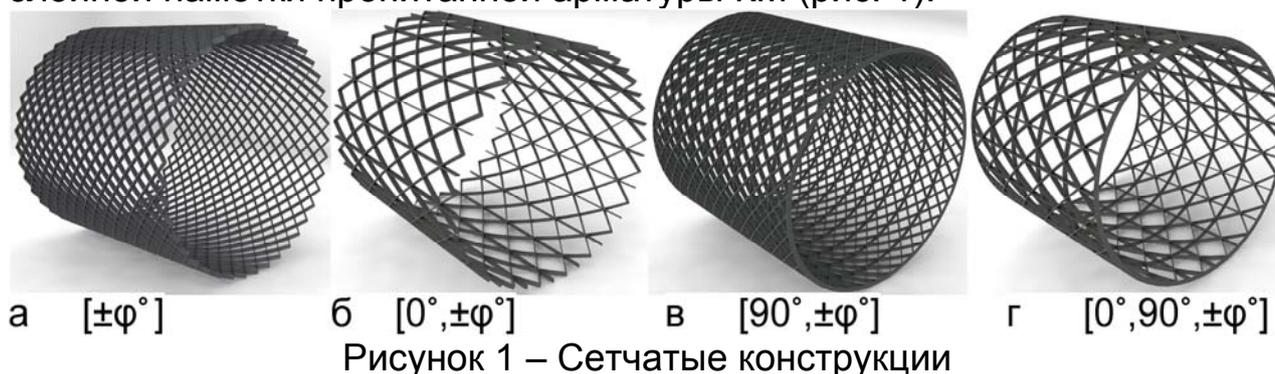


ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛУПЕТЛЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ С ОРЕБРЕННОЙ ВТУЛКОЙ

Сетчатые конструкции из композиционного материала (КМ) обладают высокой степенью массового совершенства и успешно применяются в аэрокосмической технике [1-2]. Сетчатая конструкция, имеющая форму цилиндрической или конической оболочки, состоит из системы спиральных и кольцевых ветвей, которые образуются в результате послойной намотки пропитанной арматуры КМ (рис. 1).



Одной из актуальных проблем при проектировании сетчатой конструкции является способ ее соединения с другими модулями (агрегатами). Для реализации в полной мере прочностных свойств спиральных (продольных) ребер сетчатой конструкции при выборе конструктивно-технологического решения (КТР) или проектировании соединительного узла необходимо пользоваться следующими принципами [3]:

- сохранение целостности арматуры КМ при формировании соединения;
- обеспечение передачи усилия с минимально возможным объемом КМ в направлении армирования;
- миниатюризация металлических элементов соединительного узла и обеспечение воспроизводимости требуемого качества их изготовления в серийном производстве.

Эти принципы были реализованы в новых КТР соединений, разработанных в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» [3], среди которых модифицированное полупетлевое соединение (рис. 2, а), обеспечивающее возможность съема как растягивающих, так и сжимающих усилий.

Исходя из вышесказанного, актуальной является разработка инженерной методики расчета, позволяющей определить основные параметры оребренной втулки с учетом технологических и конструктивных ограничений.

Параметрами модифицированного полупетлевого соединения, подлежащими определению, являются (см. рис. 2, б, в):

- $D_{бол}$ – диаметр болта;
- $D_{втул}$ – диаметр втулки;
- $D_{реб}$ – наружный диаметр ребер;
- $\delta_{реб}$ – толщина ребра втулки;
- $\delta_{леп}$ – толщина лепестка КМ;
- $n_{ш}$ – количество ребер втулки.

Максимальная сила, передаваемая на стыковой болт (см. рис. 2)

$$N_{max} = 2 \cdot F_{p(c)} \cdot b_{вет} \cdot H_{втул} \cdot \cos \varphi_{вет}, \quad (1)$$

где $\varphi_{вет}$ – угол отклонения ветви от плоскости симметрии.

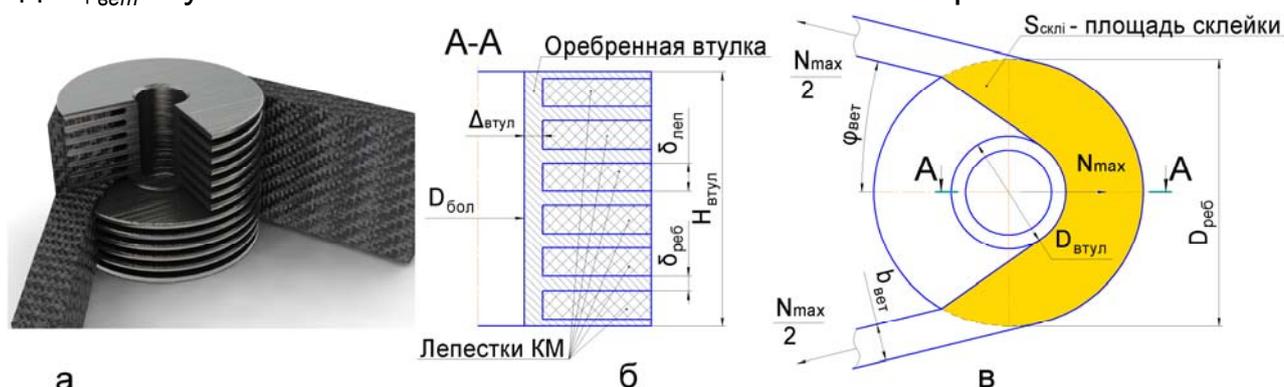


Рисунок 2 – Модифицированное полупетлевое соединение

Так как стыковой болт работает на смятие и срез по двум плоскостям, его диаметр определяется формулой

$$D_{бол} = \max(D_{1бол}, D_{2бол}, D_{3бол}). \quad (2)$$

В формуле (2) обозначено:

$D_{1бол}$ – диаметр стыкового болта, определяемый из условия среза;

$D_{2бол}$ – требуемый диаметр стыкового болта по смятию;

$D_{3бол}$ – диаметр стыкового болта, необходимый для обеспечения прочности втулки на смятие;

$$D_{1бол} = \sqrt{\frac{2 \cdot N_{max}}{\pi \cdot [\tau_{в.б}]}}; \quad (3)$$

$$D_{2бол} = \frac{2 \cdot N_{max}}{\pi \cdot H_{втул} \cdot [\sigma_{см.б}]}; \quad (4)$$

$$D_{3бол} = \frac{2 \cdot N_{max}}{\pi \cdot H_{втул} \cdot [\sigma_{см.вт}]}, \quad (5)$$

где $[\tau_{в.б}]$ – предел прочности материала болта на срез;

$[\sigma_{см.б}]$ – предел прочности материала болта на смятие;

$[\sigma_{см.вт}]$ – предел прочности материала втулки на смятие;

$H_{втул}$ – высота ветви КМ.

Наружный диаметр втулки рассчитываем из конструктивных соображений по формуле (см. рис. 2, б)

$$D_{втул_i} = D_{бол} + 2 \cdot \Delta_{втул_i}, \quad (6)$$

где $\Delta_{втул_i} = \Delta_{втул_0} - i^U \cdot \Delta$ – толщина стенки втулки i -го варианта;

$\Delta_{втул_0}$ – толщина втулки первого варианта;

$i^U \cdot \Delta$ – шаг уменьшения начального значения $\Delta_{втул_0}$.

Для определения наружного диаметра металлических ребер, удовлетворяющего ограничению по объемному содержанию волокон, необходимо задаться диапазоном изменения коэффициента $k_{сеч} = \delta_{реб} / \delta_{леп}$, который показывает отношение толщины ребра к лепестку КМ (см. рис. 2, в):

$$k_{сеч_i} = k_1 + (i - 1) \cdot 0.1, \quad (7)$$

где $k_1 = 0.5$ – начальное значение коэффициента;

$i = 1, \dots, n$, n – количество рассматриваемых вариантов.

Согласно работе [5], наружный диаметр оребренной втулки, удовлетворяющий ограничению на объемное содержание волокон, для каждого рассматриваемого $k_{сеч_i}$, рассчитывают по формуле

$$D_{реб_i} = \frac{2 \cdot b_{вет} \cdot (k_{сеч_i} + 1) + D_{втул_i} \cdot \xi_i}{\xi_i}. \quad (8)$$

Здесь $b_{вет}$ – ширина ветви КМ;

$\xi_i = \xi_0 - i \cdot \Delta_\xi$ – отклонение объемного содержания волокон [5].

Для определения количества металлических ребер втулки необходимо знать площадь склейки лепестков КМ. Поскольку поверхность склейки имеет достаточно сложную форму (см. рис. 2, в), воспользуемся приближенной формулой для расчета площади одной плоскости склейки

$$S_i = \frac{D_{втул_i}^2}{4} \cdot \arccos \frac{D_{втул_i}}{D_{реб_i}} - \frac{D_{втул_i}}{4} \cdot \sqrt{D_{реб_i}^2 - D_{втул_i}^2} + A_{1_i} \cdot \frac{(D_{реб_i}^2 - D_{втул_i}^2)}{4}, \quad (9)$$

где $A_{1_i} = \frac{\pi}{4} + \arccos \left(\frac{D_{реб_i} - 2 \cdot b_{вет}}{D_{реб_i}} \right) - \varphi_{вет}$.

Тогда количество ребер можно определить из условия обеспечения прочности склейки:

$$n_{ш_i} = \frac{N_{max}}{2 \cdot S_i \cdot [\tau_{скл}]}. \quad (10)$$

Здесь $[\tau_{скл}]$ – предел прочности клеевого слоя.

Найденное значение $n_{ш_i}$ округляем до ближайшего целого числа.

Для каждого рассматриваемого варианта оребренной втулки с заданным значением $k_{сеч_i}$ изменение объемного содержания волокон в первой, второй и третьей зонах модифицированного полупетлевого соединения (рис. 3) рассчитывают согласно работе [5]:

$$\theta_{1,i,j} = \frac{\theta_{вет} \cdot b_{вет} \cdot (k_{сеч_i} + 1)}{(a_{1,i,j} + a_{2,i,j}) + a_{3,i,j} \cdot (k_{сеч_i} + 1)}; \quad (11)$$

$$\theta_{2,i,j} = \frac{\theta_{вет} \cdot b_{вет} \cdot (k_{сеч_i} + 1)}{\left(\frac{D_{реб_i}}{2} - \frac{D_{втул_i}}{2 \cdot \cos(\alpha_{1_i} - \alpha_{i,j})}\right)}; \quad (12)$$

$$\theta_{3_i} = \theta_{2_{i,m}}, \quad (13)$$

где $a_{1,i,j}$, $a_{2,i,j}$, $a_{3,i,j}$, α_{1_i} , $\alpha_{i,j}$ – коэффициенты, вычисляемые согласно работе [5];

$j = 1, \dots, m$, m – количество рассматриваемых сечений в зонах 1, 2;

$\theta_{вет}$ – объемное содержание волокон в ветви КМ.

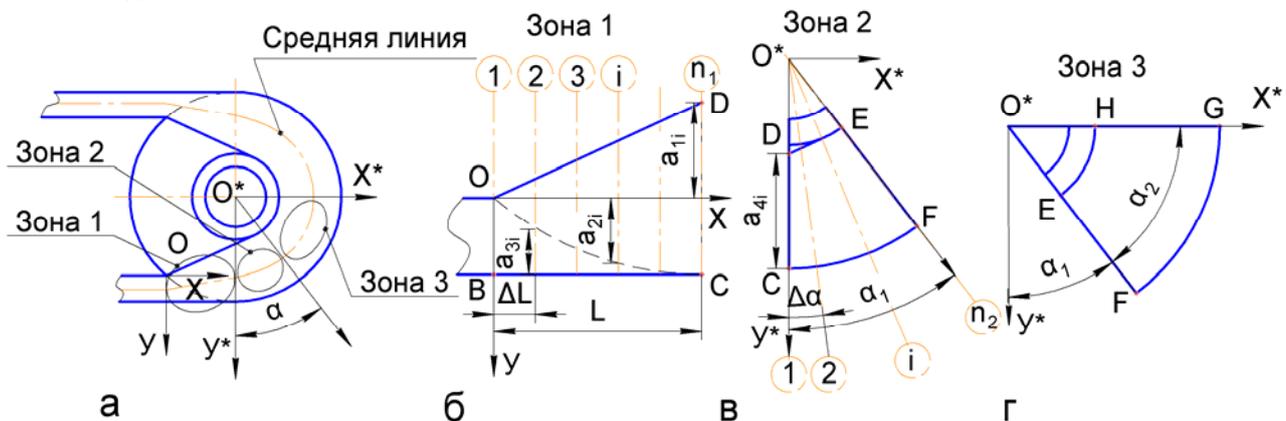


Рисунок 3 – Уплотнение волокон в рассматриваемых зонах

Изменение объемного содержания волокон в рассматриваемых зонах по координате x для нескольких вариантов оребренных втулок показано на рис. 4.

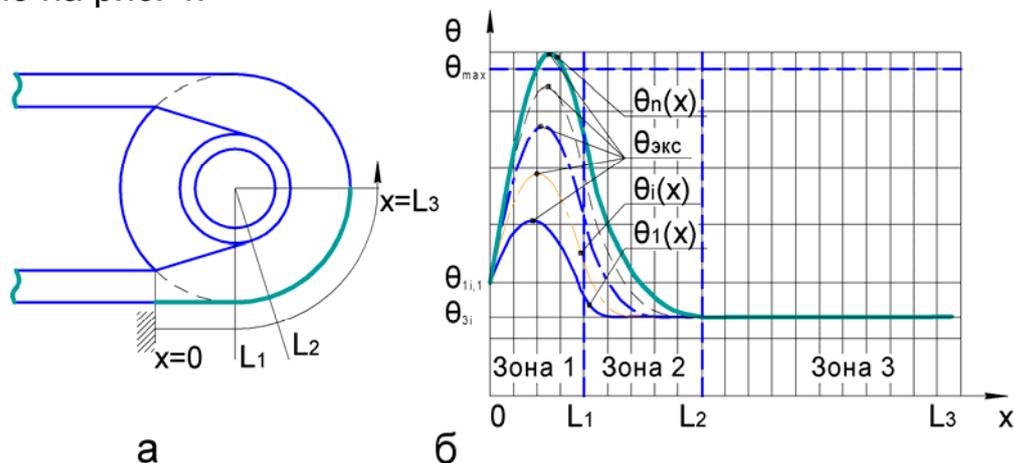


Рисунок 4 – Распределение объемного содержания волокон по координате x

Коэффициент работоспособности из условия склейки лепестков КМ с металлическими ребрами определяют по формуле

$$k_{скл_i} = \frac{N_{max}}{[\tau_{скл}] \cdot S_{скл_i}}. \quad (14)$$

Для каждого i -го варианта оребренной втулки расчет высоты металлического ребра и лепестка КМ выполняют по формулам

$$\delta_{\text{леп}_i} = \frac{H_{\text{вет}}}{n_{\text{ш}_i} \cdot (k_{\text{сеч}_i} + 1)}; \quad (15)$$

$$\delta_{\text{реб}_i} = k_{\text{сеч}_i} \cdot \delta_{\text{леп}_i}. \quad (16)$$

Расчет ребер втулки на разрыв выполняют по формуле (рис. 5)

$$\sigma_{\text{в.вм}_i} = \frac{N_{\text{max}}}{n_{\text{ш}_i} \cdot \delta_{\text{реб}_i} \cdot \left[D_{\text{реб}_i} + D_{\text{втул}_i} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \right]}. \quad (17)$$

Критические напряжения среза оребренной втулки рассчитывают по формуле (см. рис. 5)

$$\tau_{\text{в.вм}_i} = \frac{N_{\text{max}}}{n_{\text{ш}_i} \cdot \left[\delta_{\text{реб}_i} \cdot \sqrt{D_{\text{реб}_i}^2 - D_{\text{бол}}^2} + \delta_{\text{леп}_i} \cdot \sqrt{D_{\text{втул}_i}^2 - D_{\text{бол}}^2} \right]}. \quad (18)$$

Расчет напряжений смятия оребренной втулки выполняют по формуле (см. рис. 5)

$$\sigma_{\text{см.вм}_i} = \frac{2 \cdot N_{\text{max}}}{\pi \cdot D_{\text{бол}} \cdot H_{\text{втул}}}. \quad (19)$$

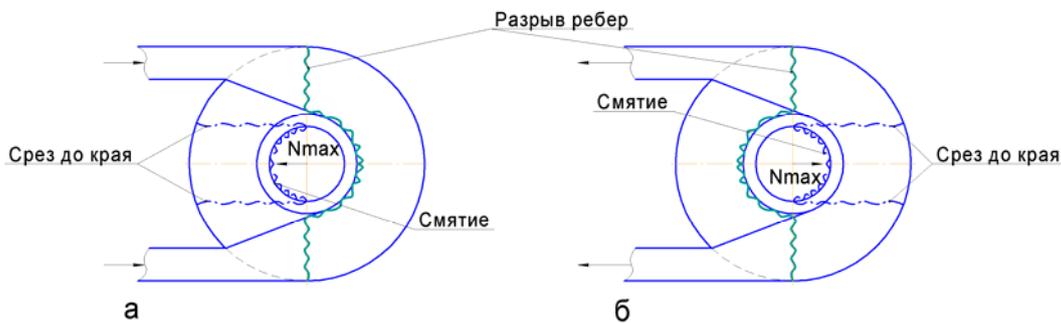


Рисунок 5 – Виды разрушений оребренной втулки:
а – сжатие ; б – растяжение

Тогда коэффициенты работоспособности из условий разрыва, среза ребер и смятия тела втулки рассчитывают по формулам

$$k_{\sigma_{\text{в}_i}} = \frac{\sigma_{\text{в.вм}_i}}{k_1 \cdot [\sigma_{\text{в.вм}}]}; \quad (20)$$

$$k_{\tau_{\text{в}_i}} = \frac{\tau_{\text{в.вм}_i}}{[\tau_{\text{в.вм}}]}; \quad (21)$$

$$k_{\sigma_{\text{см}_i}} = \frac{\sigma_{\text{см.вм}_i}}{\mu \cdot [\sigma_{\text{см.вм}}]}; \quad (22)$$

где k_1 – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжения по сечению проушины [4];

μ – коэффициент, зависящий от типа соединения [4];

$[\sigma_{\text{в.вм}}]$ – предел прочности материала втулки на разрыв;

$[\tau_{в.ст}]$ – предел прочности материала втулки на срез.

При обеспечении достаточного объемного содержания волокон в зоне 3 (см. рис. 3, г) в результате подбора наружного диаметра ребер возможен вариант обеднения КМ в зоне 1 (см. рис. 3, б), так как значение функции $\theta_1(x)$ может достичь своего предельного значения. Экстремум функции $\theta_1(x)$ рассчитываем по формуле

$$\theta_{экс_i} = \frac{\theta \cdot b_{вем} \cdot (k_{сеч_i} + 1)}{\frac{D_{реб_i} - 2 \cdot b_{вем} - \frac{D_{втул_i}}{\cos \alpha_{1i}}}{2 \cdot L_{1i} \cdot L_{2i}^{-1}} + b_{вем} + k_{сеч_i} \cdot \left[\frac{D_{реб_i}}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_{реб_i}}{2}\right)^2 - (L_{2i} - L_{1i})^2} \right]}. \quad (23)$$

В формуле (23) обозначено:

$$L_{2i} = L_{1i} + \frac{D_{реб_i} \cdot D_{втул_i} - \cos \alpha_{1i} \cdot D_{реб_i} \cdot (D_{реб_i} - 2 \cdot b_{вем})}{4 \cdot \sqrt{s_{1i} + \cos \alpha_{1i} \cdot D_{втул_i} \cdot (b_{вем} - 0,5 \cdot D_{реб_i}) + 0,25 \cdot D_{втул_i}^2}};$$

$$s_{1i} = \cos^2 \alpha_{1i} \cdot \left[L_{1i}^2 \cdot k_{сеч_i}^2 + (0,5 \cdot D_{реб_i} - b_{вем})^2 \right].$$

Введя ограничение на значение максимального объемного содержания волокон и определив значение $\theta_{экс_i}$, коэффициент работоспособности соединения рассчитываем по формуле

$$k_{\theta_i} = \frac{\theta_{экс_i}}{\theta_{max}}, \quad (24)$$

где θ_{max} – максимально допустимое объемное содержание волокон.

Для определения области реализации работоспособных соединений необходимо, чтобы коэффициенты работоспособности для i -х параметров удовлетворяли условию $\max(k_{\sigma_{в_i}}, k_{\tau_{в_i}}, k_{\sigma_{см_i}}) \leq 1$ (рис. 6). Граница допустимых значений объемного содержания волокон в КМ определяется условием $k_{\theta_i} \geq 1$ (рис. 6).

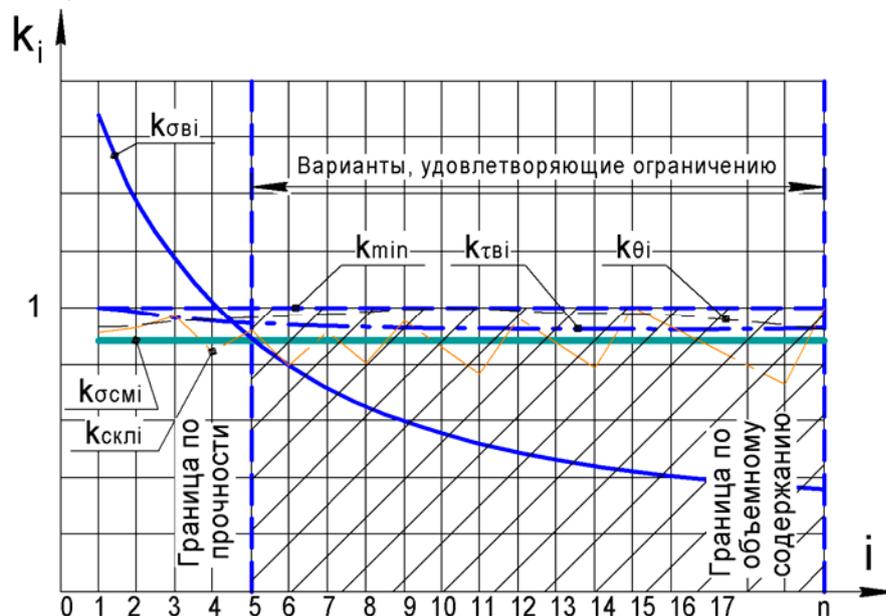


Рисунок 6 – Определение работоспособных вариантов

Оребренные втулки, параметры которых примыкают к границе прочности, являются наиболее близкими к равнопрочным и обладают наименьшей массой. Однако толщина ребер принимает относительно малые значения и их изготовление более трудоемко. Тонкие ребра обладают малой жесткостью и могут деформироваться, что обуславливает необходимость рихтовки для обеспечения устойчивой намотки. Оребренные втулки, параметры которых примыкают к границе допустимых значений объемного содержания, обладают повышенным запасом прочности на разрыв и более жесткими ребрами.

Массу i -й оребренной втулки рассчитывают по формуле

$$m_{втул_i} = \rho_{вм} \cdot \left[(D_{реб_i}^2 - D_{бол}^2) \cdot \frac{\pi \cdot n_{ш_i} \cdot \delta_{реб_i}}{4} + (D_{втул_i}^2 - D_{бол}^2) \cdot \frac{\pi \cdot n_{ш_i} \cdot \delta_{леп_i}}{4} \right], \quad (25)$$

где $\rho_{вм}$ – плотность материала втулки.

Таким образом, на основе синтеза алгоритма проектировочного расчета разработана методика определения основных конструктивных параметров модифицированного полупетлевого соединения, обеспечивающих регламентируемый коэффициент работоспособности и удовлетворяющих ограничениям по прочности с учетом конструктивно-технологических особенностей соединительного узла.

Список использованных источников

1. Композитная сетчатая геодезическая конструкция фюзеляжа пассажирского самолета [Текст] / В.В. Васильев, В.К. Всехвальнов, В.А. Никитюк, А.А. Пухов // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2001. – Вып. 11. – С. 22 – 25.
2. Проектирование углепластиковых нерегулярных сетчатых оболочек для ракетно-космической техники [Текст] / Ю.О. Бахвалов, С.А. Петроковский, В.П. Полиновский, А.Ф. Разин // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2009. – Вып. 8. – С. 3 – 8.
3. Карпов, Я.С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.
4. Шульженко, М.Н. Конструкция самолетов [Текст] / М.Н. Шульженко. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
5. Гуменников, В.В. Определение структурных параметров композита в модифицированном полупетлевом соединении [Текст] / В.В. Гуменников // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т. им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 56. – Х., 2012.

Поступила в редакцию 10.10.2012.

*Рецензент: канд. техн. наук, доц. А.В. Кондратьев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*