

Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из компо- зитов

*Государственное предприятие «Антонов»
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Проведен анализ существующей экспериментальной базы обеспечения расчета механических соединений на прочность и сделан вывод о необходимости дополнения существующей системы экспериментов для обеспечения адекватности расчета на прочность механических соединений композитных деталей. Были сформулированы задачи для формирования полной системы экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений композитных деталей.

Ключевые слова: механические соединения, композиционные материалы, смятие, срез, разрыв, податливость крепежных элементов

Механические соединения (заклепочные, болтовые, резьбовые и т.п.) являются основным способом сборки конструкций и остается таковым и для деталей и агрегатов из композиционных материалов (КМ). Можно существенно сократить объемы механических соединений, но при этом резко возрастает степень их ответственности за безопасное функционирование изделия в целом [1, 2, 5, 8]. В силу ряда специфических особенностей композитов (анизотропия физико-механических характеристик, хрупкий характер разрушения, отсутствие пластичности и др.) их соединения механическим крепежом вызывает некоторые трудности, которые связаны, с одной стороны, с технологией сборки конструкций [8], а с другой – с отсутствием системы экспериментального обеспечения расчета на прочность и проектирования механических соединений [2 – 4, 7].

Рассмотрим достаточно распространенное конструктивно-технологическое решение (КТР) передачи (съемы) нагрузки с композитной детали (рис. 1). Инженерный расчет на прочность состоит в выборе таких параметров, чтобы выполнялись условия прочности:

– на срез крепежного элемента

$$\frac{4N_{i\Sigma}}{\pi d_i^2} \leq \tau_{кэ}; \quad (1)$$

– на смятие деталей (см. 1 на рис. 1, в)

$$\frac{N_{i\Sigma}}{d_i \delta_{1i}} \leq \sigma_{см1}; \quad \frac{N_{i\Sigma}}{d_i \delta_{2i}} \leq \sigma_{см2}; \quad (2)$$

– на срез детали до края (до следующего ряда) (см. 3 на рис. 1, в)

$$\frac{N_{1\Sigma}}{2\delta_{11} C_2} \leq \tau_{ср1}; \quad \frac{N_{n\Sigma}}{2\delta_{2n} C_1} \leq \tau_{ср2}; \quad (3)$$

– на разрушение детали по ослабленному сечению от ее сжатия или растяжения

$$\frac{N_{i\Sigma} k_{1i}}{\delta_{1i} (b - m_i d_i)} \leq F_1; \quad \frac{N_{i\Sigma} k_{2i}}{\delta_{2i} (b - m_i d_i)} \leq F_2. \quad (4)$$

В формулах (1) – (4) обозначено:

$N_{i\Sigma}$ – суммарное усилие, действующее на крепежный элемент;

$d_i, \delta_{1i}, \delta_{2i}$ – диаметр крепежного элемента и толщина деталей соответственно;

m_i – количество крепежных элементов в ряду;

$\tau_{кэ}$ – прочность материала крепежного элемента на срез;

$\sigma_{см1}, \sigma_{см2}$ – прочность материалов деталей на смятие;

$\tau_{ср1}, \tau_{ср2}$ – прочность материалов деталей на срез;

F_1, F_2 – передел прочности материалов деталей на растяжение (сжатие) вдоль соединения;

k_{1i}, k_{2i} – коэффициенты концентрации напряжений у отверстия.

Математическая запись условий прочности (1) – (4) является следствием расчетной схемы, базирующейся на допущениях о равномерном распределении напряжений по толщине и ширине деталей, материалы которых линейно деформируемы вплоть до разрушения. Для этой модели соединения расчет распределения усилий по рядам крепежных элементов реализуется с привлечением условий совместности деформаций [9], которые в обобщенном виде записываются так (рис. 1, г):

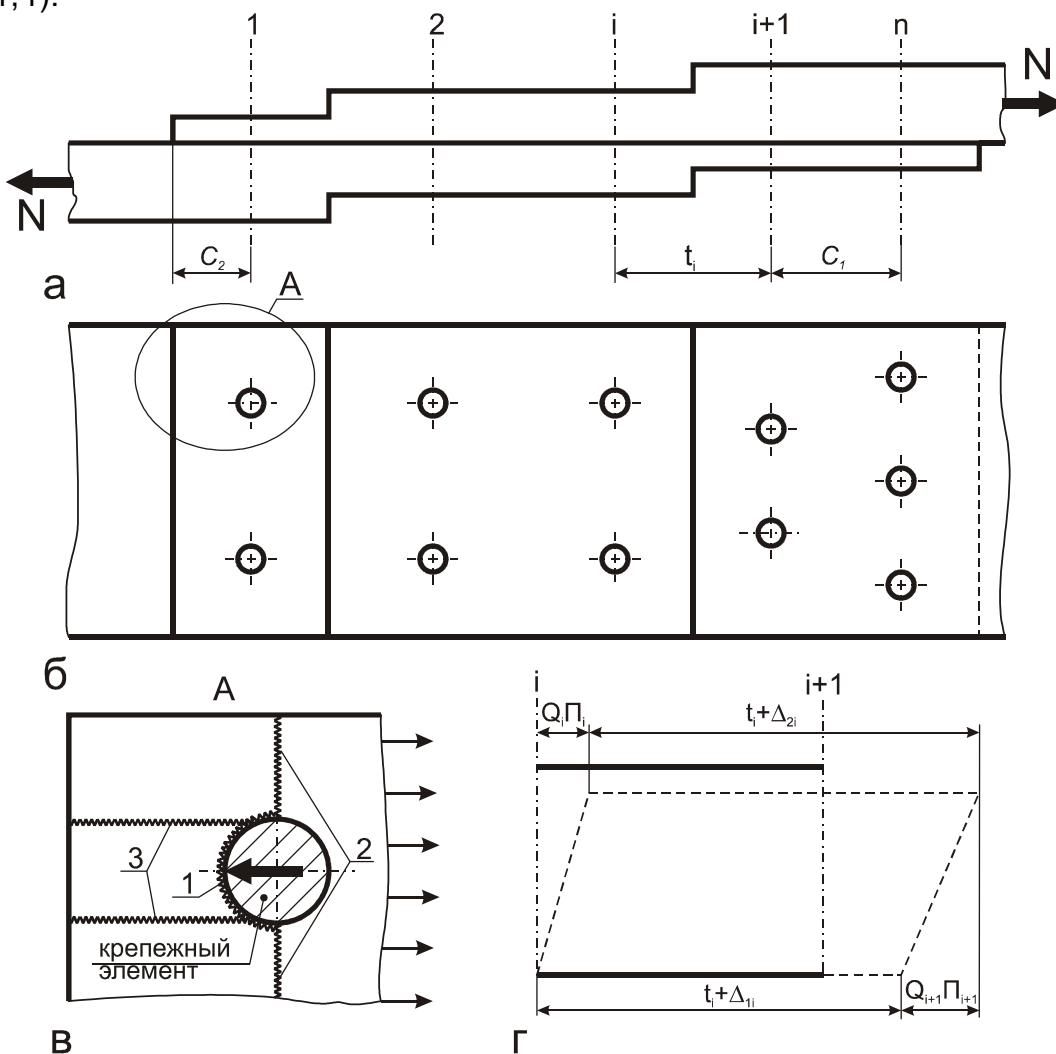


Рис. 1. Расчетная схема механического соединения

$$Q_i \Pi_i + \Delta_{2i} = Q_{i+1} \Pi_{i+1} + \Delta_{1i}, \quad (5)$$

где Q_i – усилие в ряду крепежных элементов;

Π_i – податливость ряда крепежных элементов;

Δ_{1i}, Δ_{2i} – удлинения деталей под действием нормальных напряжений, а при необходимости с учетом изменения температуры (на основе гипотезы Дюамеля – Неймана).

Таким образом, система экспериментального обеспечения расчета на прочность и проектирования включает в себя необходимость определения соответствующих пределов прочности, коэффициентов податливости крепежных элементов и концентрации напряжений у отверстий в деталях. Для металлов соответствующая база исходных данных создана, а некоторые уточнения и дополнительные исследования проводятся в основном для коэффициентов концентрации напряжений с учетом натяга установки крепежа и технологии образования отверстий.

Применительно к деталям из КМ исследования по разработке экспериментального обеспечения проектирования механических соединений только разворачиваются, а эксплуатируемые изделия многократно испытывались на прочность для определения максимальной несущей способности (статической и (или) усталостной).

Основные научно-инженерные задачи, которые необходимо решить, следующие:

1. Исследование вопроса о срезе КМ (см. формулы (3)). Авторы работ [3, 4] указывают на то, что прочность на срез волокнистых композитов находится в пределах

$$\tau_{90,0} \leq \tau_{cp} \leq \tau_{0,90}, \quad (6)$$

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

Для композитов необходимо различать прочность на сдвиг от прочности на срез. Если предел прочности на сдвиг в плоскости слоев является паспортной характеристикой КМ, то срез – это некоторая условная величина, используемая только при расчете механических соединений. Так как срезаемая площадь волокон и связующего не зависит от угла армирования (рис. 2), а чисто однонаправленные КМ применяются редко, то прочность на срез может стать самостоятельной характеристикой материала. Экспериментально подтверждено, что прочность на срез КМ, армированного в направлении действия силы, намного меньше, чем для других углов укладки. Тогда для прогнозирования прочности сложно-армированного КМ можно рекомендовать формулу

$$\tau_{cp} = \frac{1}{\delta_{\Sigma}} \left[\delta_0 \tau_{90,0} + (\delta_{\Sigma} - \delta_0) \tau_{0,90} \right], \quad (7)$$

где δ_0 – толщина слоев с армированием $\varphi = 0$ (см. рис. 2);

δ_{Σ} – толщина соединяемой детали.

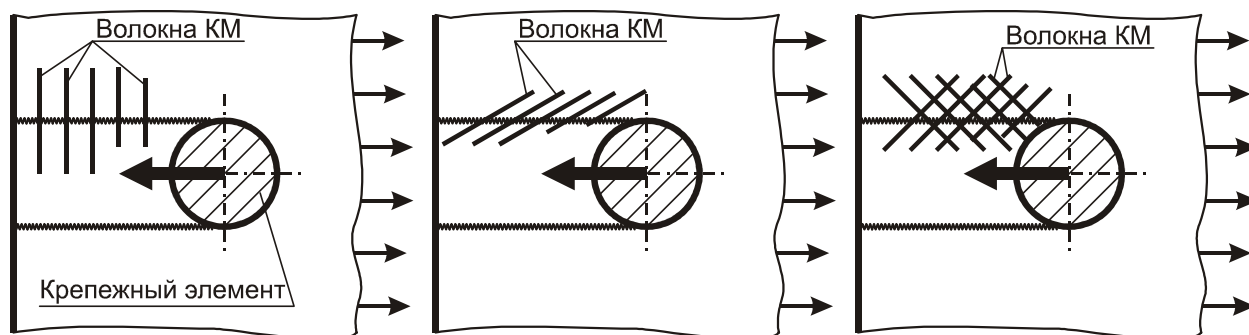


Рис. 2. К анализу прочности КМ на срез

При наличии в ряду двух и более крепежных элементов в них из-за коэффициентов Пуассона и при изменении температуры возникают поперечные усилия, которые могут быть весьма существенными [2]. Это приводит к тому, что результирующие силы направлены под некоторым углом к оси деталей (рис. 3), что вносит неопределенность при вычислении площади среза (см. формулы (3)), поэтому представляется целесообразным предварительно определить минимально допустимое расстояние до края детали (по аналогии с величиной $(3..4)d$ для металлов) по минимальной прочности на срез $\tau_{90,0}$ и условие (3) исключить из рассмотрения. Это равносильно обеспечению выполнения условия

$$C \geq \frac{\pi d^2 \tau_{кз}}{8\delta \tau_{90,0}}. \quad (8)$$

Такое решение оправдано также тем, что для волокнистых композитов со сложным армированием в экспериментах не наблюдается классический срез материала, а иногда сложно даже судить о том, по скольким плоскостям срезается деталь. Реальные размеры и прочностные свойства крепежа и КМ показывают, что достаточно принять $C \geq 2d$ для алюминиевого и $C \geq 4d$ для стального крепежа.

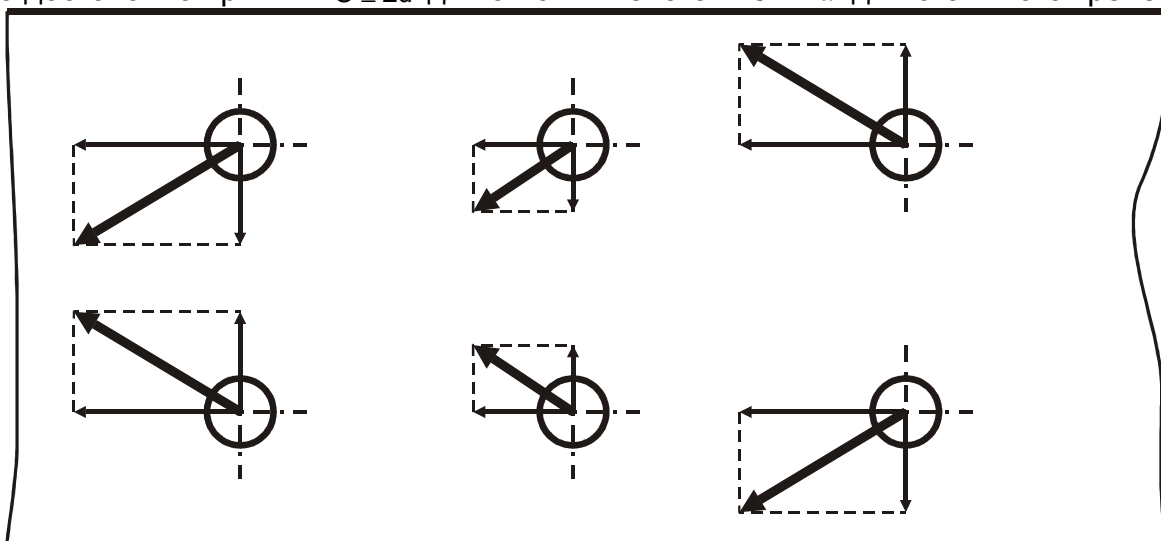


Рис. 3. Схема нагружения крепежных элементов с учетом поперечных усилий

2. Прочность на смятие является одним из наиболее противоречивых характеристик композитов, поэтому трактовка самого понятия «прочность на смятие», ее экспериментальное определение и интерпретация опытных данных вызывают оживленные дискуссии в научной и нормативной литературе [1 – 3, 10 – 12]. Для композитов, в отличие от металлов, прочность на смятие зависит от на-

правления нагружения, т.е. это анизотропная характеристика. Напряжения смятия определяются делением силы на площадь смятия, которая оценивается произведением диаметра крепежного элемента на толщину детали (см. условие (2)). Очевидно, что при такой трактовке это некоторая условная величина, которая при проектировании соединения сравнивается с такой же условной величиной, найденной экспериментально. Вероятно, этим объясняется множество методов опытного определения прочности на смятие [10 – 12], причем они никак не связаны с методикой определения усилий в крепежных элементах и напряжений смятия. Решение задачи определения распределения усилий по рядам крепежа в линейной постановке [2, 6, 9] и последующая оценка несущей способности соединения по смятию должны быть основаны на трактовке прочности на смятие как начало нелинейности на диаграмме «нагрузка–перемещение» (рис. 4). Тогда искомая характеристика вычисляется так:

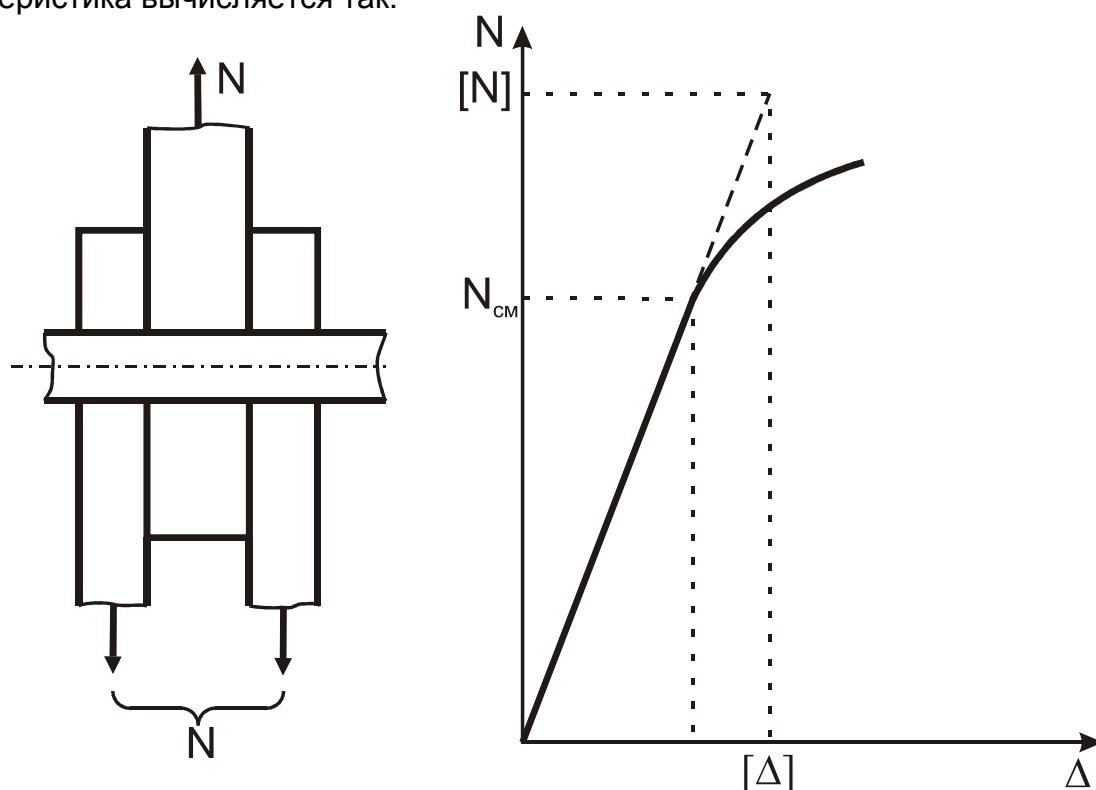


Рис. 4. К определению прочности КМ на смятие

$$\sigma_{CM} = \frac{N_{CM}}{d\delta}, \quad (9)$$

где N_{CM} – см. рис. 4.

Предлагаемые и обсуждаемые в литературе методы определения прочности на смятие по усилию, приводящему к заданной овализации отверстия, почти всегда включают в себя нелинейный участок диаграммы $N - \Delta$ (см. рис. 4), и тогда оценка прочности соединения по условию (2) становится неадекватной – сравниваются принципиально разные величины, потому что линейная методика не может учесть нелинейное деформирование от смятия. При расчете, основанном на регламентируемой овализации отверстия $[\Delta]$ (см. рис. 4), предельные расчетные напряжения будут больше предела прочности, и применение данного под-

хода обеспечивает некоторый запас прочности. Для изотропных материалов это вполне прогнозируемо, что однако не приводит к сокращению исследований по уменьшению запаса прочности, а значит, и по снижению массы.

Стандартная схема испытания образцов на смятие имеет вид, показанный на рис. 5, а. Сравнение двух характеров приложения нагрузки (растяжение, сжатие) показывает, что результаты будут отличаться. Отсюда следует, что схему испытаний для определения прочности на смятие желательно согласовать с характером нагружения проектируемой конструкции. Приблизить результаты измерения по двум схемам (см. рис. 5, а) можно за счет увеличения жесткости болта и звеньев устройства для испытаний, но это также может не соответствовать условиям работы конструкции.

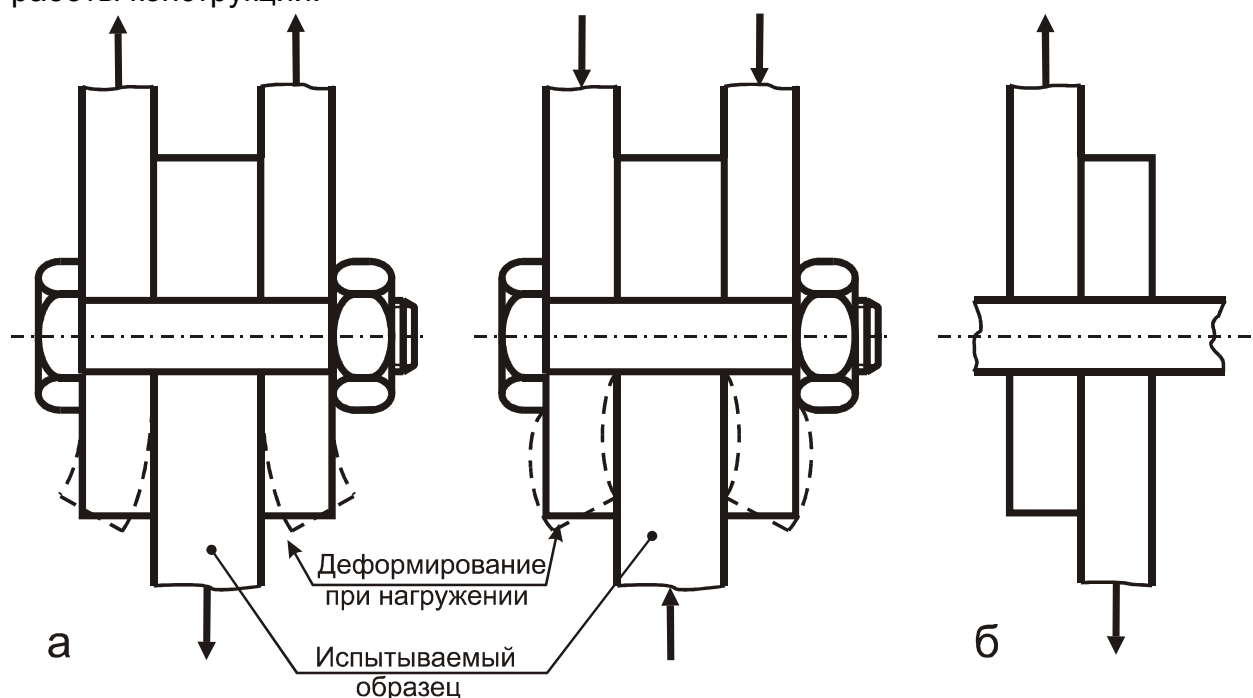


Рис. 5. Схема испытания КМ на смятие

Достаточно широко распространены нахлесточные соединения (рис. 5, б), в которых распределение напряжений смятия существенно отличается от симметричного соединения. Это приводит к необходимости поиска ответа на вопрос о возможности применения результатов, полученных по одной схеме испытания, к другому КТР соединения.

Задача обеспечения согласованности характера нагружения соединения и схемы экспериментального устройства для определения прочности на смятие усложняется еще и тем, что это свойство будет зависеть от последовательности укладки слоев КМ по толщине образца. (Если прочность на смятие зависит от схемы армирования, то отсюда следует и зависимость от последовательности укладки в реальном эксперименте в устройстве не бесконечной жесткости.) Сказанное означает, что распределение напряжений смятия по толщине детали (при прочих равных условиях) будет различным для первого и второго рядов (рис. 6), и это также необходимо каким-либо образом учитывать в расчете на прочность.

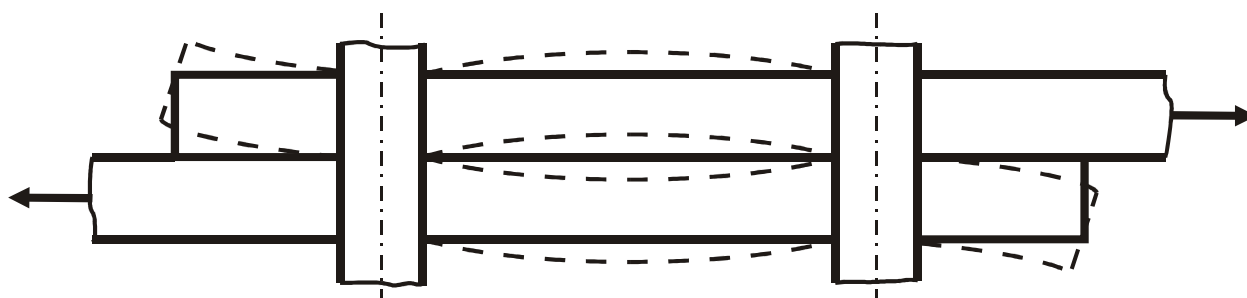


Рис. 6. Схема деформирования двухрядного соединения

В связи с широким применением метода конечных элементов, позволяющего определить напряженно-деформированное состояние по поверхности контакта детали из КМ с крепежным элементом, вопрос о правой части условий прочности на смятие приобретает еще большую актуальность. В расчете определяются напряжения на площадках с размером конечного элемента, а прочность находится как некоторые средние предельные напряжения по условной поверхности контакта, и их сравнение не может служить оценкой запаса прочности соединения. Так как метод конечных элементов будет применяться все шире и шире, актуальным является поиск некоторой новой характеристики прочности материала, согласованной с методикой расчета действующих напряжений. В качестве таковой может служить аналог микротвердости, определяемой индикатором с плоской вершиной, размеры которой порядка толщины монослоя препрега или диаметра жгута (нити). Наличие диаграмм анизотропии этого вида несущей способности обеспечивало бы корректность анализа условий прочности.

Анализ проблемы прочности на смятие приводит к важному выводу о том, что трактовку и экспериментальное определение этой условной величины (впрочем, как и других условных характеристик материала) целесообразно согласовать с расчетной схемой определения действующих напряжений. Например, применяемые стандарты определения прочности на смятие служат экспериментальным обеспечением линейной и одномерной методики определения усилий в крепежных элементах типа, описанных в работе [9].

3. Перейдя к анализу следующей величины, влияющей на оценку прочности механического соединения, – коэффициента концентрации напряжений у отверстия, необходимо констатировать, что нахождение присутствующего в неравенствах (4) коэффициента имеет мало общего с классическим определением концентрации напряжений (рис. 7, а, б, в). Если для металлов многочисленные эксперименты показали, что, несмотря на разный физический смысл, эти величины примерно одинаковы и по этой причине используются значения классического коэффициента концентрации напряжений. Можно предположить, что введение термина «напряжения смятия» связано с имевшимися ранее трудностями трактовки сложного напряженного состояния в зоне нагруженного отверстия (см. «линии тока» на рис. 7, б) в рамках линейной одномерной расчетной схемы.

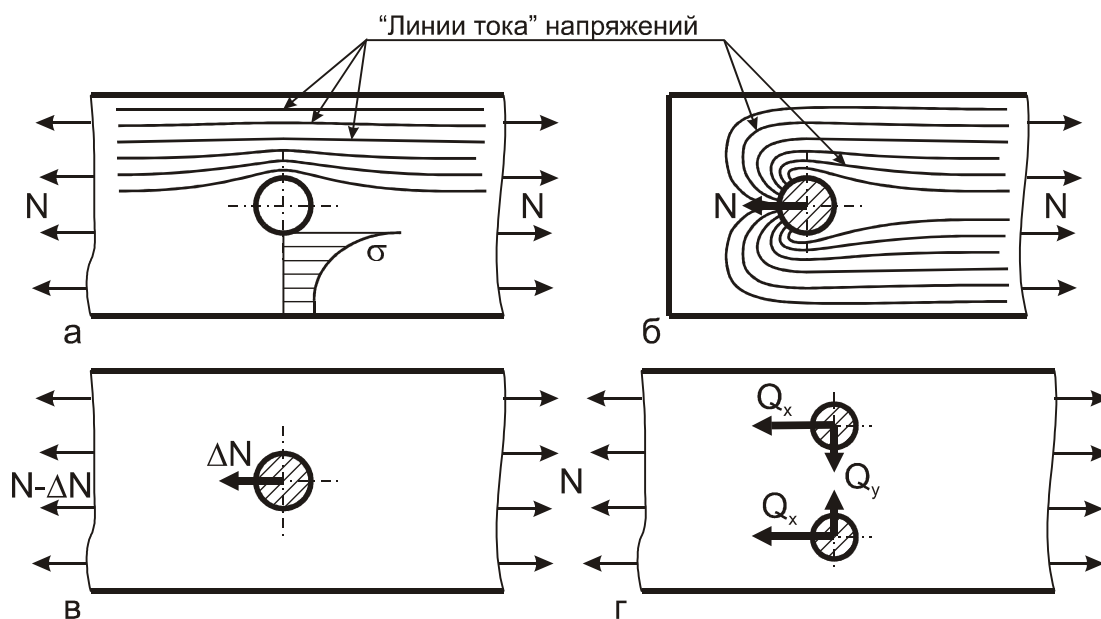


Рис. 7. К анализу коэффициента концентрации напряжений

Если в одном ряду два и более крепежных элемента, то в поперечном направлении возникают Пуассоновы и температурные усилия Q_y (см. рис. 7, г), которые также являются причиной появления концентрации напряжений в другом направлении. Векторное суммирование сил Q_x и Q_y (см. рис. 7, г) практически не имеет смысла, потому что в этом случае сложно рассматривать данное явление как растяжение пластины с отверстием, тем более что в одной из деталей пуассоновы и (или) температурные напряжения являются сжимающими (система сил двух соединенных деталей самоуравновешена).

С целью сохранения общепринятой методики оценки прочности детали по ослабленному сечению можно предложить следующую методику определения коэффициента концентрации напряжений:

- для симметричных структур $[\pm\varphi]$ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$) расчетным путем определяются искомые коэффициенты, например методом конечных элементов или по [13] для образца типа, показанного на рис. 7, в;
- планируется и ставится полнофакторный эксперимент по испытанию образцов с нагруженным отверстием (см. рис. 7, в);
- определяются и вводятся (при необходимости) поправочные коэффициенты или функции;
- для сложноармированных композитов без учета полного взаимодействия слоев (при соблюдении уравнений равновесия и совместности деформаций по оси соединения) рассчитывается коэффициент концентрации напряжений КМ детали по формуле

$$k_x = \frac{1}{E_x \delta_\Sigma} \sum_{i=1}^n \delta_i E_{xi} k_{xi}, \quad (10)$$

где E_x, E_{xi} – модули упругости детали и составляющих ее слоев;
 δ_Σ, δ_i – толщина пакета и слоев со структурой $[\pm\varphi]$;

k_{xi} – коэффициент концентрации напряжений структур $[\pm\varphi]$, найденных расчетным путем и скорректированных экспериментально.

При выводе формулы (10) принято, что коэффициенты концентрации напряжений изолированной структуры $[\pm\varphi]$ сохраняется и в пакете (по аналогии с известной методикой определения упругих констант слоистых КМ – модулей упругости, коэффициентов Пуассона и т.п.).

После соответствующей замены значений углов $\pm\varphi$ на $(\pi/2 \pm \varphi)$ по формуле (10) рассчитываются коэффициенты в поперечном направлении при проектировании соединений с несколькими крепежными элементами в одном ряду.

4. Распределение усилий в многорядном соединении определяется соотношением линейных жесткостей деталей и коэффициентами податливости крепежных элементов [9, 14]. По своему физическому смыслу, заложенному в инженерные методики расчета (см. например [9, 14]), коэффициент податливости крепежного элемента равен взаимному смещению точек А и В на оси крепежа в нахлесточном соединении и симметричном соединении с двумя накладками (рис. 8, а, б) при $N=1$.

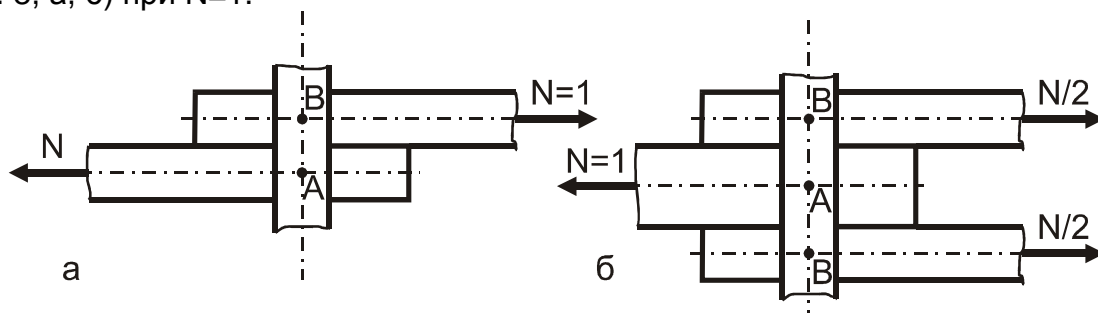


Рис. 8. К определению коэффициента податливости крепежных элементов

Применяемые экспериментальные методики основаны на измерении взаимного смещения точек А и В на торцевой поверхности деталей (рис. 9), что недостаточно корректно из-за недетерминированного влияния ширины образца. Обычно испытывают симметричное соединение (см. рис. 9, б), а результаты распространяют на нахлесточное и на соединение двумя накладками разной жесткости. Это также вносит некоторую неопределенность в расчеты.

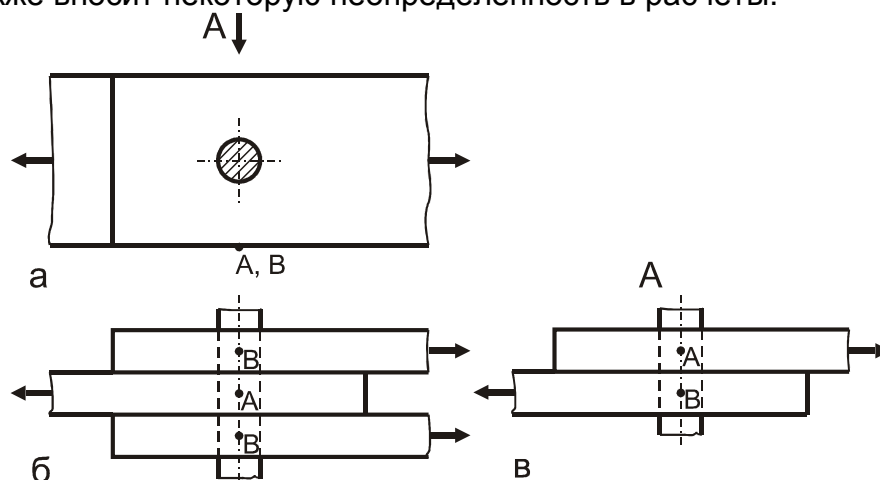


Рис. 9 Схема экспериментального определения коэффициента податливости крепежа

Анализ численных значений коэффициентов податливости крепежных элементов, вычисляемых по применяемым различными авиационными фирмами формулам, показывает, что они могут отличаться в несколько раз, а величины максимальных усилий в крайних болтах трехрядного соединения отличаются на 5 – 10%. Это служит обоснованием возможности экспериментального определения по схемам, показанным на рис. 9.

При соединении металлических деталей в процессе эксплуатации происходит выравнивание усилий по рядам из-за микропластических деформаций материалов в зоне контакта. Композиты являются хрупкими материалами, поэтому процесс выравнивания, если и имеет место, то совершенно по другим причинам. В любом случае достоверное определение усилий по рядам крепежных элементов соединения деталей из КМ имеет большее значение, чем для металлов. Это служит обоснованием необходимости возможно более полного учета особенностей деформирования деталей и крепежных элементов в зоне их взаимодействия, для чего наиболее достоверными являются экспериментальные значения коэффициентов податливости, определяемые методами и способами, максимально соответствующими расчетной схеме.

В заключение по результатам выполненного выше исследования можно сделать вывод о том, что инженерная методика проектирования механических соединений (одно- и многорядных, заклепочных, болтовых и др.), основанная на линейной и одномерной расчетной схеме типа, рассмотренной в работах [9, 14], может успешно применяться в том случае, когда экспериментальные характеристики упругости и прочности определяются при максимально возможном соответствии с методикой расчета. Использование других методов расчета на прочность требует построения своей системы экспериментального обеспечения.

Список литературы

1. Воробей В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В.В. Воробей, О.С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
2. Карпов Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.
3. Ильина А.Д. Исходные прочностные характеристики композиционных материалов для проектирования механических соединений / А.Д. Ильина // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 56 – 60.
4. Ильина А.Д. Высокопрочные соединения композиционных материалов / А.Д. Ильина, Ю.С. Ильин // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: ЦАГИ, 1979. – Вып. 7. – С. 42 – 49.
5. Карпов Я.С. Научные основы решения проблемы соединения высоконагруженных деталей летательных аппаратов из композиционных материалов / Я.С. Карпов // Технологические системы. – К., 2000. – Вып. 3. – С. 36 – 40.
6. Карпов Я.С. Исследование напряженно-деформированного состояния многорядных механических соединений деталей из композиционных материалов / Я.С. Карпов // Авиационно-космическая техника и технология: Тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского. – Х., 1998. – С. 328 – 334.
7. Рабинович А.Л. О механических характеристиках некоторых пластиков в связи с прочностью болтовых и заклепочных соединений / А.Л. Рабинович,

Л.Д. Аврасин // Стеклопластики и другие конструкционные материалы. – М.: Машиностроение, 1960. – С. 18 – 23.

8. Сироткин О.С. Технология и механика соединений / О.С. Сироткин, В.Б. Литвинов, В.И. Гришин. – М.: Арктика, 2000. – 314 с.

9. Степин П.А. К расчету на срез соединений с прерывистыми связями / П.А. Степин // Вестник инженеров и техников. – 1951. – № 4. – С. 175 – 179.

10. ASTM D5961/ D5961M-05 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.

11. ASTM D4762-04 Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials.

12. Тарнопольский Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

13. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки / С.Г. Лехницкий. – М.: Гос. изд-во техн. лит., 1957. – 463 с.

14. Карпов Я.С. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов: – учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию / Я.С. Карпов, С.П. Кривенда, В.И. Рябков. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1997. – 201 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 09.06.10

Система експериментального забезпечення розрахунку на міцність механічних з'єднань деталей із композитів

Виконано аналіз діючої експериментальної бази забезпечення розрахунку механічних з'єднань на міцність і зроблено висновок про необхідність доповнення діючої системи експериментів для забезпечення адекватності розрахунку на міцність механічних з'єднань композиційних деталей. Сформульовано задачі для формування повної системи експериментального забезпечення розрахунку на міцність механічних з'єднань композиційних деталей.

Ключові слова: механічні з'єднання, композиційні матеріали, зминання, зріз, розрив, податливість кріпильних елементів.

System of experimental support for strength calculation of composites mechanical joints

Analysis of existed experimental base for providing of mechanical joints strength calculation is done and conclusion about existed experimental system incompetence for providing mechanical joints of composite parts strength calculation adequacy is made. Problems for full system forming of strength calculation experimental support of composite parts mechanical joints is formulated.

Keywords: mechanical joints, composite materials, bearing, shearing, fracture, fasteners compliance.