

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВТУЛКИ, ПОДКРЕПЛЯЮЩЕЙ ОТВЕРСТИЕ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вашуков Ю.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Одним из способов, позволяющих повысить несущую способность соединений полимерных композиционных материалов является подкрепление стенок отверстий элементами из однородных материалов. Разработан технологический способ постановки подкрепляющего элемента путем его осевого пластического сжатия. Получены аналитические соотношения определяющие деформированное состояние подкрепляющего элемента в процессе осевого сжатия.

В настоящее время перспективы прогресса в авиационной технике основанно связываются с разработкой и широким применением в полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Существенные отличия физико-механических свойств ПКМ от аналогичных свойств традиционных материалов и сплавов обусловило то, что эти материалы хуже, чем металлы приспособлены к передаче усилий (особенно сосредоточенных) с одного элемента на другой. Прочность наиболее распространенных (клепаных, болтовых, резьбовых) соединений металлических элементов значительно превосходит прочность аналогичных соединений конструкций из ПКМ. В связи с этим, проблемы поиска новых соединений ПКМ, повышение их несущей способности являются актуальными.

Одним из способов, позволяющих повысить несущую способность соединений ПКМ, является подкрепление стенок отверстий элементами (втулками, кольцами, ядрами) из однородного материала. Подкрепляющий элемент позволяет снизить концентрацию напряжений на границе отверстия за счет перераспределения напряжений, повысить разрушающее напряжение соединения на смятие, обеспечить стабильность осевой затяжки соединения [1, 2, 3].

В работе [2] предлагается технологический способ постановки подкрепляющего элемента путем вклеивания. Вместе с тем, проведенные в работе исследования показывают, что совместная работа подкрепляющей втулки, клеевой прослойки и стенок отверстия в листовой заготовке происходит только до определенного уровня напряжений, равного 15 - 20 % от разрушающей нагрузки, после чего

клей перестает выполнять эту функцию и напряженно деформированное состояние изменяется.

Разрушение клеевой прослойки происходит в результате действия на контуре отверстия в заготовке радиальных напряжений, возникающих в процессе действия растягивающей нагрузки [3]

$$\sigma_{\tau} = \left[k - \nu_{12} + N \left(\sin^2 \phi + \kappa \cos^2 \phi \right) \right] \frac{U_{\tau}}{Rq}, \quad (1)$$

$$\text{где } k = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}; N = \sqrt{2(k - \nu_{12})} + \frac{E_1}{E_2}; q = \frac{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{E_2} + G_{12};$$

E_1 и E_2 - модули упругости материала листовой заготовки во взаимоперпендикулярных направлениях; ν_{12} и ν_{21} - коэффициенты Пуассона; G_{12} - модуль сдвига.

Одним из путей увеличения этапа совместной работы соединения с подкрепляющей втулкой является уменьшение (или устранение) поля радиальных растягивающих напряжений по периметру отверстия при эксплуатационных нагрузках. Величину радиальных напряжений можно уменьшать путем предварительного (на этапе постановки втулки в отверстие) создания в зоне их действия переменного поля радиальных сжимающих напряжений.

Поле радиальных сжимающих напряжений на границе отверстия можно создать путем совместной радиальной раздачи подкрепляющего элемента и стенок отверстий в локальных зонах, где радиальные растягивающие напряжения при статической нагрузке имеют наибольшие значения.

В настоящей работе изложен один из разработанных способов [4] установки подкрепляющей втулки в отверстие листовой заготовки из ПКМ. (рис. 1), получены аналитические соотношения, определяющие влияние технологических параметров на величину радиальной раздачи подкрепляющей втулки.

Разрабатываемый способ постановки втулки заключается в осевом сжатии подкрепляющего элемента (рис. 1 а. б), в процессе осуществления которого его внутренний диаметр остается неизменным, а по внешнему диаметру осуществляется преимущественная радиальная раздача совместно с соответствующими участками листовой заготовки 2 с образованием на границе отверстия переменного поля радиальных сжимающих напряжений (рис. 1в). Данную раздачу можно

осуществить с помощью втулки (рис. 1 г), имеющей на верхнем торце выступы 4 в виде сегментов. При этом высота втулки без выступов должна равняться высоте листовой заготовки h . В процессе осевого сжатия такой втулки деформации подвергается только объём, заключенный в сегментах, и материал, располагающийся непосредственно под ними. Осевое сжатие втулки 1 завершается, когда ее общая высота становится равной высоте листовой заготовки (рис. 1 б).

Геометрические размеры выступов зависят от величины и характера поля напряжений, которое необходимо получить в листовой заготовке. Форма выступов в виде сегмента выбрана в связи с тем, что осадка подобных выступов дает переменное убывающее поле радиальных сжимающих напряжений на границе отверстия в заготовке.

Следует отметить, что величина максимальной радиальной раздачи отверстия в листовой заготовке должна быть строго ограничена и не превышать максимальной величины натяга для данного материала [5].

Для нахождения аналитических соотношений, определяющих деформированное состояние подкрепляющего элемента, воспользуемся принципом минимума полной энергии деформации и методом Ритца [6].

Будем считать листовую заготовку анизотропной средой, подчиняющейся обобщенному закону Гука, а втулку пластическим телом с нелинейным упрочнением. При этом предполагается, что форма образующей поверхности втулки в процессе радиальной раздачи остается прямолинейной.

Представим радиальное перемещение по внешнему контуру подкрепляющей втулки в виде

$$U_r = \frac{1}{2} \alpha \tau \left(1 - \frac{r_1^2}{\tau \cos^2 \phi} \right), \quad (2)$$

где α - варьируемый параметр.

Уравнение (2) было выбрано из условия постоянства объёма с учетом равномерности раздачи внешнего контура подкрепляющей втулки по высоте.

Используя равенство (2), а также известные соотношения из механики сплошных сред [6], определим деформации

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U_r}{\partial r} = \frac{1}{2} \alpha \left(1 + \frac{r_1^2}{\tau^2 \cos^2 \phi} \right);$$

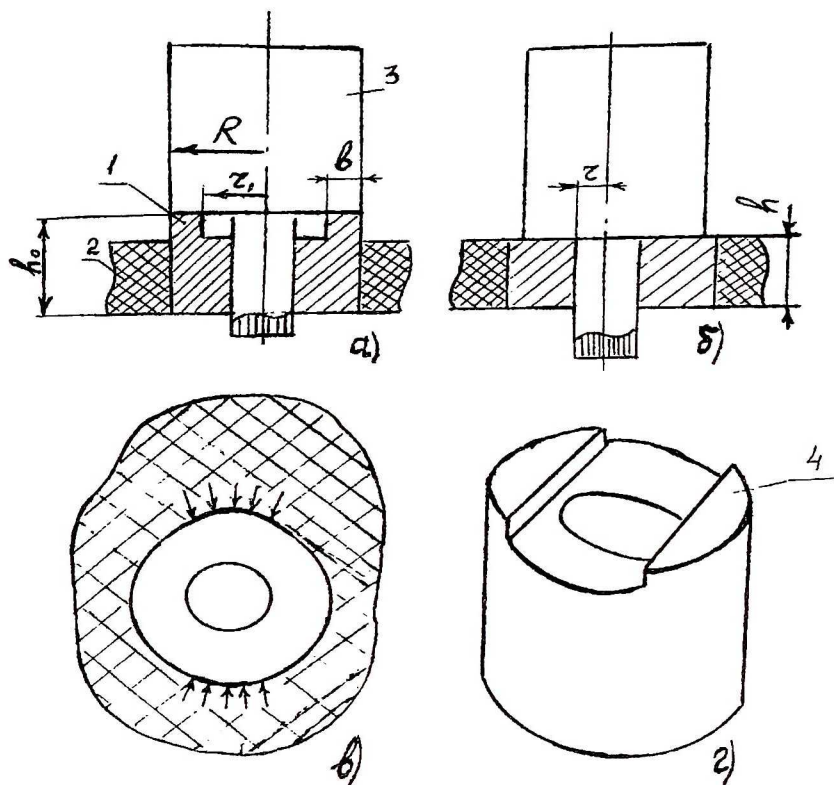


Рис. 1 Схема способа постановки подкрепляющей втулки:
 1 - подкрепляющая втулка; 2 - листовая заготовка;
 3 - ступенчатый пуансон; 4 - выступы на торце втулки.

$$\varepsilon_\phi = \frac{U_\tau}{\tau} = \frac{1}{2} \alpha \left(1 - \frac{r_1^2}{\tau^2 \cos^2 \phi} \right); \quad (3)$$

$$\gamma_w = \gamma_{\phi z} = \gamma_{\tau \phi}.$$

Из условия несжимаемости получим:

$$\frac{dU_\tau}{d\tau} + \frac{U_\tau}{\tau} + \varepsilon_z = 0 \quad \varepsilon_z = -\alpha,$$

Выражение для интенсивности деформации сдвига получим из формулы [6]:

$$\Gamma = \sqrt{\varepsilon_r + \varepsilon_r \varepsilon_\phi + \varepsilon_\phi^2 + \frac{1}{4} (\gamma_{rz}^2 + \gamma_{\phi z}^2 + \gamma_{r\phi}^2)} = \alpha \sqrt{3 + \frac{r_1^4}{r^4}}. \quad (4)$$

Для нахождения параметра α составим вариационное уравнение. С учетом граничных условий (рис.2) оно будет следующим:

$$\delta A_D = \delta A_{вн} + \delta A_{мр.м} + \delta A_{ср} + \delta A_{р.о} + \delta A_{мр.р}, \quad (5)$$

где $\delta A_{вн}, \delta A_{мр.р}, \delta A_{ср}, \delta A_{р.о}, \delta A_{мр.м}$ - вариации работ соответственно внутренних сил, идущих на изменение формы втулки; силы трения по торцам втулки; сила среза между пластической и жесткой зонами, нормальных сил к поверхности отверстия и сил трения на поверхности контакта « втулка - листовая заготовка ».

Работу внутренних сил для материала втулки, подчиняющегося уравнению состояния пластической среды с нелинейным упрощением, можно представить в виде [5, 7]:

$$A_{вн} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}(1 - \varepsilon_t) (\sqrt{3}\varepsilon_t)^n} \iiint_V \Gamma^{1+n} dv, \quad (6)$$

где σ_s - предел прочности материала втулки;

ε_t - относительное сужение, отвечающее образованию устойчивости шейки;

$$n = \frac{\varepsilon_t}{(1 + \varepsilon_t)}.$$

Работу сил трения по торцам сегментов можно представить следующим образом [5,6]:

$$A_{мр.м} = 2\psi_1 \int_0^{\frac{\pi}{t}} \int_{\frac{r_1}{\cos\phi}}^R T(\Gamma) U_\tau \tau dr d\phi, \quad (7)$$

где ψ_1 - эмпирический коэффициент, учитывающий состояние трущихся поверхностей и форму очага деформации;

$$\psi_1 = \mu_1 + \frac{1}{8} \frac{b}{h} (1 - \mu_1) \sqrt{\mu_1}; \quad \mu_1 - \text{коэффициент трения};$$

$$b = R - r_1; \quad T(\Gamma) - \text{интенсивность касательных напряжений};$$

$$T(\Gamma) = \frac{\sigma_s \Gamma^n}{\sqrt{3}(1 - \varepsilon_t) (\sqrt{3}\varepsilon_t)^n}; \quad \frac{\pi}{t} - \text{угол охвата сегмента}.$$

Работа сил среза определялась из выражения [6] :

$$A_{ср} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^h T(\Gamma)(U_{za} - U_{zb}) \tau dt d\phi . \quad (8)$$

Работу нормальных сил к поверхности отверстия можно представить в виде [5, 6] :

$$A_{p.o} = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^h \sigma_{\tau} U_{\tau} R d\phi dz . \quad (9)$$

Работа сил трения, возникающую при раздаче отверстия, определялась по формуле [5, 6] :

$$A_{мп.р} = \psi_2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^h \sigma_{\tau} U_{\tau} R d\phi dz , \quad (10)$$

где $\psi_2 = \mu_2 + \frac{1}{8} \frac{R}{h} (1 - \mu_2) \sqrt{\mu_2}$; μ_2 - коэффициент трения в контакте между втулкой и стенкой отверстия листовой заготовки.

Подставляя в (5) выражения (6), (7), (8), (9), (10) и, выполняя варьирование по α , с учетом (2-4) получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_b}{\sqrt{3(1+\varepsilon_t)}(\sqrt{3\varepsilon_t})^n(1+n)} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^R \int_0^{h_0} \frac{\partial \Gamma^{1+n}}{\partial \alpha} \tau dt d\phi dz + \\ & + 2\psi_1 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^R \frac{\partial [TU_{\tau}]}{\partial \alpha} \tau dt d\phi + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^h \frac{\partial [TU_z]}{\partial \alpha} d\phi dz + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^h \frac{\partial \left\{ \frac{U_{\tau}}{Rq} \left[k - \nu_{12} + N(\sin^2 \phi + \kappa \cos^2 \phi) \right] U_{\tau} \right\}}{\partial \alpha} \tau d\phi dz + \\ & + \psi_2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^h \frac{\partial \left\{ \frac{U_{\tau}}{Rq} \left[k - \nu_{12} + N(\sin^2 \phi + \kappa \cos^2 \phi) \right] U_{\tau} \right\}}{\partial \alpha} \tau d\phi dz = 0 . \end{aligned}$$

Произведя необходимые вычисления и используя для первого слагаемого метод приближенного дифференцирования [5], получим значение α в следующем виде:

$$\alpha = \left(\frac{\sqrt{3}\varepsilon_z^{1-n}\sigma_e(1+n)\psi_1 B_1}{\sigma_e h_0 B_2 + 0,433\varepsilon_z^{1-n} h B_3 S L \mu} \right)^{1-n}, \quad (11)$$

$$\text{где } B_1 = 2,66(R^3 - \tau_1^2) - 4\tau_1^2(R - \tau_1) + \frac{Sh^2 B_4}{\pi\psi_1};$$

$$S = \frac{\pi(R^2 - \tau_1^2)}{2F_{сезм}}; \quad B_2 = 3(R^2 - \tau^2) - \frac{\tau_1^4}{(R^2 - \tau_1^2)};$$

$$B_3 = \frac{k - v_{12} + N(\sin^2\phi + k\cos^2\phi)}{qt};$$

$$B_4 = \left\{ \frac{R\pi}{t} - \tau_1 \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{t} + \frac{\pi}{2t} \right) \right| \right\};$$

$$M = \left[\left(R^2 - 2\tau_1^2 - \frac{\tau_1^4}{R^2} \right) + 2\psi_2 h \left(R - \frac{\tau_1^2}{R} \right) \right].$$

Таким образом, зная α , по соотношению (2) находим U_τ .

Из уравнения (11), задавая величиной максимального перемещения U_τ , можно найти величину деформирующего хода Δh .

Для оценки полученной аналитической зависимости были проведены экспериментальные исследования на подкрепляющих втулках из алюминиевого сплава марки АМГ6М, которые устанавливались в отверстия листовых заготовок из стеклопластика КАСТ-В толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м.

После осадки втулки образцы с подкрепленными отверстиями препарировали под разными углами относительно оси армирования и измеряли внешний диаметр (радиальное сечение) втулки. В результате сравнения расчетных и экспериментальных данных выявлено, что экспериментальные значения выше расчетных на 6-9 %.

Список литературы

1. Комаров Г.В. Способы соединения деталей из пластических масс. М.: Химия, 1979. - 287 с.
2. Сироткин О.С., Литвинов В.Б. Технологические методы управления концентрацией напряжений в зоне соединения лопасти несущего винта из композиционных материалов - Современные проблемы

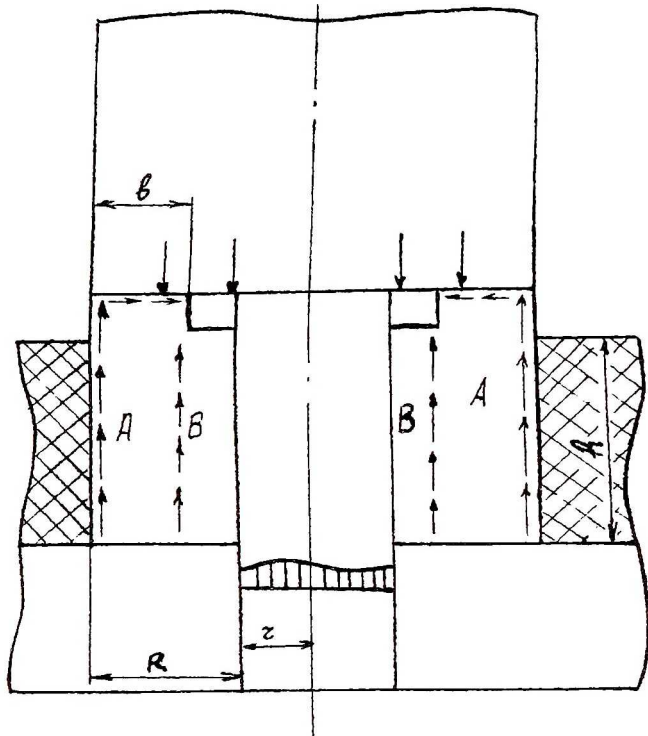


Рис.2 Схема деформирования подкрепляющей втулки и листовой заготовки

проектирования и изготовления конструкций ЛА из композиционных материалов. М.: МАИ, 1985. С. 36-44.

3. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977, 415с.
4. А.С. 1608992. СССР МКИ В23К 20/08. Способ плакирования отверстий в листовых заготовках / Вашуков Ю.А., Барвинок В.А., Ломовской О.В., Богданович В.И. (СССР). - N4686506; Заяв. 3.05.89; Опубл. 23.11.90 Бюл N43.
5. Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединение конструкций из композиционных материалов. Л. : Машиностроение, 1985. - 168 с.
6. Гарновский И.Я. Теория обработки металлов давлением. М. : ГНТИ 672с.
7. Барвинок В.А., Вашуков Ю.А., Богданович В.И. Определения усилия осадки и деформации втулки при подкреплении отверстия в деталях из композиционных материалов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1991. - N7. - с.14 - 16.