

УДК 629.73

Идеология проектирования авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов

Ендогур А.И., Кравцов В.А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,

Россия

e-mail: nio1@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена вопросам проектирования авиационных конструкций из композиционных материалов (КМ) и содержит проблемы, которые возникают при проектировании конструкций. При всех случаях нагружения конструкции в зоне стыка регулярной части (постоянной по составу пакета КМ) со смежной конструкцией, в слоях пакета КМ возникают объемные локальные концентрации напряжений растяжения-сжатия (смятия). В этом случае прочность конструкции будет, главным образом, зависеть от прочности связующего.

Ключевые слова: конструкция, композиционный материал, концентрация напряжений, соединения, проблемы

Существует мнение, что композиционный материал (КМ) – это «Новый материал, являющийся одновременно конструкцией». Это не совсем точно. Точнее: «Создана новая технология изготовления конструкций из волокнистого высокопрочного материала». А КМ – это один из материалов, которые, как говорят, сделал из обезьяны человека. Первый – камень, второй – палка, древесина.

Уже древние люди знали, что древесину легче всего разрушить ударом топора (клина) вдоль волокон, разрушив самое слабое звено – связующее. У КМ прочность связующего в 10-15 раз меньше прочности волокон. Случай локального разрушения связующего и является началом разрушения силовых конструкций из КМ.

Удельная прочность однонаправленного слоя полимерного КМ в 5,5...6 раз превышает удельную прочность конструктивных алюминиевых сплавов. Однако снизить во столько раз массу конструкции невозможно. Однонаправленных слоев КМ в авиационных силовых конструкциях 40...60%, допустимое напряжения на сжатие КМ в 1,5...2 раза меньше, еще дополнительный коэффициент безопасности 1,25. Итого, теоретический выигрыш в массе регулярной части силовой конструкции $\approx 33...35\%$

Регулярная часть конструкции из КМ сама по себе работать не может, её нужно привязать к смежной конструкции самолета, что осуществляется посредством крепежных элементов или клеевых соединений. Типовая конструкция разъемного соединения показана на рис. 1.

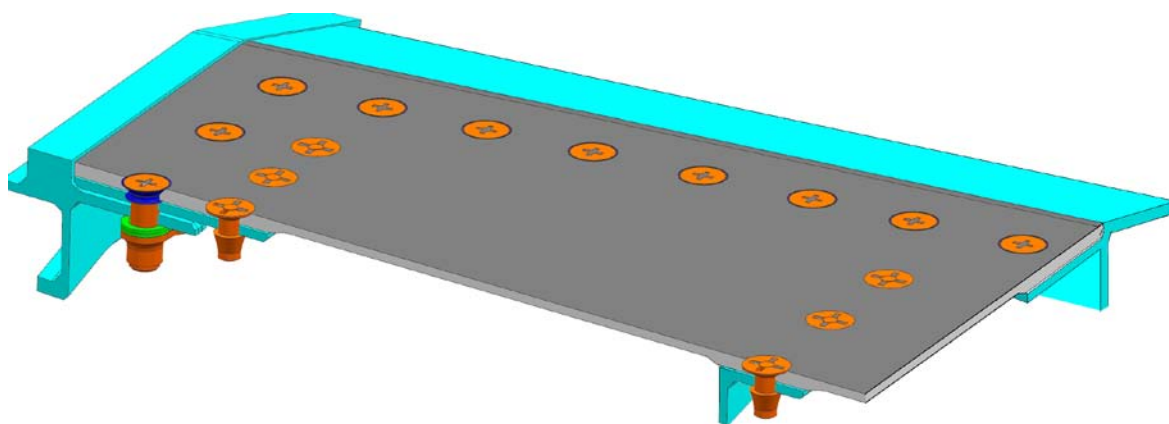


Рис. 1. Типовая конструкция разъемного соединения

При всех случаях нагружения конструкции в зоне стыка регулярной части (постоянной по составу пакета КМ) со смежной конструкцией возникают локальные концентрации напряжений, показанные на рис. 2. как сгущения линий тока напряжений растяжения-сжатия. Искривление линий тока (светлые треугольники вблизи отверстий) свидетельствует о появлении в слоях поперечных напряжений расщепления волокон, что может явиться причиной начала разрушения КМ, особенно при переменной нагрузке.

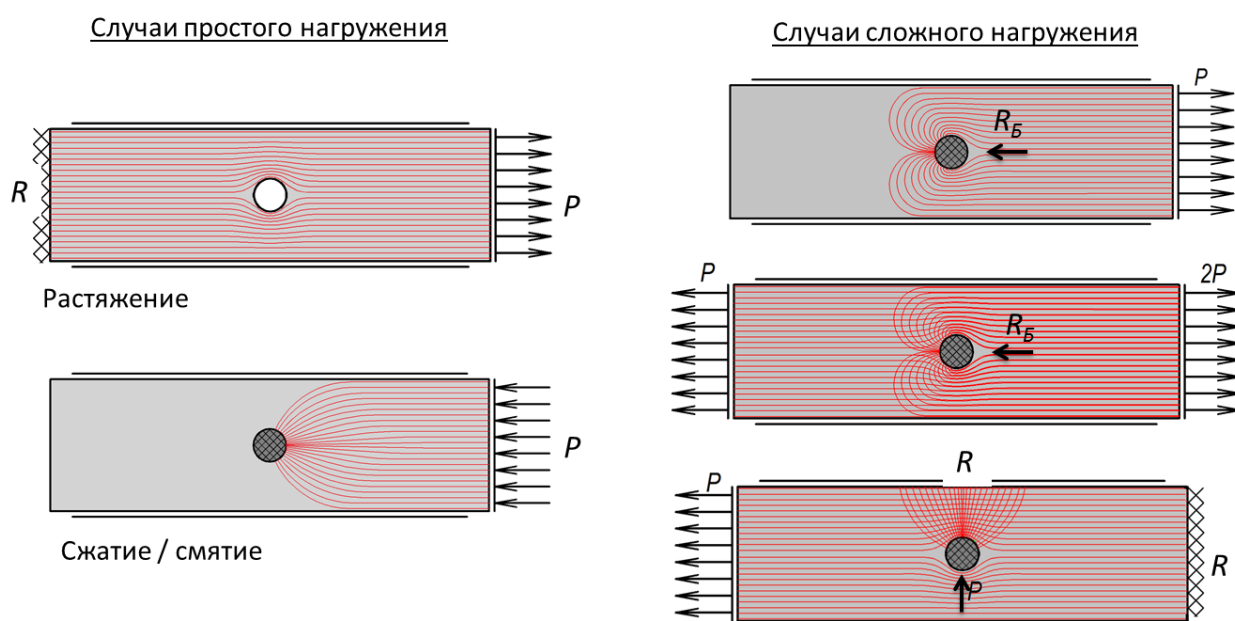


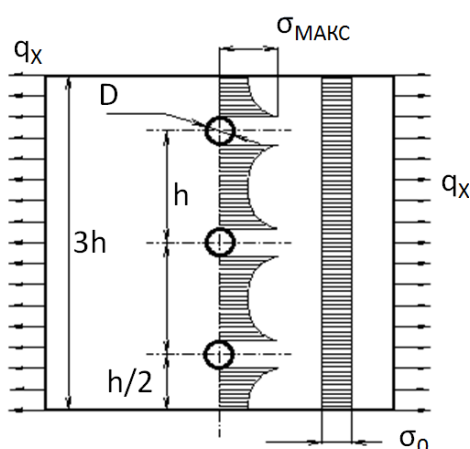
Рис. 2. Схемы силовых потоков

Причины появления концентрации напряжений в зоне крепежа различные.

Во-первых, потеря площади сечения из-за наличия отверстий, что требует увеличения толщины КМ в стыковой зоне в $1,2 \dots 1,33$ раза ($K_{\Gamma} = f(D/h) = 1,2 \dots 1,33$, рис. 3) для равнопрочности с регулярной частью.

Во-вторых, у отверстий в слоях КМ появляются локальные концентрации напряжений растяжения-сжатия $K_{0 \text{ КМ}} = 1,58 \dots 2,24$, зависящие от структуры КМ (табл. 1) и также приводящие к необходимости увеличения толщины КМ в стыке.

$K_{\Gamma} K_{0 \text{ КМ}}$ Таблица 1



Значения концентрации напряжений

Структура КМ, % $[0^0; \pm 45^0, 90^0]$	D/h		
	0,1	0,3	0,5
[80; 10; 10]	2,76	2,85	3,15
[50; 40; 10]	2,51	2,62	2,97
[10; 80; 10]	2,22	2,35	2,75

Рис.3. Концентрация напряжений
около отверстий

В-третьих – самое значимое – в зоне контакта появляются локальные напряжения смятия, нагружающие связующее и расщепляющие волокна КМ силой от крепежного элемента, рис. 4.

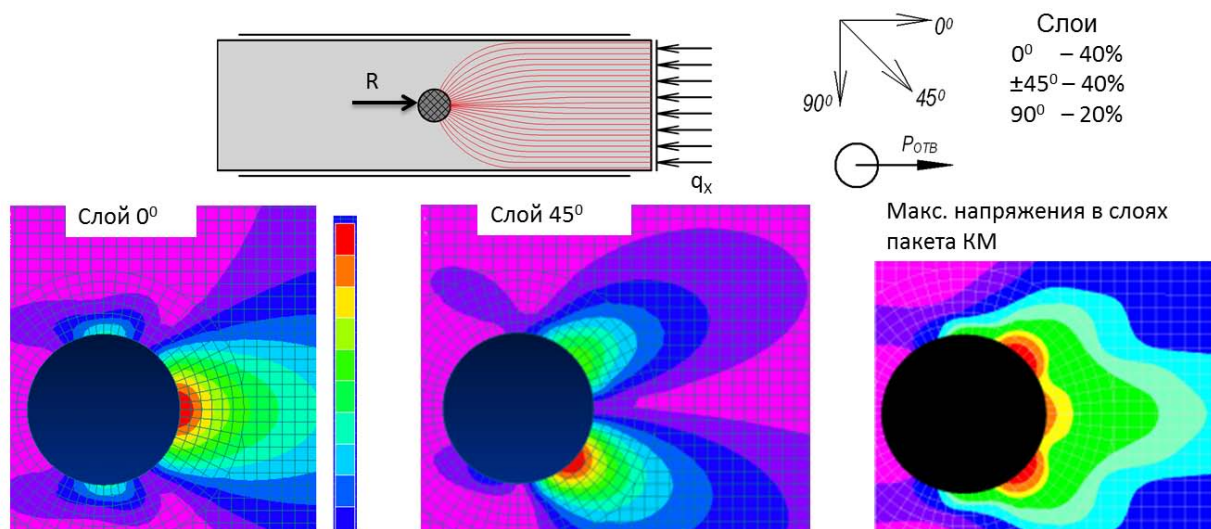


Рис. 4. Напряжения в слоях пакета от смятия под крепежом

Концентрация напряжений смятия $K_{СМ.КМ}$ обусловлена анизотропией КМ как по толщине пакета, так и в каждом слое в продольном (E_1) и поперечном (E_2) направлениях, табл. 2

Значения $K_{СМ.КМ}$ в зоне отверстия от анизотропии.

Таблица 2

Материал	Высокопрочный углепластик	Углепластик	Стеклопластик	Изотропный материал (металл)
E_1/E_2	180000/10000	125000/8000	35000/25000	(металл)
$K_{СМ.КМ}$	$2,1 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,1$	Не зависит от E

Связующее нагружается крепежом как в плоскости слоев, так и в поперечном направлении. Смятие связующего и расщепление слоев показано на рис. 5,а [Sun H.N., Grews Y.H.].

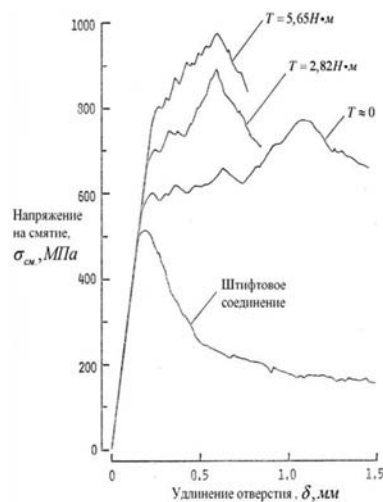
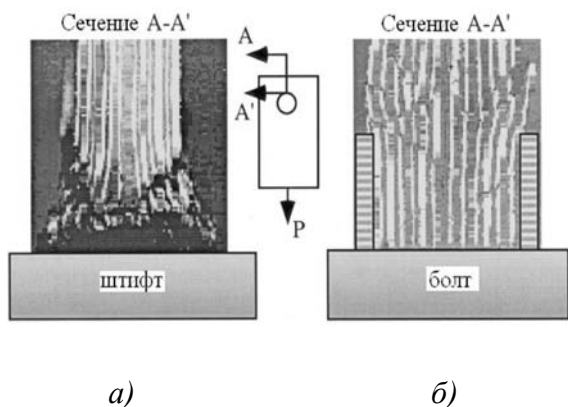


Рис.5. Характер разрушения КМ

при смятии:

а – разрушение связующего и расщепление КМ; б – сдвиг волокон при затяжке болтом; в – увеличение прочности при затяжке болтом.

в)

T – момент затяжки

Если слои КМ стянуть болтом (рис. 5,б), прочность соединения повышается в два раза (рис. 5,в). Однако, стяжка пакета КМ не всегда возможна. Кроме того, болты с головками, выходящими на аэродинамическую поверхность устанавливать нельзя.

Итак, первая проблема:

Возникновение объемной локальной концентрации напряжений в стыковых зонах и малая прочность связующего.

И первый вывод:

При любом виде нагрузки на регулярную часть конструкции, общая прочность конструкции из КМ будет зависеть от прочности связующего

Концентрация напряжений смятия в слоях КМ зависит от многих факторов: конструктивных, технологических, от свойств материала, от погрешностей в пределах допусков и от неконтролируемых дефектов.

На рис. 6 показано влияние изгибной жесткости болта и эксцентриситета нагружения на локальную концентрацию напряжений. Чем жестче болт, тем он тяжелее, но концентрация напряжений меньше.

$$K_{СМ.ЭКЦ}=1,05..1,15$$

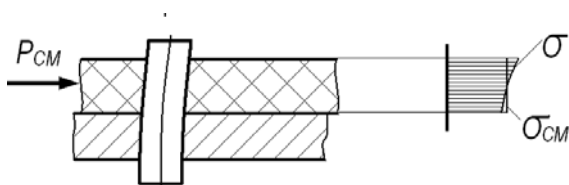


Рис.6. Влияние эксцентриситета на коэффициент концентрации

Схема, иллюстрирующая влияние посадки болта на локальную деформацию КМ показана на рис. 7.

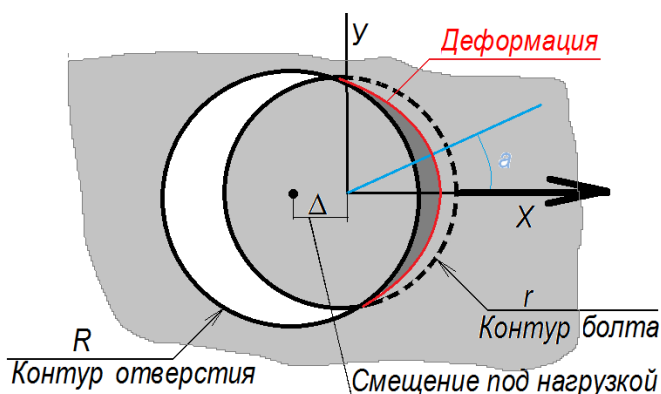


Рис.7. Деформация отверстия при нагружении болта

Зависимость $K_{\text{см.пос}} = 1,0 \dots 1,36$ от качества посадки болта приведена в табл. 3.

Зависимость коэффициента концентрации от качества посадки. Таблица 3

Диаметр болта-отверстия, [мм] (КВАЛИТЕТ)	6,015 (H7)	6,036 (H9)	6,15 (H12)	6,5 (разъемное)
Высокопрочный углепластик	1,009	1,024	1,086	1,271
Углепластик	1,011	1,025	1,106	1,316
Стеклопластик	1,02	1,038	1,139	1,363

Чем точнее посадка (больше стоимость изготовления), тем меньше концентрация.

Величину концентрации напряжений в перечисленных выше случаях можно определить теоретически или при помощи испытаний простых образцов. Типовой образец для испытаний, показан на рис. 8.

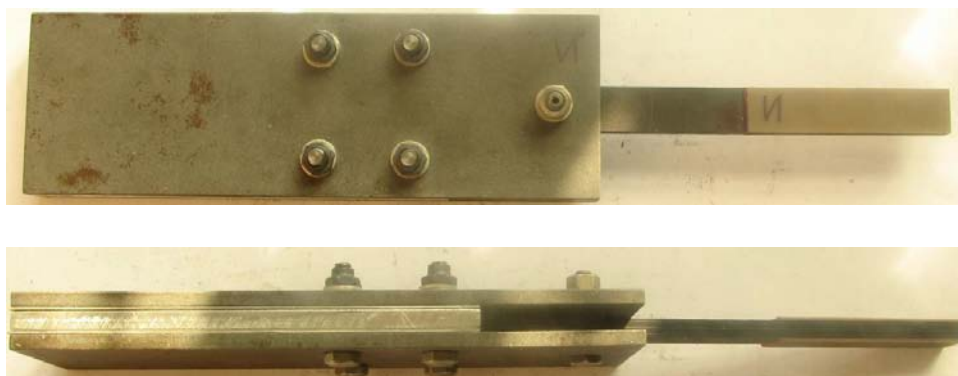


Рис.8. Типовой образец для испытаний

Есть и другие способы создания конструкции стыка: раздвижка волокон и установка втулок для болтов, клеевые соединения, – но и они не исключают появления локальных концентраций напряжений или неравномерного отрыва слоев КМ, разрушающих связующее.

Вторая проблема:

Как оценить влияние совместного действия локальных концентраций напряжений на прочность зоны стыка и конструкции в целом?

Теоретического ответа на этот вопрос пока не существует.

Уменьшение прочности в зоне крепежа оценивается величиной коэффициентов потери прочности $R_i = \sigma_{\text{МАКС}} / \sigma_{\text{ДОП}} = K \sigma_{\text{СЕЧЕНИЯ КМ}} / \sigma_{\text{ДОП}}$,

$$K_i = \sigma_{i \text{ МАКС}} / \sigma_{\text{СЕЧЕНИЯ КМ}}$$

R_0 – коэффициент потери прочности регулярной зоны при наличии отверстий

$R_{\text{СМ}}$ – коэффициент потери прочности пакета в отверстии от смятия КМ.

Тогда условие прочности конструкции описывается эмпирической формулой

$$R_0 + (R_{CM})^\alpha \leq 1$$

Значение $R_0 + (R_{CM})^\alpha > 1$ показывает, во сколько раз нужно увеличить толщину панели с зоне крепежа для равнопрочности с регулярной зоной конструкции (при $\sigma_{\text{сечения км}} = \sigma_{\text{доп}}$).

Эмпирическая формула увеличения толщины стыка панели имеет вид:

$$R_0 + (R_{CM})^\alpha = K_0 K_{0KM} + (K_{CM.пос} \cdot K_{CM.эксц} \cdot K_{CM.км})^\alpha = 3 \dots 6,$$

где $\alpha = 1/2 \dots 1/3$ – показатель степени, уточняемый по результатам испытаний конкретной конструкции, изготовленной по конкретной производственной технологии.

Фактическое увеличение толщины в зоне стыка зависит от количества рядов крепежа. При двухрядном шве толщина увеличивается соответственно в 1,5...3 раза, при трехрядном – в 1...2 раза. При этом необходим учет неравномерности нагружения рядов крепежа.

Влияние локальных концентраций напряжений можно уменьшить, снизив величину действующих напряжений в максимально нагруженных слоях пакета КМ, для чего необходимо увеличить толщину этих слоев в зоне стыка, что приводит к дополнительному увеличению массы конструкции.

Прочность конструкции можно увеличить, увеличив прочность связующего, например введением частиц наноматериала, но это увеличивает стоимость конструкции.

На графике рис. 9 приведена зависимость выигрыша в массе при замене конструкции стрингерных панелей из В95 на конструкцию из КМ от доли объема (площади) стыковых зон, отнесенной к общей площади панели.

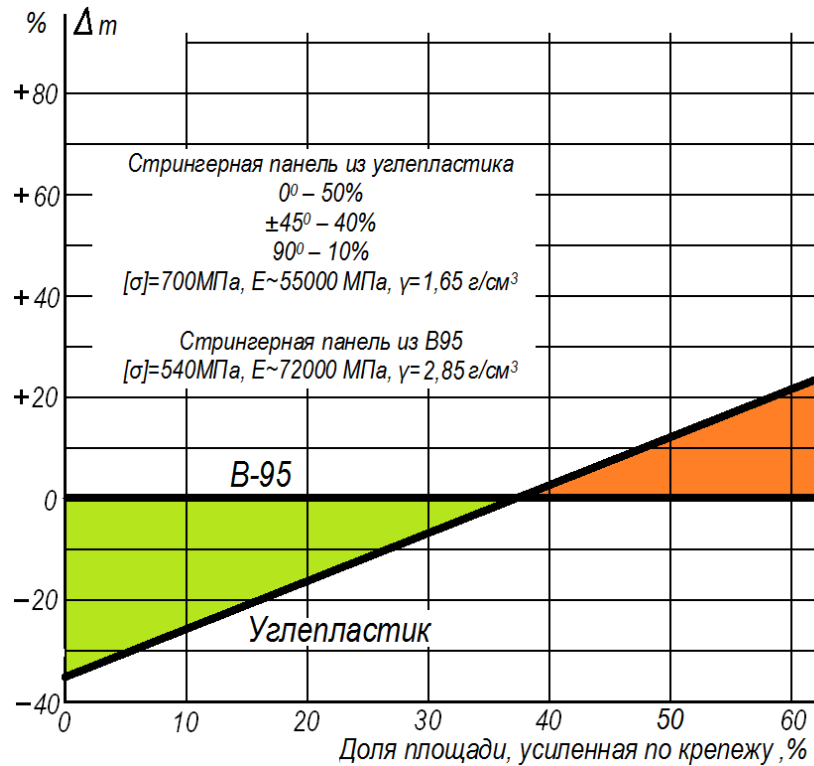


Рис. 9. Сравнение масс алюминиевой конструкции и конструкции из КМ

Видно, что при отсутствии стыков выигрыш в массе конструкции 35...37%. Существует значение доли площади зоны стыка, при достижении которого применение КМ по критерию минимума массы теряет смысл. При учете массы крепежа (болтов, заклепок) эта точка сдвигается влево до значения 15...20% площади. При этом средний выигрыш в массе силовых конструкции при применении КМ составляет 20...25%, что немало!

Второй вывод:

Целесообразность применения КМ в силовых конструкциях зависит от рациональной конструкции стыков и общего объема стыковых зон.

Поэтому, применение КМ в конструкции фюзеляжей, где много вырезов (окна, двери, люки), сложнее, чем в крыле.

Третья проблема:

Существует ли оптимальная силовая конструкция (стоек, панелей) из КМ?

Оптимальную конструкцию из КМ создала природа. Это конструкция костей человека и животных, показанная на рисунках 12 и 13.

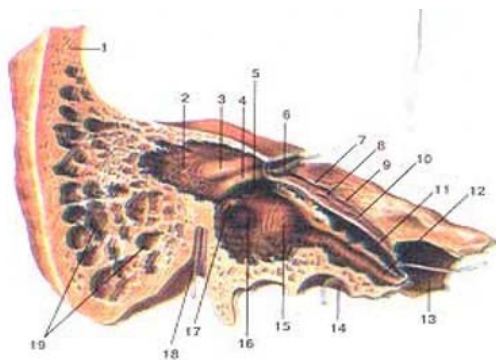


Рис. 12. Строение костей черепа

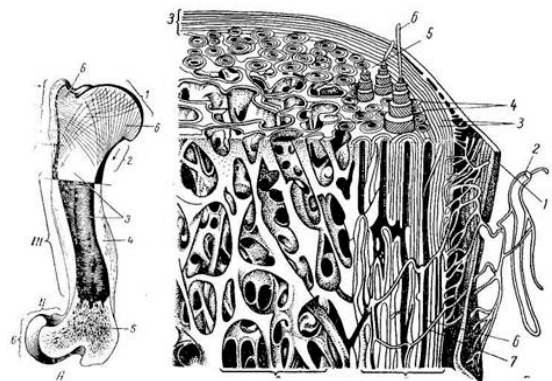


Рис. 13. Строение костей ног

В таких конструкциях прочность элементов губчатого связующего соответствует прочности несущих слоев, а запас прочности более 15 позволяет человеку существовать при форс-мажорных обстоятельствах.

С неподвижными стыками костей (череп) природа справилась довольно просто. А вот с подвижными соединениями (суставами) с точки

зрения их относительной массы и надежности, проблемы существуют даже у природы.

Третий вывод:

В оптимальной конструкции из КМ прочность связующего материала и его соединения с несущими слоями должна соответствовать прочности несущих слоев.

Такая конструкция может быть создана, например, выращиванием с использованием возможностей нанотехнологии.

Библиографический список

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.
2. Семин М. И., Стреляев Д. В. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность. - М.: ЛАТМЭС, 1996. - 287 с.
2. Sun H.T., Chang F.T., Qing X.L. The Response of Composite Joints with Bolt-Clamping Loads – Part 1 Model Dewelopment. J Comp Mater 2002; 36;69-92
4. Grews J.H. Bolt bearing fatigue of a grafite epoxy laminate. NASA Technical Memorandum, 1980.