

## **Обзор и анализ состояния проблемы расчетно-экспериментального обеспечения проектирования агрегатов самолета из полимерных композитов с механическими соединениями деталей**

*Государственное предприятие «Антонов»*

Проведен обзор и анализ состояния проблемы расчетно-экспериментального сопровождения проектирования агрегатов самолета из полимерных композиционных материалов с механическими соединениями. Обсуждаются преимущества и недостатки существующих методов и стандартов, определяющих характеристики прочности композитов на смятие, разрыв, срез, межслойный сдвиг, их деформативность и коэффициенты концентрации напряжений у крепежных элементов соединения. Обоснована актуальность разработки системы экспериментального сопровождения расчета несущей способности механических соединений деталей из композиционных материалов, обеспечивающей его высокую точность и надежность.

**Ключевые слова:** механические соединения, полимерные композиционные материалы, система расчетно-экспериментального обеспечения, характеристики прочности и деформативности.

В нашей работе [1] показано, что в решении комплексной проблемы создания отечественных гражданских самолетов транспортной категории (ТК) важное место занимает система экспериментального обеспечения и проверка точности аналитических моделей расчета на прочность механических соединений деталей их агрегатов из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

При установлении несущей способности механических соединений деталей из ПКМ необходимо знание ряда таких их механических характеристик, как прочность ПКМ на смятие, разрыв, срез, межслойный сдвиг, а также коэффициент концентрации напряжений у отверстия [2]. Ниже дан краткий обзор и анализ исследований, определяющих состояние вопросов получения этих характеристик.<sup>1)</sup>

В инженерной практике широко применяются для расчета механических соединений так называемые «условные расчеты» [3], которые подразумевают оценку распределения напряжений в элементах конструкции согласно модели, основанной на вероятности возникновения детерминированных форм разрушения при отсутствии взаимодействия между ними. В отношении механических соединений «условные расчеты» заключаются в оценке распределений нагрузок между крепежными элементами (КЭ) и оценке несущей способности по их срезу, смятию контактирующих поверхностей, срезу деталей и разрыву деталей в ослабленном сечении (рис. 1). При этом реальное распределение напряжений заменено равномерным осредненным. Принято, что соединение не разрушается, если осредненные напряжения не превышают граничных значений.

Следует отметить, что упрощенный подход к оценке распределения нагрузки между КЭ применим лишь для металлических деталей [3] и др., для композитных деталей необходимо использовать модели из разряда сеточных [4 – 11].

---

<sup>1)</sup> При написании данной статьи автором проанализировано более 120 источников, из которых только третья часть включена в ее библиографический список.

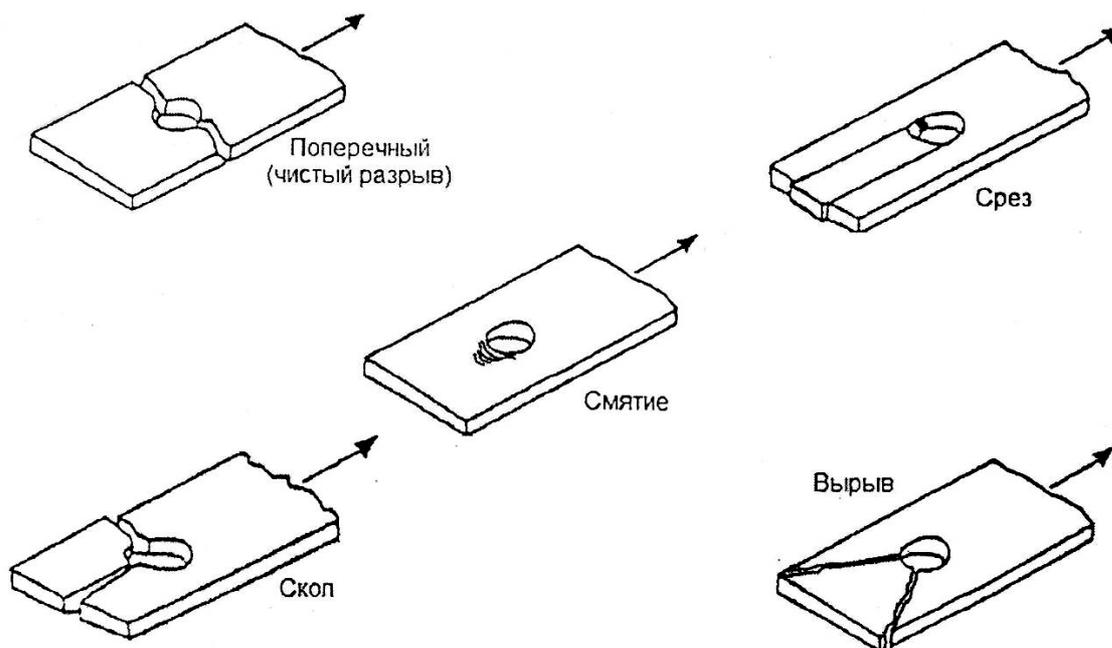


Рис. 1. Варианты разрушения деталей из ПКМ в месте соединения

Началу накопления не критических разрушений (рис. 2) чаще всего предшествует обмятие стенки отверстия в месте его контакта с телом КЭ. Таким образом, корректное задание допустимого уровня напряжений смятия крайне необходимо для обеспечения несущей способности и ресурса соединения.

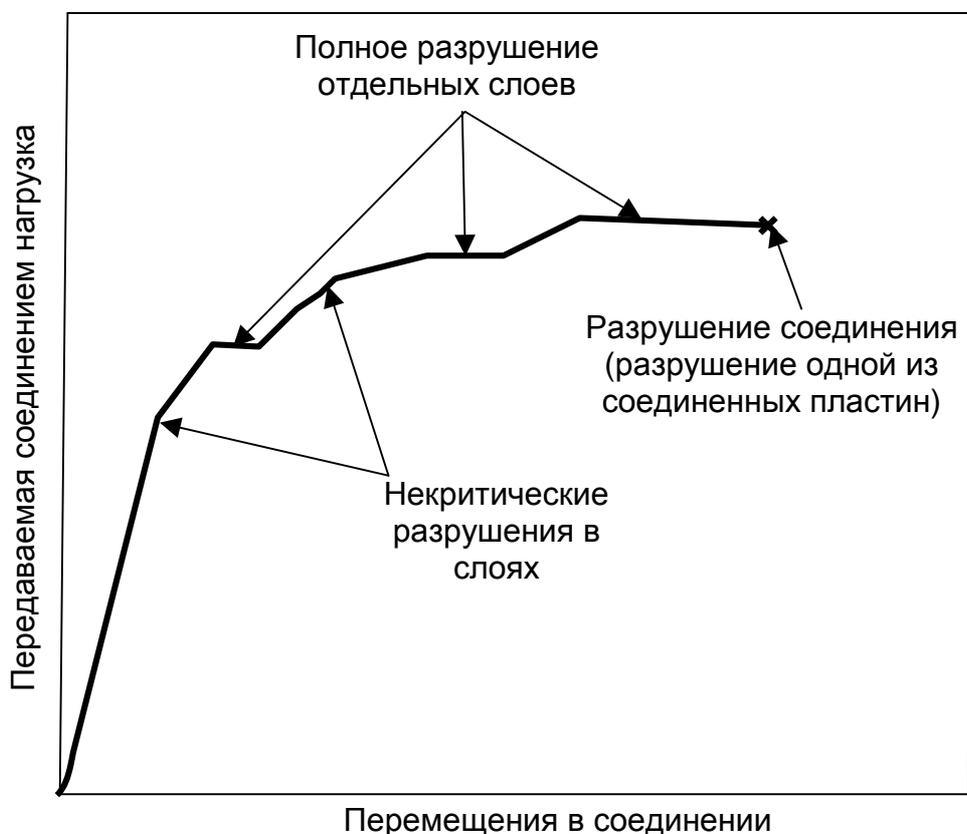


Рис. 2. Типовая диаграмма нагрузка/перемещение для механического соединения

Изучению контактной задачи было посвящено много работ [7, 11 – 21], среди которых и направленные на изучение влияния на предел прочности на смятие анизотропии материала [7, 21], температуры и влажности среды [19], структуры пакета [11]. К сожалению дальнейшего развития этих направлений, воплощенного в стандартах, не обнаружено.

Сохраняя преемственность в подходах к расчетам механических соединений для соединений деталей из ПКМ, используют те же «условные расчеты» что и для металлических деталей. Необходимо только скорректировать подходы к оценке уровня допустимых напряжений, коэффициентов концентрации напряжений и к оценке площади разрушения в случае среза, скола, вырыва и смятия.

Согласно данным, приведенным в работе [3], допускаемый уровень напряжений смятия для металлов в механическом соединении оценивается в долях от предела текучести или прочности на растяжение (для чугуна). Для пластических материалов используют предел пластичности, а для хрупких материалов – предел прочности на растяжение.

Большая часть композиционных материалов на основе термореактивных матриц относится к хрупким материалам. Тогда, согласно аналогии с чугуном, за базовую величину можно принять предел прочности на растяжение, но у ПКМ данная величина зависит как от структуры пакета, так и от направления действия нагрузки.

Не менее важен вопрос о значениях коэффициента при базовой величине, которые определяют по результатам обработки испытаний на смятие. Корректность испытаний механических соединений на смятие обеспечивается нормативной документацией (уровня государственных стандартов). Однако искомые стандарты среди национальных стандартов Украины (ДСТУ), России (ГОСТ Р), Германии (DIN), Великобритании (BS), Франции (AFNOR), Австрии (OENORM), Японии (JIS), а также Международной организации по стандартизации (ISO) отсутствуют. Необходимые стандарты содержат материалы Американского общества испытания материалов (ASTM) и Военный справочник [22, 36].

ASTM D953-69, согласно [15], нормирует испытания на смятие жестких пластиков. Стандарт предусматривает обеспечение симметричного (двухстороннего) среза КЭ при растяжении и сжатии. Метод позволяет построить зависимость между нагрузкой и деформацией. Недостатки данного стандарта заключаются в его ориентации не на армированный пластик и отсутствии возможности вариации геометрии КЭ, усилия затяжки, предварительного нагружения. При этом локальная деформация отверстия не измеряется. Согласно [15] применение ASTM D953-69 для ПКМ, армированного непрерывными волокнами, не рекомендуется.

В работе [15] приведены рекомендации по адаптации ASTM D953-69 для испытания слоистых пластиков на смятие. Авторы утверждают, что для распространения стандарта на армированные ПКМ достаточно скорректировать экспериментально удлинение образцов  $\lambda = D_1/b$ , а для образцов из углепластиков рекомендуется испытываемое отверстие сделать меньшего диаметра  $D > D_1$  (рис. 3). В этом случае гарантируется смятие стенки меньшего отверстия ( $D_1$ ).

В материалах Военного справочника [22] предлагается для испытаний на смятие слоистого пластика использовать образец, указанный на рис. 4.

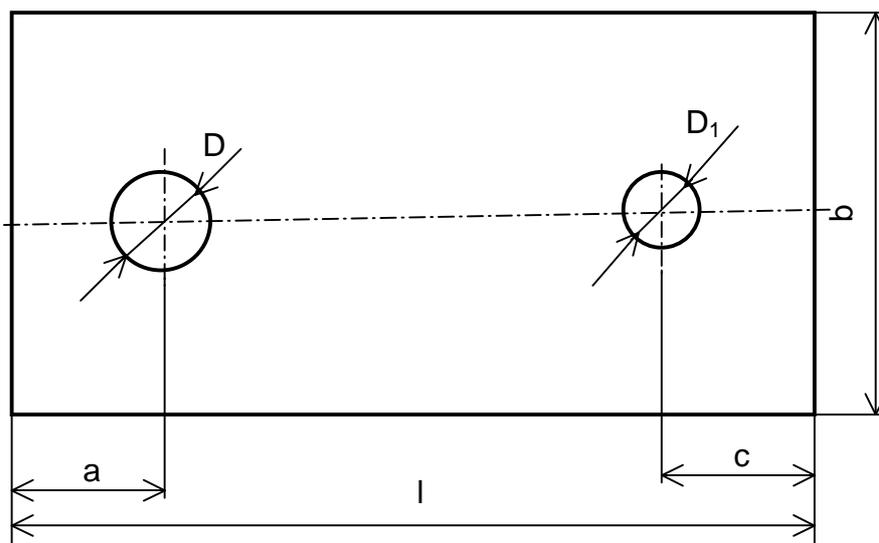


Рис. 3. Образец из углепластика для испытаний на смятие согласно [15]

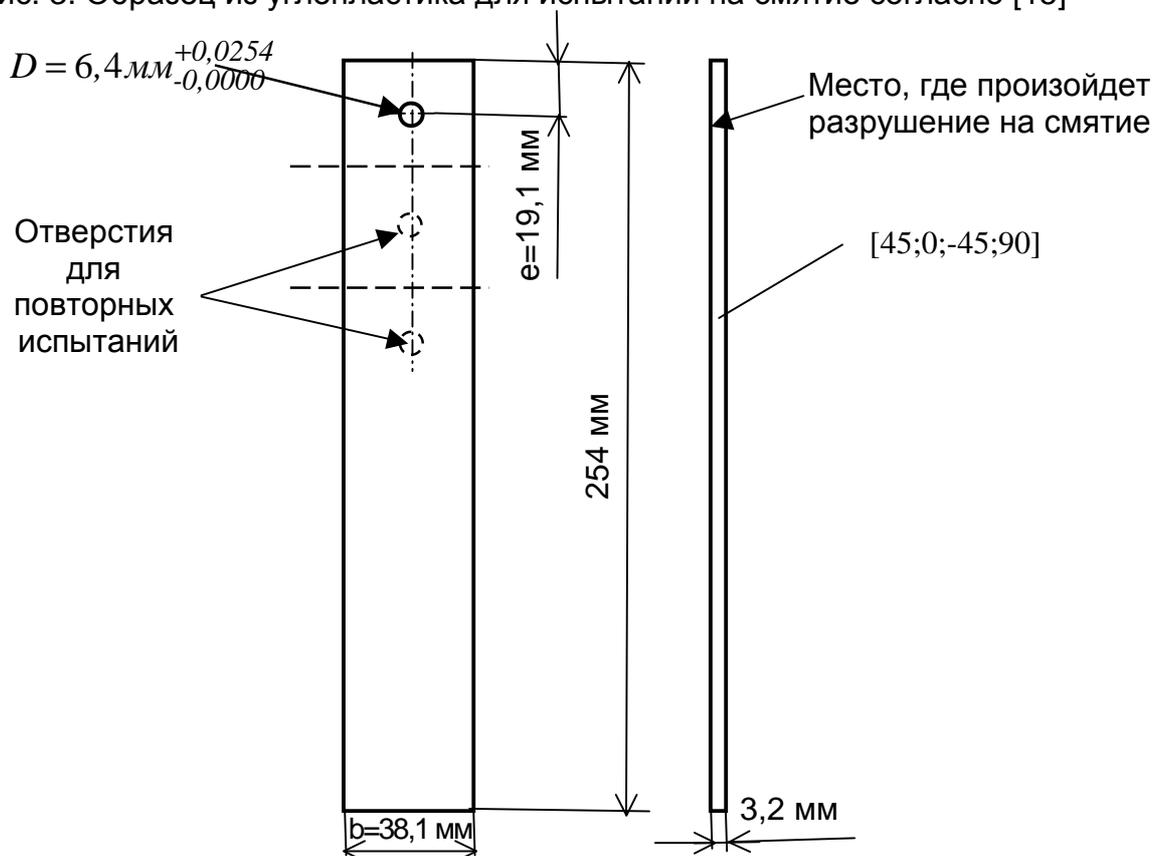


Рис. 4. Образец для испытаний слоистых пластика на смятие согласно [22]

Согласно стандарту [16] геометрия образца несколько откорректирована относительно показанного на рис. 3 и рис. 4.

Все перечисленные стандарты адаптированы под испытания на смятия при симметричном нагружении образца растяжением. Отметим, что в [16] предусматривается также испытание на смятие при несимметричном нагружении (простой срез) растяжением или сжатием. При растяжении может быть

использована разрывная машина без дополнительных приспособлений. При сжатии образца используется дополнительное поддерживающее образец приспособление, описание которого приведено в [16, 22].

В работах [15, 22] в качестве признака достижения условного предела прочности на смятие принято достижение 4% остаточной овализации отверстия. Однако практика показала недостаточную обоснованность использования такой большой остаточной деформации. Разработчики нового стандарта [16] предложили в качестве признака достижения условного предела прочности на смятие принять 2% остаточной овализации отверстия (рис. 5).

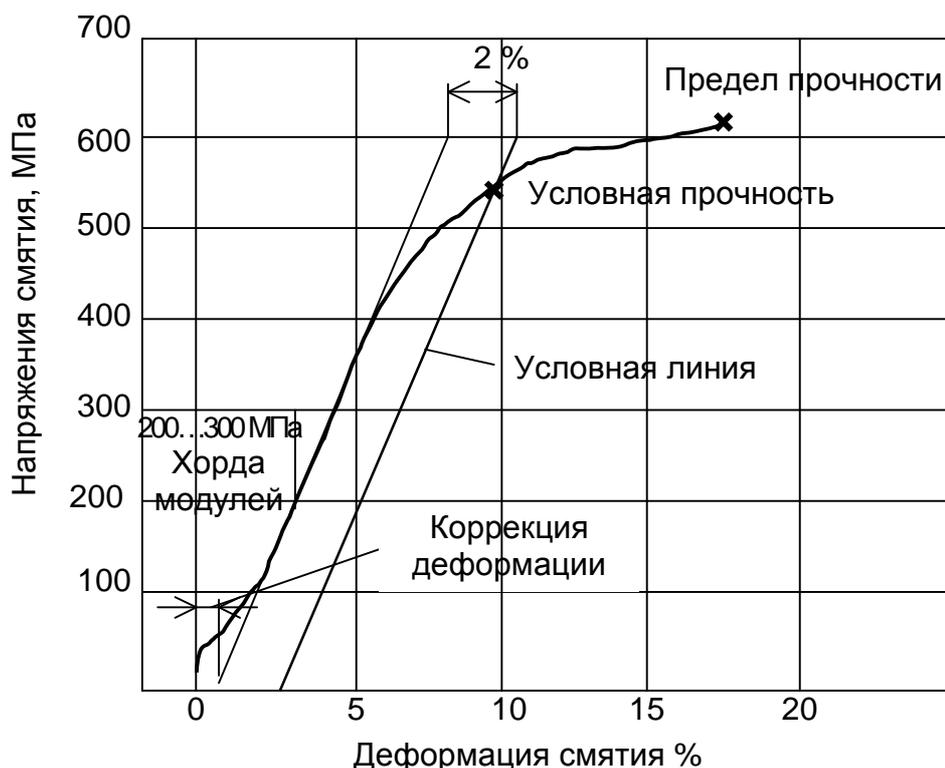


Рис. 5. Типовая кривая напряжение/деформация

В материалах справочника [26] предлагается использовать в качестве критерия прочности на смятие овализацию отверстия в пределах 2...4 % диаметра отверстия. Отдельно в стандарте [16] и в справочниках [22, 36] представлена задача по оценке влияния овализации отверстия воспринимаемой деталью нагрузкой на условия смятия отверстия телом КЭ. И как результат – на уровень условного предела прочности на смятие. Таким образом, на данный момент отработаны и закреплены в стандартах методики оценки предела прочности на смятие в осях ортотропии ПКМ, но в механических соединениях, в общем случае, направление действующего усилия не совпадает с направлением осей ортотропии материала, что существенно уменьшает ценность полученных экспериментальных данных. Кроме того, использовать для фиксации наступления момента смятия остаточную овализацию отверстия не целесообразно, так как пластическая деформация не характерна для большинства ПКМ.

Для определения предела прочности композита на срез известна формула «условного расчета» на срез до края [3] (рис. 6, а)

$$\tau = \frac{Q}{2e\delta} \leq \tau_e, \quad (1)$$

где  $Q$  – нагрузка на крепежный элемент;  $e$  – расстояние до края;  $\delta$  – толщина детали.

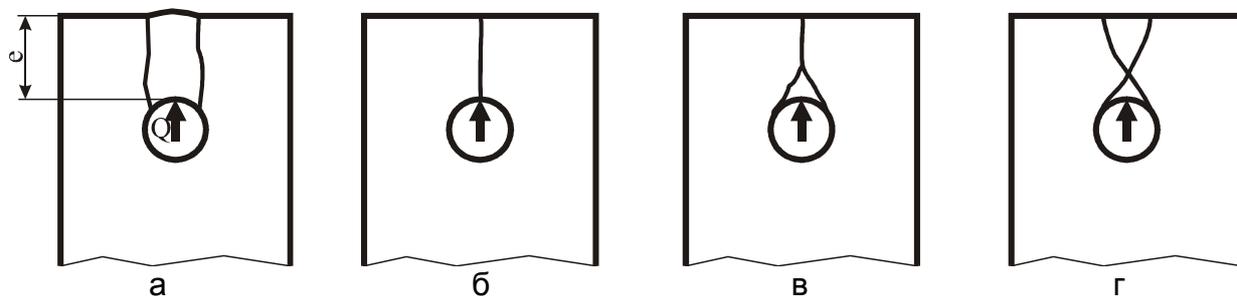


Рис. 6. Варианты среза детали из ПКМ до края

Для деталей из ПКМ проблемными являются два момента: площадь среза и предел прочности на срез. Вариант среза (рис.6, а) может реализоваться только в случае, когда армирующие волокна уложены вдоль приложенной нагрузки [15], но в этом случае есть вероятность среза по одной плоскости (рис. 6, б). При перекрестной укладке с углами до  $\pm 30^\circ$  чаще реализуются варианты на сходящихся или расходящихся поверхностях среза (рис. 6, в, г), а также вырыв материала. При больших углах укладки гораздо выше вероятность реализации комбинированного разрушения «срез + разрыв» или чистого разрыва, чем чистый срез. Таким образом, имеет смысл модифицировать формулу (1) под одну плоскость среза

$$\tau = \frac{Q}{2e\delta} \leq \tau_e. \quad (2)$$

Не менее сложным является вопрос оценки предела прочности ПКМ на срез. Действительное значение предела прочности материала на сдвиг находится в пределах

$$\tau_{90,0} \leq \tau_e \leq \tau_{0,90}, \quad (3)$$

где  $\tau_{90,0}$  и  $\tau_{0,90}$  – прочность на срез однонаправленного ПКМ вдоль и поперек волокон соответственно.

Экспериментальные данные показывают, что  $\tau_{0,90}$  в несколько раз больше  $\tau_{90,0}$ , и тогда возникает вопрос о корректном применении неравенства (3). Физически понятно, что при приближении угла укладки к нулю срез волокна практически вдоль маловероятен (прочность связующего меньше, чем у волокна), поэтому для структуры ПКМ с армированием, близким к  $0^\circ$ , необходимо провести соответствующие опыты. Расчет же соединения по нижней границе  $\tau_{90,0}$ , хотя и гарантирует несущую способность, приводит к перетяжелению конструкции.

В работе [24] описан метод, который заключается в определении величины перерезывающей силы при срезе образца по двум плоскостям.

Разрушение пакета ПКМ на срез и на сдвиг различны по своей природе, но так как в обоих случаях речь идет о напряжениях сдвига, то вполне возможно, что имеет смысл оценить предел прочности на сдвиг по любой из известных методик

[15, 25 – 28]. Каждая из этих методик имеет свои преимущества и недостатки, а также области предпочтительного применения.

В механических соединениях металлических деталей опасность раскола детали в плоскости стыка практически отсутствует, по этой причине в общепринятой методике расчета механических соединений на данный вид разрушения нет. В случае механических соединений композитных деталей, из-за низкой прочности и жесткости на межслойный сдвиг, расслоение детали вполне возможно. Особенно велика вероятность такого разрушения в соединениях деталей с зенковкой, в случае большого отношения толщины детали к диаметру КЭ и недостаточном усилии затяжки в случае кластерной укладки слоев. Поэтому в расчетах механических композитных соединений необходимо учитывать и прочность на межслойный сдвиг.

Методика «размазывания» КЭ используется при расчете соединений с микроэлементами поперечной связи – штифтами [6, 7]. Применительно к механическим соединениям прочность на межслойный сдвиг исследована слабо, исключением являются работы [6, 7], в которых рассмотрены механические соединения с крепежными микроэлементами.

Исследованию влияния концентрации напряжений у отверстия на несущую способность механического соединения посвящено огромное количество работ [2, 7 – 8, 25, 29, 31 – 36], которые были направлены на выявление факторов, влияющих на распределение напряжений вокруг отверстий, и их экспериментальное установление, либо на разработку методов оценки влияния этих факторов на распределение напряжений вокруг отверстия. Данное направление можно считать наиболее исследованным, но необходимость дальнейшего изучения сохранилась, так как особенности поведения композита в окрестностях отверстия привнесли новые факторы, влияющие на особенности распределения напряжений вокруг отверстий с крепежными элементами.

В работах [37 – 38] показано, что для бесконечной пластины тангенциальные и нормальные напряжения вблизи контура кругового отверстия можно оценить по следующим зависимостям:

– при растяжении (рис. 7, а)

$$\sigma_{\theta} = \sigma_0 \frac{E_{\theta}}{E_x} \left\{ \left[ (1+c) \cos^2 \phi - a \sin^2 \phi \right] \sin^2 \theta - a \left[ \cos^2 \phi + (a+c) \sin^2 \phi \right] \cos^2 \theta - \right. \\ \left. - \frac{1}{4} c (1+a+c) \sin 2\phi \sin 2\theta \right\} \quad , (4)$$

где  $a = \sqrt{\frac{E_x}{E_y}}$ ;  $b = \frac{E_x}{E_y} - 2\mu_{xy}$ ;  $c = \sqrt{2a+b}$ ;  $x, y$  – оси ортотропии ПКМ;

$E_{\theta}$  – модуль упругости в направлении  $\theta$ ;

– при сдвиге (рис. 7, б)

$$\sigma_{\theta} = \tau_0 \frac{E_{\theta}}{2E_x} (1+a+c) \left\{ \left[ (a+1) \cos 2\theta + a-1 \right] \sin 2\phi - c \cos 2\phi \sin 2\theta \right\}. \quad (5)$$

При растяжении (сжатии) и сдвиге в осях  $x, y$  в формулах (4) и (5) следует положить  $\phi = 0$ .

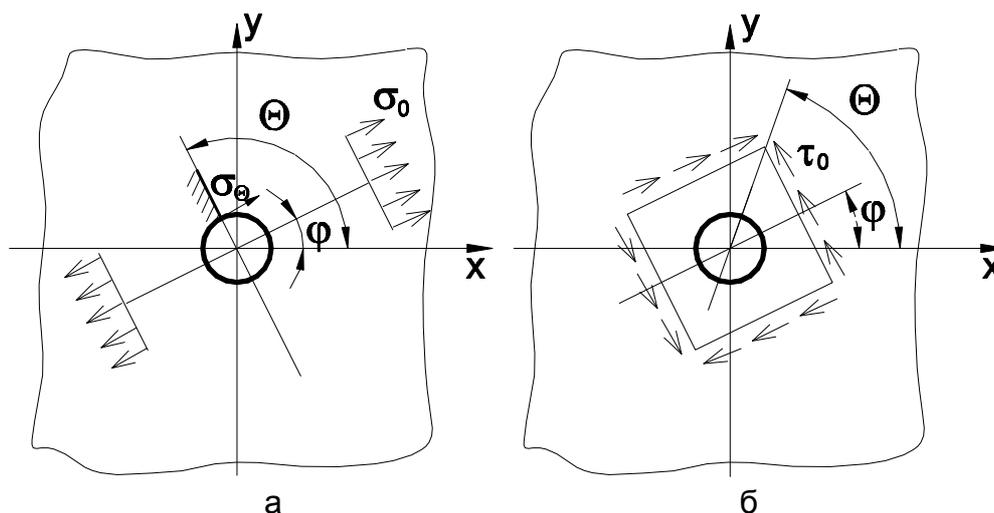


Рис. 7. К расчету распределения напряжений

Тогда

$$\sigma_{\theta} = \sigma_0 \frac{E_{\theta}}{E_x} \left[ (1+c) \sin^2 \theta - a \cos^2 \theta \right]; \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta} = -\tau_0 \frac{E_{\theta}}{2E_x} c(1+a+c) \sin 2\theta. \quad (7)$$

Эти зависимости хорошо согласуются с формулами, приведенными в работе [39], где для круглого отверстия в пластине из изотропного материала (рис. 8) окружные, радиальные и сдвиговые напряжения вычисляются следующим образом:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left[ \left( 1 + \frac{R^2}{\rho^2} \right) - \left( 1 + \frac{3R^4}{\rho^4} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (8)$$

$$\sigma_{\rho} = \frac{\sigma_0}{2} \left[ \left( 1 - \frac{R^2}{\rho^2} \right) + \left( 1 - \frac{4R^2}{\rho^2} + \frac{3R^4}{\rho^4} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (9)$$

$$\sigma_{\rho\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 + \frac{2R^2}{\rho^2} - \frac{3R^4}{\rho^4} \right) \sin 2\theta. \quad (10)$$

В [37 – 38] разработана общая методика оценки напряжений в окрестностях вырезов и отверстий практически любой формы (вырезы под люки, иллюминаторы, двери, отверстия под крепеж и т.д.). Однако за стремлением к сохранению общности подхода расчета теряются специфические особенности, связанные с взаимодействием элементов соединения.

В работе [40] автор со ссылкой на Харриса отмечает, что условия контакта тела КЭ с отверстием (величины напряжений смятия и зоны контакта) зависят как от нагрузки, так и от наличия зазора либо натяга  $\Delta d/d$ .

Со ссылкой на Элснера и Хертеля в [40] показано, что коэффициент концентрации окружных напряжений  $K_p$  также зависит от множества факторов. К

рассмотренным факторам относятся отношение диаметра отверстия к ширине, приходящейся на него полосы, посадка КЭ в отверстии и наибольшая нормальная деформация отверстия (овализация отверстия, которая зависит как от уровня усилия в полосе, так и от упругих параметров материала полосы).

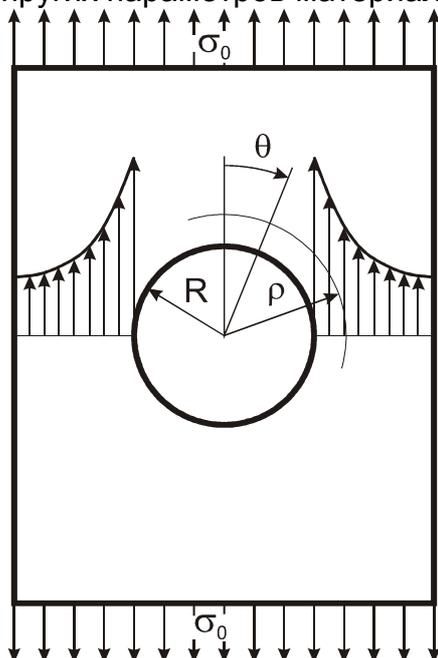


Рис. 8. К расчету концентрации напряжений около отверстия

В [22, 41] отмечено, что при одноосном нагружении большие отверстия создают коэффициент концентрации напряжений, теоретическая аппроксимация которого для широкой пластины дается через соотношение:

$$K_p = 1 + \sqrt{2 \left( \sqrt{\frac{E_x}{E_y} - \mu_{xy}} \right) + \frac{E_x}{G_{xy}}}. \quad (11)$$

Для квазиизотропных пакетов, упомянутое выше соотношение упрощается до хорошо известного значения  $K_p = 3$  для круглого отверстия. Когда отверстия расположены вместе в болтовом соединении концентрации напряжений начинают взаимодействовать и прочность композитного пакета уменьшается.

Отдельно в работе [22] отмечено, что в случае, когда диаметр отверстия значительно больше толщины пакета, то концентрация напряжений по природе двумерная. Большинство исследований связано именно с этим случаем. Предсказать прочность пакета с отверстием значительно сложнее, когда толщина пакета существенно превосходит диаметр отверстия. Концентрация напряжений по природе становится трехмерной и влияние на нее порядка укладки доминирует. Однако нет никаких указаний на то, какое значение (или диапазон значений) отношения диаметра КЭ к толщине образца можно считать переходным применительно к выбору модели.

В работе [36] показано, что среди прочих факторов на прочность соединения влияет соотношение между сминающей нагрузкой от КЭ и «проходящей» нагрузкой, а также расстояние от отверстия с КЭ до края детали.

В целом с приведенными в работе [36] выводами вполне согласуются результаты исследований работы [42]. Данные результаты получены на основе

экспериментов, с прототипами соединений на основе поляризационно-оптического метода. В качестве вывода в [43] указано, что распределение напряжений по контуру зависит от отношения усилия, проходящего по листу образца, к усилию, передаваемому КЭ.

В случае совместного действия этих усилий в работе [43] предлагается использовать зависимость для максимальных значений напряжений  $\sigma_{\theta}^{max}$  в виде линеаризации, как в [36]

$$\sigma_{\theta}^{max} = K_p \sigma_{ном} + K_Q \sigma_{см}, \quad (12)$$

где  $\sigma_{ном} = \frac{P}{bh}$ ;  $\sigma_{см} = \frac{P}{dh}$ ;  $d$  – диаметр отверстия;  $b$  – ширина полосы;  $h$  – толщина полосы;

$$K_p = 3 - 2,5 \frac{d}{b}; \quad K_Q = 0,4 + 3,5 \frac{d}{b}. \quad (13)$$

Параметр  $b$  представляет собой действительную ширину полосы детали или ширину, приходящуюся на один КЭ, в случае нескольких КЭ в ряду. Формула (9) применима в пределах  $0,2 \leq (b/d)^{-1} \leq 0,5$ , где нижний предел диапазона обоснован тем, что расстояние более пяти диаметров на практике практически не встречается, а верхний предел обусловлен тем, что поставить болты на расстояние менее двух диаметров практически невозможно. Недостатком исследований [42] является то, что они применимы только для изотропных материалов, так как примененный здесь поляризационно-оптический метод накладывает жесткие ограничения на применяемый материал модели.

В соответствии с полученными результатами были разработаны стандарты для оценки прочности образцов с отверстием [32, 33], оценки влияния жесткого тела КЭ на прочность образца [34] и влияния соотношения сминающей отверстие нагрузки от КЭ к «проходящей» нагрузке на прочность образца в пределах отверстия с КЭ [35].

На основе анализа работ следует сделать вывод, что факторы, влияющие на распределение напряжений вокруг отверстия, можно сгруппировать по геометрическим, структурным признакам и нагружению.

Немаловажным аспектом при расчете композитных механических соединений является обеспечение достоверности оценки податливости КЭ – величины деформации на единицу нагрузки (обратная величина жесткости). Известно, что податливость не обладает свойством аддитивности, т.е. податливость ряда КЭ не является простой суммой податливостей каждого из них. В работах [5, 7, 30] и др. были рассмотрены лишь случаи с одним КЭ в ряду. Исключение составила работа [36]. Так как от податливости силовой связи зависит распределение нагрузки по рядам соединения, исследования в основном направлены на повышение точности ее оценки.

В работе [7] приведены результаты использования МКЭ для оценки податливости силовой связи и выявления факторов, существенно влияющих на податливость. Результаты расчета подтверждены экспериментально, но они не были распространены на все виды КЭ.

Согласно отчету ЦАГИ [42] податливость болтовой связи зависит от многих факторов, среди которых авторы отметили смятие стенок отверстия, овализацию отверстия и деформацию сечения КЭ. В данной работе была получена

зависимость для оценки податливости связи через ее деформацию в заданных условиях. Согласно данной формуле податливость связи зависит не только от геометрических параметров компонентов соединения и свойств материалов, но и от усилий, действующих в соединяемых деталях, так как последние влияют на степень овализации отверстия. Применение данной зависимости при расчете соединения может существенно его усложнить из-за необходимости решения задачи методом невязки, или другим численным методом. Более простые зависимости для определения податливости КЭ, например, формулы фирм Boeing или Douglas [43], не учитывают перечисленные особенности взаимодействия отверстия и КЭ, что может привести к значительным погрешностям в расчете усилий в соединении.

В работе [44] были достаточно глубоко рассмотрены вопросы, связанные с теоретическим обоснованием выбора факторов, влияющих на податливость силовой связи, образованной КЭ, и с постановкой экспериментов на определение податливости КЭ. При выборе факторов, влияющих на податливость КЭ, в работе [40] кроме геометрии и свойств материалов элементов соединения рассмотрено влияние изгиба тела КЭ и усилия затяжки, посадки тела КЭ в отверстии и его овализации под действием «проходящей» нагрузки в образце. Полученные в работе [40] выводы в целом совпадают с выводами, приведенными в работе [42].

Особо следует отметить поднятые в работе [40] проблемы с экспериментальной оценкой податливости связи. Автор указывает на недостатки принятых вариантов схем испытаний, которые заключаются в том, что измеренные перемещения срединных поверхностей образцов слабо связаны с деформацией самой связи, т.е. результаты искажены. Все варианты экспериментов предусматривают симметричную компоновку образцов во избежание влияния изгиба на результат. Основная компоновка образца – деталь между двумя накладками с двумя (эксперимент Фолькерсена) и более рядами КЭ. Использование многорядного соединения для оценки податливости связи было предложено в работе [5].

### **Выводы**

Проведенный выше анализ состояния проблем и исследований по экспериментальному обеспечению расчета механических соединений на прочность позволяет сделать следующие выводы.

1. Существующая система методик расчетно-экспериментального обеспечения проектирования механических соединений композитных деталей основана на системе, отработанной для соединений металлических деталей.

2. Преимуществом существующей системы методик экспериментального обеспечения является то, что она по большей части обеспечивается стандартами.

3. Основным интегральным недостатком существующей системы методик экспериментального обеспечения расчета механического соединения композитных деталей является то, что она не учитывает особенности поведения композитов в зоне соединения, и поэтому не обеспечивает надлежащее качество проектировочных расчетов механических соединений и расчета их на прочность.

4. Использование существующей системы экспериментального обеспечения расчета, как показал накопленный опыт, в принципе возможно, но вынужденная компенсация ее недостатков приводит к ухудшению ряда характеристик конструкции, в частности завышения массы, что снижает эффективность применения ПКМ.

5. Проведенные выше исследования проблемы экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений свидетельствуют об обоснованности и актуальности разработки системы экспериментального обеспечения расчетов механического соединения композитных деталей на прочность, включающую задачи, сформулированные нами в [1], решение которых позволит повысить качество расчета механических соединений композитных деталей и тем самым обеспечить более полное преимущества использования ПКМ в силовых конструкциях летательных аппаратов.

### Список литературы

1. Бычков, С.А. О дифференциации комплексной проблемы создания отечественных самолетов транспортной категории: составляющая экспериментальной поддержки принятия проектных решений [Текст] / С.А. Бычков, А.З. Двейрин // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(79). – Х., 2014. – С. 7 – 18.

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

3. Работнов, Ю.Н. Соппротивление материалов [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.

4. Ильина, А.Д. Равнопрочное соединение элементов конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.Д. Ильина, Ю.С. Ильин // Авиационная промышленность. – 1979. – №11. – С. 68 – 71.

5. Карпов, Я.С. Исследование напряженно-деформированного состояния многорядных механических соединений деталей из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов // Авиационно-космическая техника и технология: тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского за 1997 г. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1998. – С. 328 – 334.

6. Карпов, Я.С. Распределение напряжений в комбинированных соединениях деталей из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов // Вопросы проектирования и производства тонкостенных силовых конструкций: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та – Х., 1984. – С. 55-60.

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

8. Трунин, Ю.П. Методика расчета статической прочности точечных соединений композиционных материалов [Текст] / Ю.П. Трунин // Проектирование, расчет и испытание конструкций из композиционных материалов. – ЦАГИ. – 1984. – Вып. 10. – С. 90–108.

9. Уенг, Ч.Е.С. Оценка прочности механических соединений в конструкциях из слоистых композиционных материалов [Текст] / Ч.Е.С. Уенг, К.Д. Чжанг // Аэрокосмическая техника. – М.: Мир. – 1986. – №4. – С. 29–33.

10. Agarval, B.L. Static Strength Prediction of Bolted Joints in Composite Material [Текст] / B.L. Agarval // AIAA Journal – 1980. – V.18. – P. 1371–1375.

11. Quinn, W.J. The Effect of Stacking Sequence on the Pin-Bearing Strength in GFRP [Текст] / W.J. Quinn, F.L. Matthews // Journal of Composite Materials. – 1977. – Vol. 11. – P. 139–145.
12. Контактное взаимодействие шарнирного металлокомпозитного соединения при наличии трещиноподобных дефектов [Текст] / О.С. Сироткин, Г.П. Зайцев, К.В. Кайков и др. // Механика композиционных материалов. – 1987. – №1. – С. 100 – 104.
13. Леонова, И.Е. Экспериментальное исследование анизотропии прочности болтовых соединениях слоистых композитов при варьировании геометрических и конструктивных параметров [Текст] / И.Е. Леонова, М.И. Семин // Механика композитных материалов. – 1990. – №2. – С. 268 – 272.
14. О контактном взаимодействии шарнирного металлокомпозитного соединения [Текст] / О.С. Сироткин, Г.П. Зайцев, К.В. Кайков и др. // Механика композиционных материалов. – 1986. – №2. – С. 285 – 292.
15. Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков [Текст] / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис – М.: Химия, 1981. – 272 с.
16. ASTM D5961/ D5961M-05 3039-00 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
17. Eriksson, L.I. On the bearing strength of bolted graphite epoxy laminates [Текст] / L.I. Eriksson // Journal of Composite Materials. –1990. – No 24. – P. 1246 –1269.
18. Hyer, M.W. Contact Stresses in pin-loaded Orthotropic Plates [Текст] / M.W. Hyer, E.C. Klang // International Journal of Solids Structure. –1985. – No 21. – P. 957 – 975.
19. Kim, R.Y. Effect of Temperature and Moisture on the Pin-Bearing Strength of Composite Laminates [Текст] / R.Y. Kim, J.M. Whitney // Journal of Composite Materials, 1976. – P. 149–151.
20. Tsiang, T. Damage Development in Bolt Bering of Composite Laminates [Текст] / T. Tsiang, J.F. Mandell // AIAA Journal. – 1985. –Vol. 23. – №10. – P. 1570–1577.
21. Waszczak, J.P. Failure mode and strength prediction of anisotropic bolt bearing specimens [Текст] / J.P. Waszczak, T.A. Cruse // Journal of Composite Materials. – 1971. – Vol. 5. – P. 421–425.
22. Composite Materials Handbook [Текст]. – Vol.1: Polymer Matrix Composites: Materials. – Military Handbook MIL-HDBK-17-1F, Washington, DC, 2002. – 500 p.
23. Воробей, В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Воробей, О.С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
24. ГОСТ17302-71. Пластмассы. Метод определения прочности на срез [Текст]. – Взамен ОСТ 10044-38; введ. 25.11.1971. – М.: Госстандарт, 1971. – 7 с.
25. ГОСТ Р50578-93. Материалы композиционные полимерные. Метод испытания на сдвиг перекашиванием пластины. – введ. впервые. 12.07.1993. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 15 с.
26. ASTM D 3039-00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. – 13 p.
27. ASTM D3518/D3518M-94(2001) Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate. – 7 p.
28. ASTM D4255/D4255M-83(1994) Standard Guide for Testing In-plane Shear Properties of Composite Laminates. – 10 p.

29. Проектирование, расчет и испытание соединений конструкций из композиционных материалов [Текст] / А.Л. Абибов, В.В. Васильев, В.Ф. Кутьинов, О.С. Сироткин // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – М.: Цаги. – 1973. – Вып. 1. – 196 с.

30. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб./ під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій [Текст] / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін, С.А. Бичков та ін. – Львів: Вид-во «Сполом», 2007. – 1068 с.

31. Прочность болтовых и заклепочных соединений элементов авиационных конструкций (по материалам открытой печати за 1970 – 1984 гг.): Обзоры ЦАГИ [Текст] – М., 1987, № 673. – 63 с.

32. ASTM D5766/D5766M-07 Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. – 6 p.

33. ASTM D6484/D6484M-04e1 Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. – 15 p.

34. ASTM D6742/D6742M-07 Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates. – 7 p.

35. ASTM D7248/D7248M-08 Standard Test Method for Bearing/Bypass Interaction Response of Polymer Matrix Composite Laminates Using 2-Fastener Specimens. – 8 p.

36. Composite Materials Handbook [Текст]. – Vol.3: Polymer Matrix Composites: Materials. – Military Handbook MIL-HDBK-17-3F, Washington, DC, 2002. – 350 p.

37. Лехницкий, С.Г. Анизотропные пластинки [Текст] / С.Г. Лехницкий. – Л.: ОГИЗ, 1947. – 365 с.

38. Савин, Г.Н. Распределение напряжений около отверстий [Текст] / Г.Н. Савин. – К.: Наукова думка, 1968. – 888 с.

39. Прочность, устойчивость, колебания [Текст]: справ. в трех томах. Том 2. // под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 463 с.

40. Barrois, W. The strength of structures and the applications of the fracture mechanics [Текст]/ W. Barrois // Engineering Fracture Mechanicy. – 1978. – Vol. 10. – P.109–175.

41. SRM 3-88, SACMA Recommended Test Method for Open-Hole Compression Properties of Oriented Fiber-Resin Composites. – Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA, 1988. –11 p.

42. Разработка теории и методов инженерных расчетов на прочность поперечных стыков авиаконструкций [Текст]: научно-технический отчет / ЦАГИ – Шифр 018022 п.4; Инв. №3047. – М., 1982. – 75 с.

43. Berechnung von Bolzenverbindungen in CFK / S. Postupka, A. Kuhwed, F.J. Arends, J.A. Worobjow // Proceedings of Sixth International Conf. «New leading-edge technologies in machine building». – V. 6. – Rybachie (Ukraine). – 1977. – P. 181 – 185.

44. Barrois, W. Stresses and displacements due to load transfer by fasteners in structural assemblies [Текст]/ W. Barrois // Eng. Fract. Mech. – 1978. - Vol. 10. –№1. – P. 115–176.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.  
Поступила в редакцию 10.11.14.

## **Огляд і аналіз стану проблеми розрахунково-експериментального забезпечення проектування агрегатів літака з полімерних композитів з механічними з'єднаннями деталей**

Проведено огляд і аналіз стану проблеми розрахунково-експериментального супроводу проектування агрегатів літака з полімерних композиційних матеріалів з механічними з'єднаннями. Обговорюються переваги і недоліки існуючих методів і стандартів, що визначають характеристики міцності композитів на зминання, розрив, зріз, міжшаровий зсув, їх деформативність і коефіцієнти концентрації напружень у кріпильних елементів з'єднання. Обґрунтована актуальність розробки системи експериментального супроводу розрахунку несучої здатності механічних з'єднань деталей з композиційних матеріалів, що забезпечує його високу точність і надійність.

**Ключові слова:** механічні з'єднання, полімерні композиційні матеріали, система розрахунково-експериментального забезпечення, характеристики міцності і деформативності.

## **Review and analysis of problem state of experiment-calculated support of design of aircraft units from polymer composites with mechanical junction of parts**

A review and analysis of problem state of experiment-calculated support of design of aircraft units from polymer composites with mechanical junction of parts are carried out. The advantages and disadvantages of the existing methods and standards that define the strength characteristics of composites on bearing strain, breaking, shearing, interlayer shear, their deformability and stress concentration factors in fasteners of joint are discussed. Actuality of developing experimental support of calculation of bearing capacity of parts mechanical junctions from composite materials, which provides it high accuracy and reliability is justified.

**Keywords:** mechanical junction, polymer composite materials, system of experiment-calculated support, the strength and deformability characteristics.