на модуль упругости материала, а также то,

что данная методика испытаний не отражает условия работы материала деталей в механических соединениях.

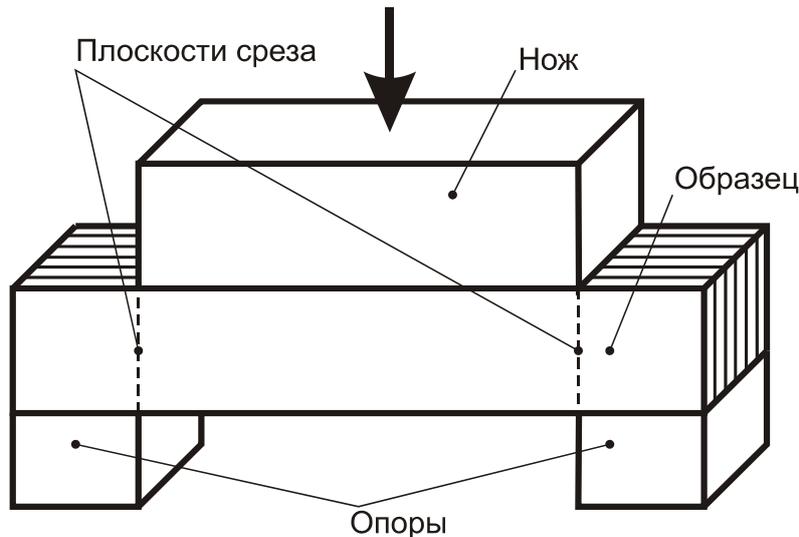


Рисунок 2 – Схема испытания образца на срез

Для оценки прочности на срез пакета с произвольной укладкой как самостоятельного параметра учтено, что срезаемая площадь волокон и связующего не зависит от угла армирования (рис. 3), а пакет, армированный в направлении действия усилия в крепежном элементе, обладает пределом прочности на срез на уровне  $\tau_{90,0}$ . Эти обстоятельства позволяют для прогнозирования прочности сложно-армированного КМ использовать правило смесей, выраженное в виде зависимости [4]

$$\tau_{cp} = \frac{1}{\delta_{\Sigma}} \left[ \delta_0 \tau_{90,0} + (\delta_{\Sigma} - \delta_0) \tau_{0,90} \right], \quad (2)$$

где  $\delta_0$  – толщина слоев с армированием  $\varphi = 0$  (см. рис. 3);

$\delta_{\Sigma}$  – толщина соединяемой детали.

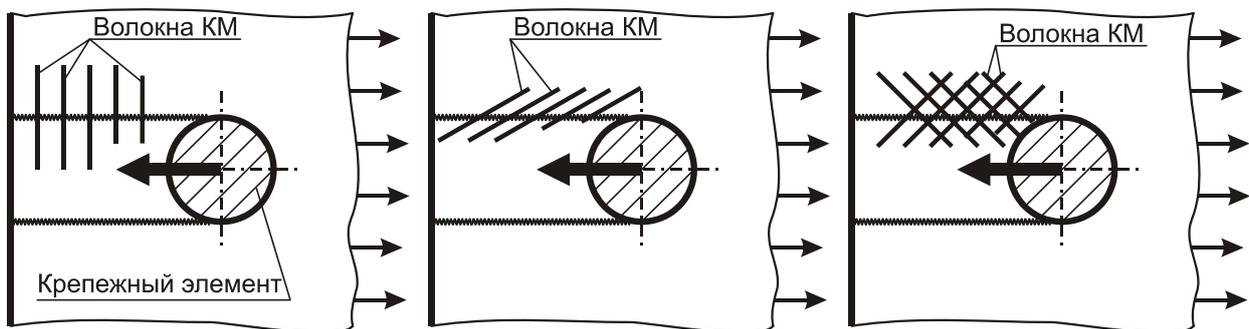


Рисунок 3 – К анализу прочности КМ на срез

В работе [5] предлагается для моделирования соединения использовать образец круглой либо восьмигранной формы. Для исследования были применены образцы из материала ЭЛУР-008 П/5-211-БН следующих структур: 1)  $0^\circ - 80\%$ ,  $\pm 45^\circ - 20\%$ ; 2)  $0^\circ - 70\%$ ,  $\pm 45^\circ - 20\%$ ,  $90^\circ - 10\%$ ; 3)  $0^\circ - 50\%$ ,  $\pm 45^\circ - 40\%$ ,  $90^\circ - 10\%$ . Геометрия образцов аналогична описанным в работе [6] (рис. 4) (толщина образцов – 3,48 и 5,22 мм). Согласно оценке

по формуле (8) в работе [4] для таких образцов возможность среза можно не рассматривать, если расстояние до края больше 5,8 диаметров при толщине образца 5,22 мм и 8,7 при толщине 3,48 мм. Так как текущее значение относительной толщины составляет 3,5 диаметров, то разрушение образца на срез должно иметь место.

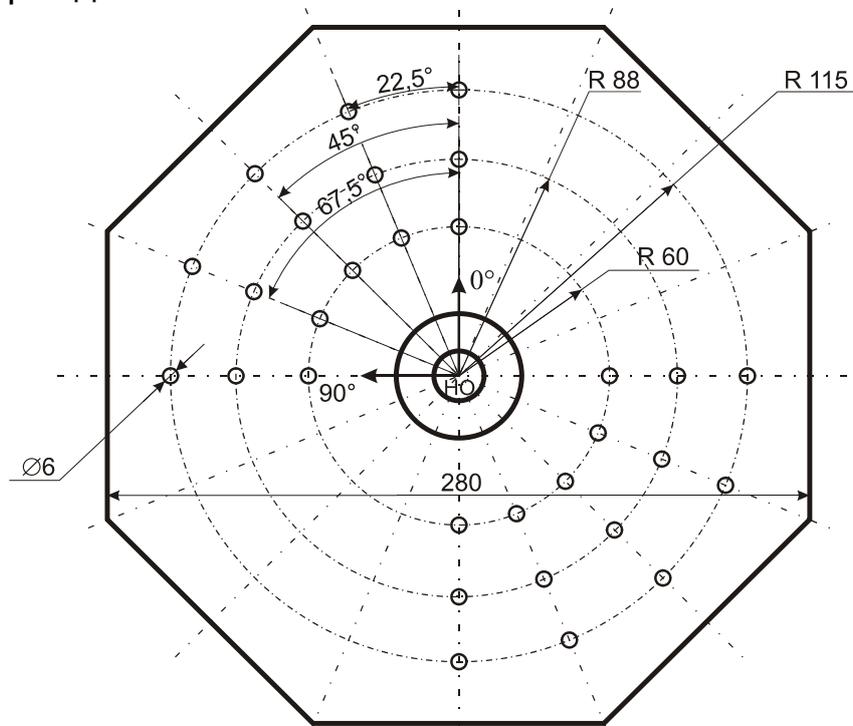


Рисунок 4 – Образец для испытания

Полученные результаты испытаний на срез (рис. 5 и таблица) показали, что для структуры № 1 срез наблюдался при нагружении в направлении  $0^\circ$  и  $22,5^\circ$  (при этом срез развивался только в направлении  $0^\circ$ ), для структуры № 2 срез наблюдался лишь при нагружении в направлении  $0^\circ$ , для структуры № 3 срез не наблюдался, даже когда расстояние от центра отверстия до края детали было уменьшено до одного диаметра (наблюдалось либо разрыв образца, либо глубокое смятие отверстия).

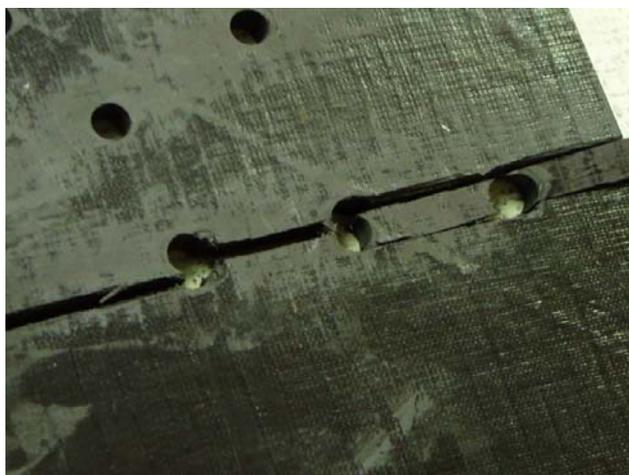


Рисунок 5 – Фрагмент образца после испытаний

### Результаты экспериментов на срез

№ схемы укладки	Толщина, мм	Экспериментальное значение $\tau_{ср}$ , МПа	Прогноз $\tau_{ср}$ по формуле (2), МПа	Прогноз $\tau_{ср}=F_{xy}$ по формуле Мизеса – Хилла, МПа
1	5,22	79	80,4	84
2	5,22	93	83,1	84
2	3,48	88	83,1	84
3	3,48	Среза нет	88,5	127

Анализ результатов исследований показал следующее:

–  $\tau_{90,0}=75$  МПа (нижняя граница предела прочности на срез численно равна пределу прочности на сдвиг монослоя), в этом случае  $\tau_{0,90}\approx 102$  МПа;

– максимальное отклонение теоретических значений предела прочности на срез, полученных по формуле (2), от экспериментальных составляет  $\sim 11\%$ , а значений, полученных по формуле Мизеса – Хилла, –  $10\%$ ;

– в ходе исследования образцов со структурой № 3 чистого среза не наблюдалось, из чего следует, что удельного содержания слоев с укладкой вдоль направления нагружения недостаточно. Связано это с тем, что волокна играют роль стоперов на пути роста трещин (см. рис. 3). Таким образом, разрушение на срез до края возможно лишь в случае, когда доля волокон, уложенных вдоль направления приложения нагрузки, превышает  $50\%$ .

Так как существующая модель соединения [1, 2, 4] имеет ограниченное применение для композитных деталей, надо модернизировать ее, рассматривая случай нагружения плоскости раздела отделяемого фрагмента от основной части детали усилиями растяжения и продольного сдвига (рис. 6). В этом случае разрушения только на сдвиг и только на разрыв по ослабленному сечению будут частными случаями.

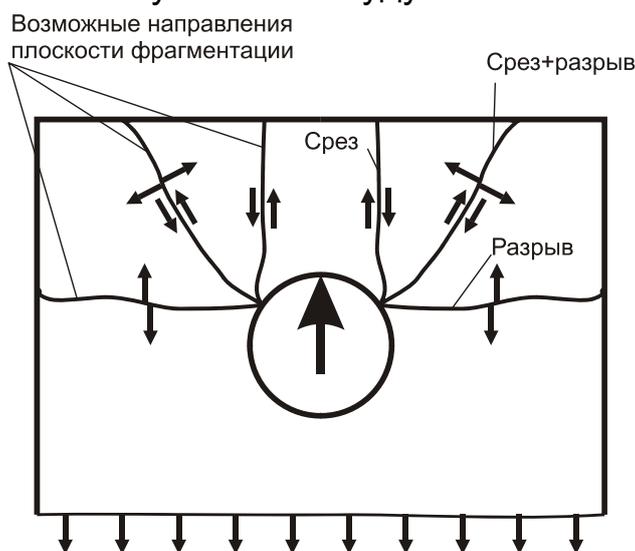


Рисунок 6 – Схема возможного варианта моделирования разрушения соединения

Дальнейшее развитие методики расчета механического соединения композитных деталей скорее всего будет заключаться в создании системы «условных» расчетов на смятие, срез крепежных элементов и фрагментацию композитных деталей (для металлических сохраняется расчет на срез и разрыв в ослабленном сечении).

#### Список использованных источников

1. Ильина, А.Д. Исходные прочностные характеристики композиционных материалов для проектирования механических соединений [Текст] / А.Д. Ильина // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 56 – 60.

2. Ильина, А.Д. Высокопрочные соединения композиционных материалов [Текст] / А.Д. Ильина, Ю.С. Ильин // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 42 – 49.

3. ГОСТ17302-71. Пластмассы. Метод определения прочности на срез.

4. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов [Текст] / В.Е. Василевский, А.З. Двейрин, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2010. – Вып. 47. – С. 42–52.

5. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.

6. Двейрин, А.З. Испытание на смятие слоистых пластиков [Текст] / А.З. Двейрин, С.П. Кривенда // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. трудов. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (65). Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2011. – С. 20 - 28.

*Поступила в редакцию 01.09.2011.*

*Рецензент: канд. техн. наук, доцент О.В. Ивановская,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*