

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРИНГЕРОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время применение стрингерных панелей широко распространено в авиакосмической технике, что обусловлено их высокой надежностью, жесткостью и прогнозируемым характером разрушения [1, 2]. При их проектировании важную роль играет выбор формы и размеров стрингеров. В работах [3, 4] рассмотрены методики проектирования стрингеров из металлов на основе равенства критических усилий местной и общей устойчивости. Конкретный профиль стрингера следует выбирать исходя из условий его нагружения, т.е. индивидуально для каждого расчетного случая [3, 4]. Главной проблемой проектирования стрингеров из металлов является трудность изготовления сложного сечения, а также увеличение общей массы конструкции при креплении стрингеров к панели. Использование композитных стрингеров позволяет управлять структурой материала и размерами, не привязываясь к сортаменту. В этом состоит особое преимущество стрингерных панелей из композитов.

Форма поперечного сечения стрингера математически никак не формализована. Можно представить стрингер в виде, показанном на рис. 1. Зануляя те или иные размеры, можно образовать практически все применяемые формы, но при этом резко возрастает количество искоемых параметров, особенно с учетом неизвестности структуры КМ. На практике наиболее часто из технологических соображений с учетом имеющегося опыта традиций формы форма поперечного сечения стрингера задается, например уголок или Ω -образный профиль.

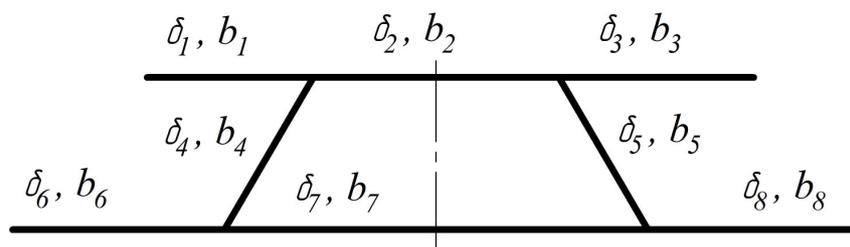


Рисунок 1 – Универсальная форма поперечного сечения стрингера

Распределение усилий N_x между обшивкой и стрингерами характеризуется параметром θ , т.е.

$$N_{стр} = N_x t \theta; \quad N_{обш} = N_x (1 - \theta). \quad (1)$$

Предположив, что обшивка и стрингеры деформируются совместно и одинаково вплоть до разрушения, из уравнений равновесия и совместности деформаций получим

$$N_{обш} = \frac{N_x}{1 + \frac{f E_{cmp}}{t \delta E_x}}; \quad N_{cmp} = \frac{N_x t}{1 + \frac{t \delta E_x}{f E_{cmp}}}. \quad (2)$$

Тогда, сопоставив формулы (1) и (2), получим

$$\frac{E_x t \delta}{E_{cmp} f} = \frac{1 - \theta}{\theta}, \quad (3)$$

т.е. базовые параметры панели, при желании распределить усилия N_x между обшивкой и стрингерами, остаются связанными этим соотношением, обеспечивающим совместность деформаций по оси x . Эта зависимость должна выполняться безусловно, без каких-либо отклонений. Из нее следует, что структура КМ обшивки (в виде E_x) зависит от материала, количества стрингеров и площади их поперечного сечения, т.е. раздельная оптимизация невозможна. В связи с этим попробуем обосновать некоторые тенденции или направления поиска рациональных решений. Из рис. 2 видно, что при равных суммарных площадях поперечных сечений стрингеров ($nf = const$) большими критическими усилиями общей устойчивости обладает панель с меньшим количеством стрингеров. С одной стороны, собственная изгибная жесткость ребер больше, а с другой – больше расстояние z_n между механическим центром тяжести панели и стрингера. При одинаковом количестве стрингеров и их площади f выгодней увеличивать высоту стенки стрингера (рис. 3), так как собственные моменты инерции растут пропорционально b^3 и увеличивается расстояние z_n . Конечно, не следует забывать, что высота стенки ограничена «сверху» условием обеспечения ее местной устойчивости. Кроме того, при проектировании панелей крыла применение ребер с большей высотой снижает эффективность их работы на общий изгиб крыла и потребуются увеличение их площади (рис. 4). Сказанное подтверждает то, что даже при самом простом поперечном сечении стрингера высота стенки является достаточно противоречивым параметром – с одних позиций ее надо делать больше, а с других – меньше.

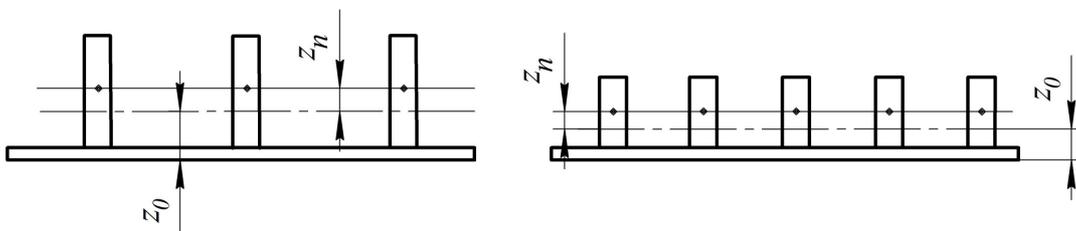


Рисунок 2 – К анализу влияния количества стрингеров на критические усилия панели

Из графиков на рис. 5 видно, что есть некоторая высота стенки, при которой допустимые критические напряжения общей устойчивости $\sigma_{кр.общ}$ панели и местной устойчивости $\sigma_{кр.мест}$ стенки имеют максимум.

Этот вывод позволяет обосновать необходимость варьирования высоты стенки при оптимизации параметров панели. Аналитическое определение b_{opt} не представляется возможным.

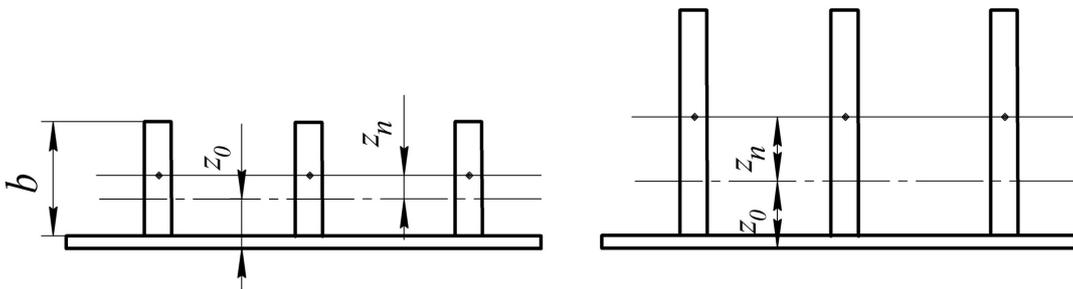


Рисунок 3 – К анализу влияния высоты ребра на общую устойчивость панели

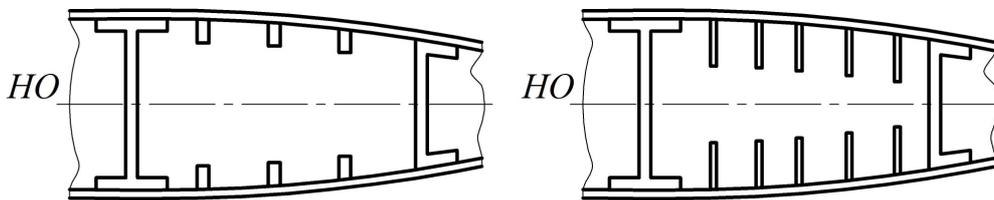


Рисунок 4 – К анализу влияния высоты ребер на изгибную жесткость крыла

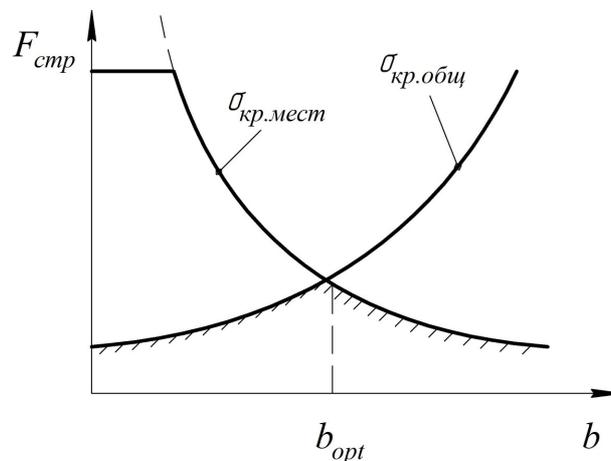


Рисунок 5 – Зависимость критических напряжений от высоты ребра

Рассмотрим возможности управления шириной зоны соединения стрингера с обшивкой. При проектировании панели как изолированного, самостоятельного конструктивного элемента достаточно сохранить постоянную толщину. Если же это панель обшивки крыла, то необходимо учитывать, что чем ближе к обшивке центр жесткости стрингера, тем больше несущая способность крыла на изгиб, а с другой стороны – ширина зоны соединения должна быть достаточной для передачи на обшивку потока касательных усилий. Эта задача конструктивно решается двумя способами – или обеспечивается необходимая ширина (рис. 6, а) или ребро усиливается дополнительными слоями $[\pm 45^\circ]$ (рис. 6, б), роль которых может играть часть слоев обшивки (рис. 6, в).

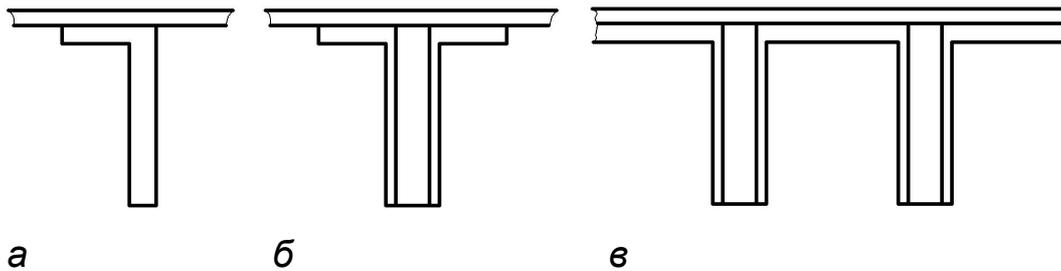


Рисунок 6 – КТР соединения подкрепляющего ребра с обшивкой

Анализируя форму поперечного сечения стрингера, интересно ответить на вопрос: «Какой из двух вариантов панели обшивки крыла, показанных на рис. 7, выгодней?». С позиций устойчивости панели вариант *a* несомненно лучше, но, вспомнив, что это панель обшивки крыла, форма *б* предпочтительней (изгибная жесткость крыла в целом больше). Кроме того, по варианту, показанному на рис. 7, б, стрингер обладает большими критическими усилиями местной устойчивости. Таким образом, если устойчивость элемента стрингера является критичной для панели, то применяют слоистые ломаные профили (швеллер, таврошвеллер, двутавр и т.п.), подбирая их размеры так, чтобы критические усилия всех стенок были равными и максимальными из возможных. По этой причине достаточно эффективны Ω -образные и коробчатые стрингеры (рис. 8) при условии решения проблем изготовления и сборки, а также надежной изоляции внутренней полости от попадания влаги, насекомых, мелких животных.

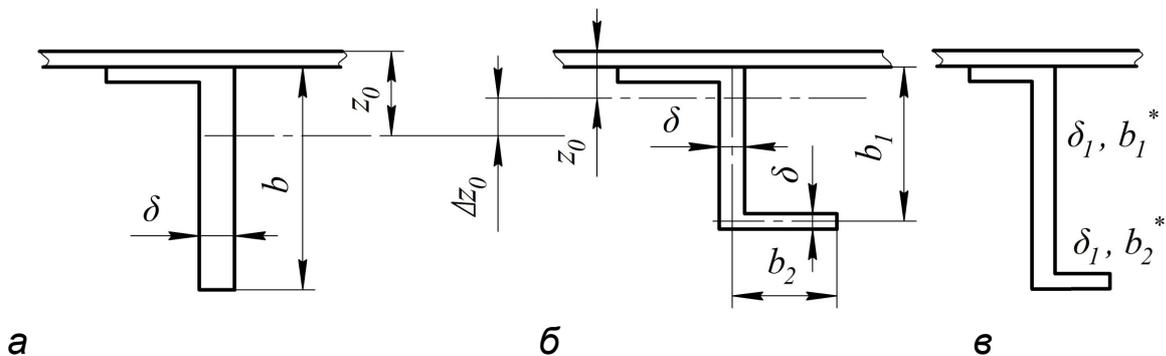


Рисунок 7 – К анализу формы поперечного сечения стрингера

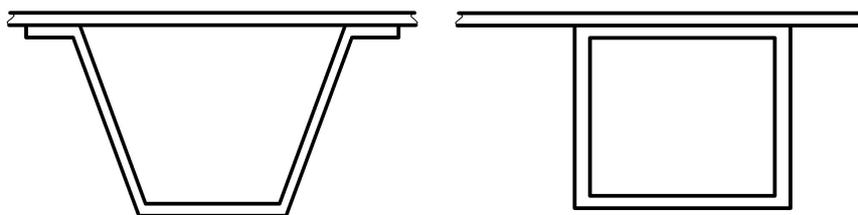


Рисунок 8 – Эффективные формы поперечного сечения стрингера

В общем случае идеальное соотношение δ/b для подкрепляющих ребер соответствует равенству предела прочности и критических напряжений местной устойчивости

$$\frac{\pi^2 K}{12} \sqrt{b_1 b_{22}} \left(\frac{\delta}{b} \right)^2 = F_{cmp}, \quad (4)$$

откуда

$$\left(\frac{\delta}{b} \right)^2 = \frac{12 F_{cmp}}{\pi^2 K \sqrt{b_1 b_{22}}}. \quad (5)$$

Для пултрузионных профилей получим

$$\left(\frac{\delta}{b} \right)^2 = \frac{12 F_{1c}}{\pi^2 K \sqrt{\bar{E}_1 \bar{E}_2}}, \quad (6)$$

где при одной свободной стороне (см. рис. 7, а) коэффициент опирания

$$K_2 = 0,4 + \frac{0,3 \bar{E}_1 \mu_{21} + G_{12}}{\sqrt{\bar{E}_1 \bar{E}_2}}, \quad (7)$$

а при шарнирном опирании по всем сторонам (см. рис. 7, б)

$$K_1 = 2 \left(1 + \frac{\bar{E}_1 \mu_{21} + 2G_{12}}{\sqrt{\bar{E}_1 \bar{E}_2}} \right). \quad (8)$$

Для реальных КМ коэффициент опирания по формуле (8) в несколько раз больше, чем по формуле (7), и при одинаковой толщине стенки несущая способность z-образного стрингера больше, чем уголка. Оптимальное соотношение ширины стенок b_1 и b_2 (см. рис. 7, б) находится из условия их равноустойчивости

$$\frac{\pi^2 K_1}{12} \sqrt{b_1 b_{22}} \left(\frac{\delta}{b_1} \right)^2 = \frac{\pi^2 K_2}{12} \sqrt{b_1 b_{22}} \left(\frac{\delta}{b_2} \right)^2.$$

Отсюда

$$\frac{b_1^2}{b_2^2} = \frac{K_1}{K_2}. \quad (9)$$

Это равенство позволяет проектировать форму поперечного сечения стрингеров.

Замена уголкового стрингера (см. рис. 7, а) на z-образный приводит к снижению изгибной жесткости панели D_1 , но с учетом сказанного выше о критических усилиях местной устойчивости z-образный стрингер можно делать меньшей толщины (см. рис. 7, в) при сохранении уровня критических напряжений таким же, как и у уголка. Это значит, что при равенстве площадей увеличится b_1 (см. рис. 7, б), а также изгибная жесткость D_1 панели в целом.

Оптимальные параметры z-образного стрингера, показанного на рис. 7, в, находятся из системы уравнений, отражающих равенство площадей и равноустойчивость стенки уголка (см. рис. 7, а) и стенок z-образного профиля:

$$b_1 = \frac{b \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}}{\sqrt{\sqrt{\frac{K_1}{K_2}} + 1}}; \quad \delta_1 = \frac{\delta}{\sqrt{\sqrt{\frac{K_1}{K_2}} + 1}}; \quad b_2 = \frac{b}{\sqrt{\sqrt{\frac{K_1}{K_2}} + 1}}. \quad (10)$$

Таким образом, применение профилей со сложным контуром является выгодным как с позиций повышения критических усилий местной формы потери устойчивости, так и обеспечения общей устойчивости панели. Формулы (10) позволяют оценить эффективность замены одного профиля другим.

Еще одним важным правилом конструирования стрингеров является максимально возможное разнесение площадей. Это хорошо видно из сравнения двух форм поперечного сечения (рис. 9). При постоянстве массы можно убедиться в том, что замена некоторой части слоев $[0^\circ]$ на $[\pm 45^\circ]$ и размещение остальной части сечения сверху и снизу (см. рис. 9, б) обеспечивают увеличение собственной изгибной жесткости стрингера, а значит, и панели в целом.

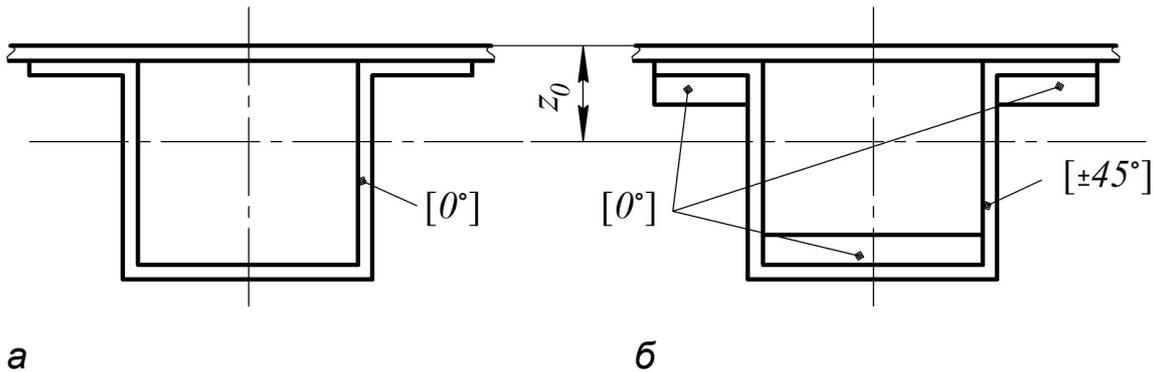


Рисунок 9 – К оценке эффективности разнесения площадей

На рис. 10 схематично показана последовательность увеличения несущей способности стрингера таврового типа. Естественно, повышение эффективности напрямую связано с усложнением, а значит, и удорожанием изготовления, поэтому при принятии решения необходимо проанализировать все аспекты и найти приемлемый компромисс.

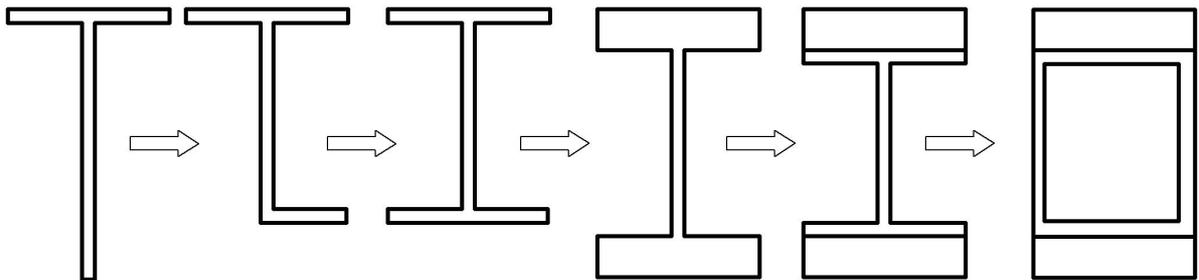


Рисунок 10 – Схема повышения эффективности стрингера

Выводы

Проанализировано влияние количества стрингеров на критические усилия панели и высоты ребра на общую устойчивость панели и изгибную жесткость крыла. Рассмотрена возможность управления шириной зоны соединения стрингера с обшивкой. Показана эффективность применения ломаных профилей (швеллеров, таврошвеллеров, двутавров и т.п.), а также Ω -образных и коробчатых стрингеров. Представлены формулы для расчета геометрических параметров подкрепляющих ребер. Применение профилей со сложным контуром является выгодным с позиций повышения критических усилий местной формы потери устойчивости и обеспечения общей устойчивости панели. Важным правилом конструирования стрингеров является максимально возможное разнесение площадей в целях увеличения изгибной жесткости панели в целом. Предложенные мероприятия по проектированию стрингеров позволяют снизить массу конструкции, повысить ее жесткость и устойчивость, но при этом стоимость изготовления увеличивается (при повышении эффективности стрингера), следовательно, необходимо найти компромисс, проанализировав все аспекты.

Список использованных источников

1. Проектирование конструкций самолетов / Е.С. Войт, А.И. Ендогур, З.А. Малик-Саркисян, И.М. Алявдин. – М.: Машиностроение, 1987. – 416 с.
2. Проектирование и конструктивно-технологические решения панелей из композиционных материалов: учеб. пособие / Я.С. Карпов, П.М. Гагауз, Ф.М. Гагауз, Т.А. Литвинова. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 180 с.
3. Андриенко А.И. Конструкция и проектирование крыльев летательных аппаратов: учеб. пособие / А.И. Андриенко, В.В. Кириченко. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1985. – 109 с.
4. Конструкции летательных аппаратов и их систем: конспект лекций / А.И. Андриенко, В.В. Кириченко, В.И. Парасюк и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – Ч.2. – 174 с.
5. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
6. Карпов Я.С. Оптимизация структуры композиционного материала панелей летательных аппаратов при ограничениях по прочности, устойчивости и прогибу / Я.С. Карпов // Проблемы прочности. – 2004. – № 6 (372). – с. 33-47.

Поступила в редакцию 05.11.2010.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*