

УДК 628.7

С.А. Филь, канд. техн. наук, В.В. Мерзлюк, канд. техн. наук,
Г.В. Неминский, М.Н. Сейдмуратов, М.В.Муштай

СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ НА ВЫРЫВ И СМЯТИЕ ВТУЛОК В ПАНЕЛЯХ ИЗ КМ

В современной авиации, как ни в одной другой отрасли техники, за исключением, быть может, космической, издержки на эксплуатацию массы конструкции являются очень существенными. Поэтому вопрос минимизации веса конструкции самолета является очень актуальным. Учитывая, что улучшение механических характеристик металлических сплавов практически исчерпывает себя, особое внимание уделяется применению новых материалов, в том числе и материалов из КМ, которые по своим прочностным и жесткостным характеристикам превосходят металлы. КМ очень дорогие и поэтому эффективность их использования в конструкции самолета напрямую зависит от оптимального выбора конструктором агрегатов, изготовление которых из КМ экономически обосновано.

Применение в конструкции элементов из КМ порождает новые проблемы, связанные с их соединением как между собой, так и с металлическими конструкциями. Этот вопрос – один из важных в проектировании конструкций с применением КМ. Соединения выполняют, по крайней мере, две функции фиксируют взаимное положение деталей и определяют характер их взаимодействия.

Соединения материалов из КМ может выполняться следующими путями:

- механический крепеж (использование болтов, заклепок или других крепежных элементов);
- крепления с помощью склеивания КМ;
- сваркой термопластичных материалов.

Первый путь – это практически механический перенос опыта накопленного при проектировании металлических конструкций. При этом конструкция детали из КМ значительно усложняется, так как необходимо обеспечить в зоне установки крепежа целостность волокон (конструктивное обеспечение места под крепеж). В противном случае, перерезая волокна, мы уменьшим несущую способность детали. В металлических конструкциях на организацию стыка приходится 15...25% увеличения массы по сравнению с регулярным сечением. При этом в соединениях, как правило, возникают примерно 80% разрушений. В соединениях из КМ при введении стыков увеличение веса составляет примерно 60...70%. При этом прочность механических соединений из КМ в 2-3 раза меньше, чем металлических.

Построение математической модели стыка из КМ очень сложно ввиду многопараметрической зависимости напряжений от различных

конструктивно-технологических факторов, которым можно отнести:

- отсутствие простой зависимости между прочностными характеристиками на смятие и растяжение;
- необходимость определения коэффициента податливости крепежного элемента;
- необходимость учета прочности КМ на межслойный сдвиг;
- реализуемость толщины клеевой прослойки;
- нелинейная диаграмма деформирования клеевого соединения [2] и т.д.

Поэтому получение этих данных приводит к необходимости проведения больших объемов экспериментальных работ. Соединяя детали из КМ с помощью клея или сварки, получаем неразъемные соединения, что не всегда приемлемо.

При этом отметим, что склеивание высоконагруженных деталей, хотя теоретически возможно, но его трудно реализовать в условиях серийного производства из-за исключительно высоких требований к параметрам и качеству выполнения операций технологического процесса, из-за отсутствия надежных методов неразрушающего контроля. Кроме того, известно, что клеевые соединения могут передавать силовые потоки небольшой интенсивности (до 15 кН/см) [1] и существует проблема деструкции клея в процессе длительной эксплуатации. Существует также проблема выполнения ремонта в эксплуатации [1].

Поэтому в практике для получения достоверных прочностных характеристик соединений материалов из КМ проводят, как правило, испытания определенного типа соединений, применяемых разработчиком в элементах своих интерьеров, и тем самым определяют его несущую способность.

Необходимость сборки агрегатов интерьера вне самолета, а также выполнение требований технологичности, ремонтпригодности вынуждает конструкторов вводить стыки в модульных конструкциях буфетов, багажных полок, гардеробов.

Для соединений между собой деталей интерьера, пассажирского и бытового оборудования с помощью механического крепежа используются, как правило, переходные детали (уголки, фитинги и т.д.), которые крепятся к панелям из КМ механическим крепежом. При этом в панелях из КМ устанавливаются специальные втулки под крепеж.

Изготовление, установка втулок в детали агрегатов, последующий их монтаж влияют на технологичность и время сборки агрегатов интерьера. Например, количество втулок в конструкции буфетов самолета Ан-148-100 составляет: 626 втулок в переднем буфете и 464 втулки в заднем буфете. Это требует проведения оптимизации, связанной с минимизацией количества втулок при сохранении требований прочности и технологичности, а также поиска наиболее рационального, в смысле обеспечения статической прочности, варианта установки втулок.

В настоящей работе рассматриваются различные варианты установки втулок в трехслойные панели из КМ. Для оценки несущей способности по вырыву втулок из панелей из КМ и смятия панели под втулкой были проведены статические испытания для различных вариантов установки втулок в трехслойных панелях из КМ толщиной 11 и 21 мм. С этой целью были разработаны и изготовлены образцы трехслойных панелей из КМ, а для проведения испытаний – специальные приспособления.

Трехслойные панели были изготовлены по двум технологиям:

1) клеевая (обшивки из двух слоев ткани Т10-14 на связующем 5-211БН соединялись с полимерным сотовым наполнителем ПСП1-2,5-48 с помощью клея ВК-46);

2) бесклеевая (обшивки из двух слоев ткани Т10-14 на связующем ФП-520 и полимерный сотовый наполнитель ПСП1-2,5-48 по бесклеевой технологии (клеевой слой заменен прокладкой из препрега Т-15(П)-76/ФП-520)) (рис. 1).

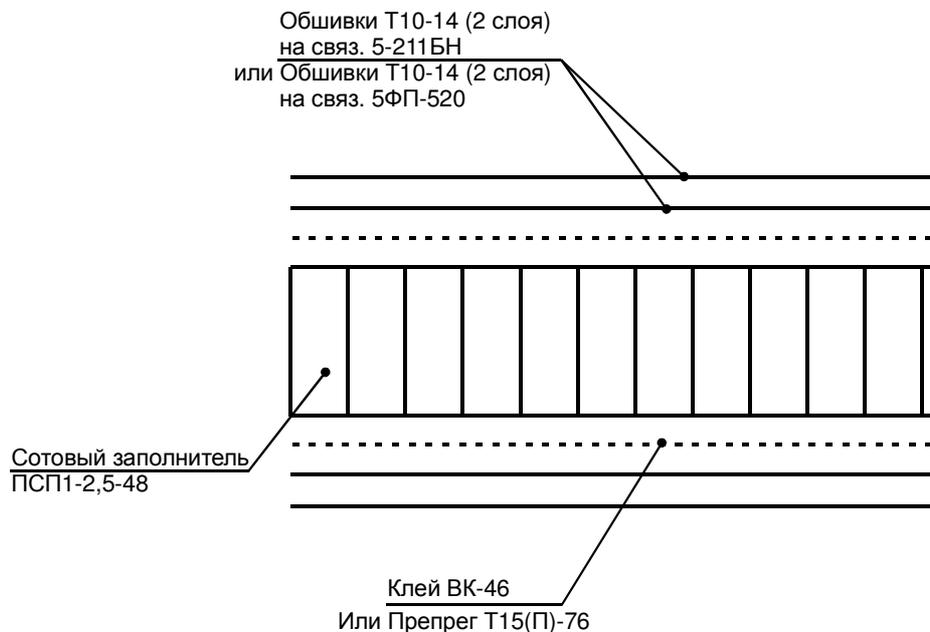


Рисунок 1

Установка втулок в образцах из КМ толщиной 11 и 21 мм выполнялась по следующим шести вариантам (рис. 2).

Для испытаний на вырыв были изготовлены образцы $\varnothing 60$ мм по 5 штук для каждого варианта установки втулок на каждую технологию изготовления трехслойных панелей, а для испытаний на смятие изготавливались образцы с размерами 70x300 мм, в которых устанавливались по 5 втулок. Для каждого варианта установки втулок и на каждую технологию изготовления трехслойных панелей изготовлено по одному такому образцу.

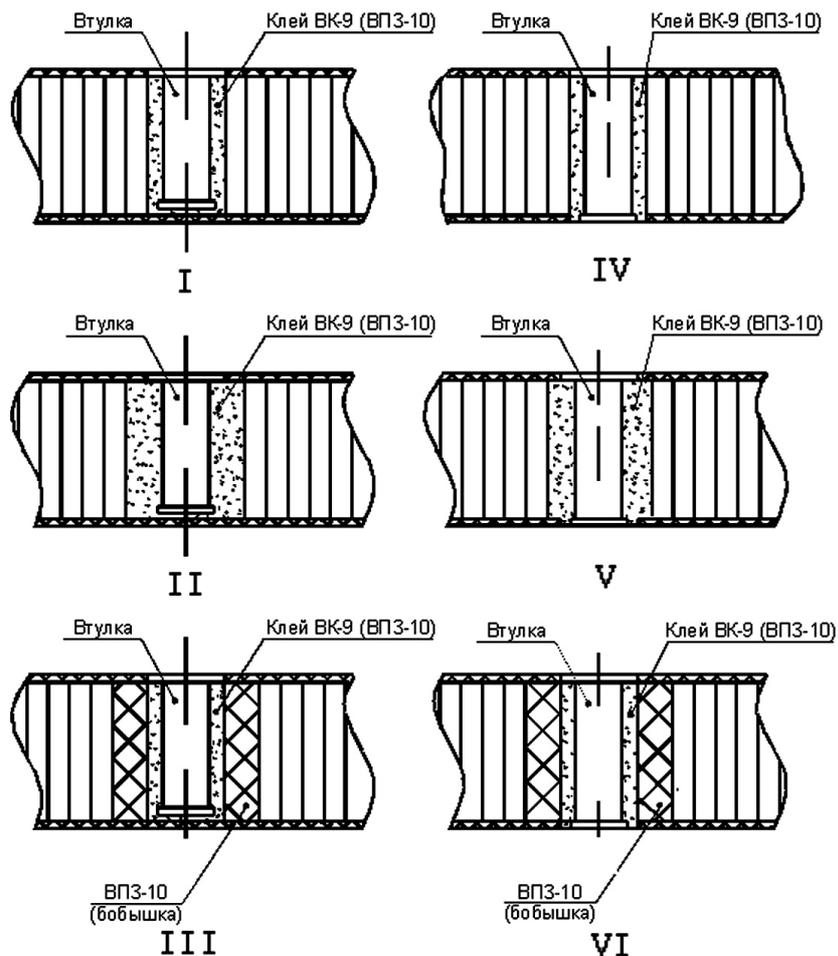


Рисунок 2

I – А) в предварительно вскрытое до противоположной обшивки отверстие по центру образца на клею ВК-9 устанавливается втулка АНУ 7979.007.005;

– В) в предварительно вскрытое до противоположной обшивки отверстие по центру образца на пасте ВПЗ-10 устанавливается втулка АНУ 7979.007.005.

II – А) в предварительно вскрытое до противоположной обшивки по центру образца отверстие, через которое удалили часть сотового заполнителя, на клею ВК-9 устанавливается втулка АНУ 7979.007.005;

– В) в предварительно вскрытое до противоположной обшивки по центру образца отверстие, через которое удалили часть сотового заполнителя, на пасте ВПЗ-10 устанавливается втулка АНУ 7979.007.005.

III – А) в предварительно вскрытое до противоположной обшивки по центру образца отверстие, где установлен вкладыш из пасты ВПЗ-10 (20x20мм), на клею ВК-9 устанавливается втулка АНУ 7979.007.005;

– В) в предварительно вскрытое до противоположной обшивки по

центру образца отверстие, где установлен вкладыш из пасты ВПЗ-10 (20x20мм), на пасте ВПЗ-10 устанавливается втулка АНУ 7979.007.005.

IV – А) в предварительно вскрытое сквозное отверстие по центру образца, где установлен вкладыш из пасты ВПЗ-10 (20x20мм), на клею ВК-9 устанавливается втулка 20-01-ОСТ1 11149-73;

– В) в предварительно вскрытое сквозное отверстие по центру образца, где установлен вкладыш из пасты ВПЗ-10 (20x20мм), на пасте ВПЗ-10 устанавливается втулка 20-01-ОСТ1 11149-73.

V – А) в предварительно вскрытое по центру образца сквозное отверстие, через которое удалили часть сотового заполнителя, на клею ВК-9 устанавливается втулка 20-01-ОСТ1 11149-73;

– В) в предварительно вскрытое по центру образца сквозное отверстие по центру образца на пасте ВПЗ-10 устанавливается втулка АНУ 7979.007.005.

VI – А) в предварительно вскрытое по центру образца сквозное отверстие по установленному вкладышу из пасты ВПЗ-10 (20x20мм) на клею ВК-9 устанавливается втулка 20-01-ОСТ1 11149-73.

Испытания проводились в специально разработанных приспособлениях в испытательной машине 1231У-10.

Результаты статистической обработки результатов испытаний на вырыв и смятие трехслойной панели из КМ толщиной 11 мм приведены в таблице, а характер разрушения образцов после испытаний на вырыв втулок и смятие панелей под втулкой – на рис. 3.

Как известно, при статистической обработке результатов испытаний образцов обычно используют распределение Вейбулла, но ввиду того, что для каждого уровня нагрузок при испытаниях было испытано ограниченное количество образцов (5 штук), при обработке использовано распределение Стьюдента. Выборочное среднее квадратичное отклонение S долговечности определялось по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i - N_i \right]^2}.$$

Ширина доверительного интервала определяется так:

$$\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n N_i \right) - \frac{S}{\sqrt{n}} t \leq \bar{\alpha} \leq \frac{S}{\sqrt{n}} t + \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n N_i \right),$$

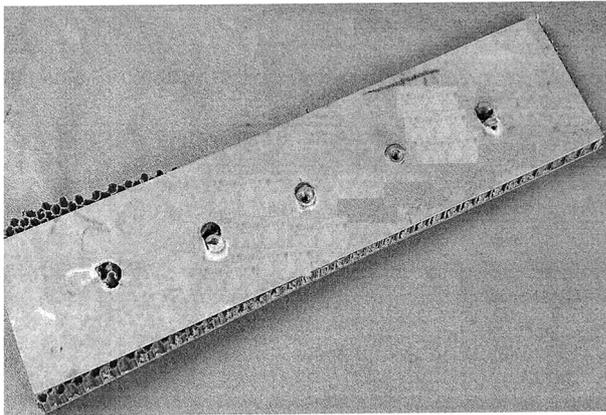
где $t = 2,766$ при количестве образцов на точку 5 штук и доверительной вероятности 0,95.

Представленные в таблице результаты испытаний для панелей толщиной 10 мм показывают, что применение бесклеевой технологии изготовления трехслойных панелей приводит, по сравнению с клеевой технологией, к повышению усилий:

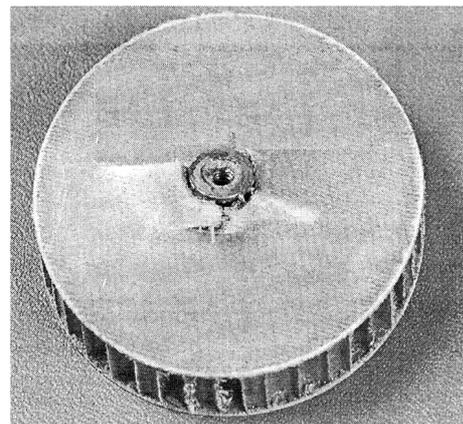
вырыва втулок в:	- смятия панели под втулкой в:
-1,6 раза для соединений I A; -1,31 раза для соединений I B; -1,27 раза для соединений II A; -1,56 раза для соединений II B; - 1,18 раза для соединений III A; - 1.03 раза для соединений I I I B;	- 1,44 раза для соединений I A; - 2,0 раза для соединений I B; - 1,91 раза для соединений II A; - 1,4 раза для соединений II B; - 1,7 раза для соединений III A; - 1,03 раза для соединений III B; - 2,18 раза для соединений IV A; - 1,09 раза для соединений IV B; - 1,35 раза для соединений V A; - 1,17 раза для соединений V A.

Тип соединения		Тип испытания	S	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$	$\alpha = 95$	Технология
I	A	вырыв	59,2	749	675 <X< 823	Клеевая
		срез	202	1866	1664 <X< 2068	
	B	вырыв	67,2	790	704 <X< 872	
		срез	96,4	1280	1183 <X< 1376	
	A	вырыв	130	1196	1035 <X< 1357	Бесклеевая
		срез	472	2678	2206 <X< 3150	
B		вырыв	146	1036	854 <X< 1218	
		срез	171	2632	2632 <X< 2823	
II	A	вырыв	75	786	711 <X< 861	Клеевая
		срез	225	2830	2605 <X< 3055	
	B	вырыв	226	737	511 <X< 963	
		срез	260	2376	2116 <X< 2636	
	A	вырыв	209	1004	795 <X< 1213	Бесклеевая
		срез	797	5417	4620 <X< 6213	
B		вырыв	146	1150	1004 <X< 1296	
		срез	666	3890	3224 <X< 4556	
III	A	вырыв	40	1060	1020 <X<1080	Клеевая
		срез	368	2924	2556 <X< 3292	
	B	вырыв	118	960	842 <X< 1078	
		срез	609	3548	2939 <X< 4157	
	A	вырыв	185	1250	1065 <X< 1435	Бесклеевая
		срез	729	5033	4304 <X< 5762	
B		вырыв	76	990	914 <X< 1066	
		срез	406	3650	3244 <X< 4056	
IV	A	срез	220	1750	1476 <X< 2024	Клеевая
	B	срез	259	1576	1253 <X< 1898	
	A	срез	220	3825	1600 <X< 6049	Бесклеевая

	B	срез	248	1722	1354<X< 2089	
V	A	срез	384	2954	2477<X< 3431	Клеевая
	B	срез	396	2596	2104<X< 3089	
	A	срез	144	3983	3625<X< 4342	Бесклеевая
	B	срез	148	3030	1188<X<4872	
VI	A	срез	151	2608	2420<X<2796	Клеевая



Характер смятия трехслойной панели под втулкой



Характер разрушения трехслойной панели при вырыве втулки

Рисунок 3

Испытания на смятие под сквозной втулкой для исполнений VI проводилось только для исполнения VIA.

Аналогичные результаты получены и при испытании панелей толщиной 21 мм (см. диаграмму на рис. 4).

Повышение статической прочности на вырыв и смятие панели под втулкой обусловлено увеличением толщины обшивки за счет введения дополнительного слоя стеклоткани Т15(П), используемой для приклеивания обшивки к вкладышам из ВПЗ и сотам.

Кроме указанных выше типов крепления возможно крепление непосредственно к торцевым поверхностям трехслойных панелей из КМ, в которых втулки устанавливаются непосредственно в заливку из пасты ВПЗ-10.

Для оценки прочности крепления втулки в заливке из ВПЗ можно воспользоваться результатами эксперимента III. Кроме того, необходимо рассмотреть вопрос прочности крепления заливки из ВПЗ к обшивке трехслойной панели. Заливка, в которую устанавливаются втулки для соединения панелей из КМ, имеет, как правило, размер в плане 20*20 мм и склеивается с обшивкой трехслойной панели с помощью клея. Для оценки несущей способности такого крепления рассмотрим задачу о распределении напряжений в элементах стыка (обшивка – I, ВПЗ – II и слой клея – III), показанного на рис.5.

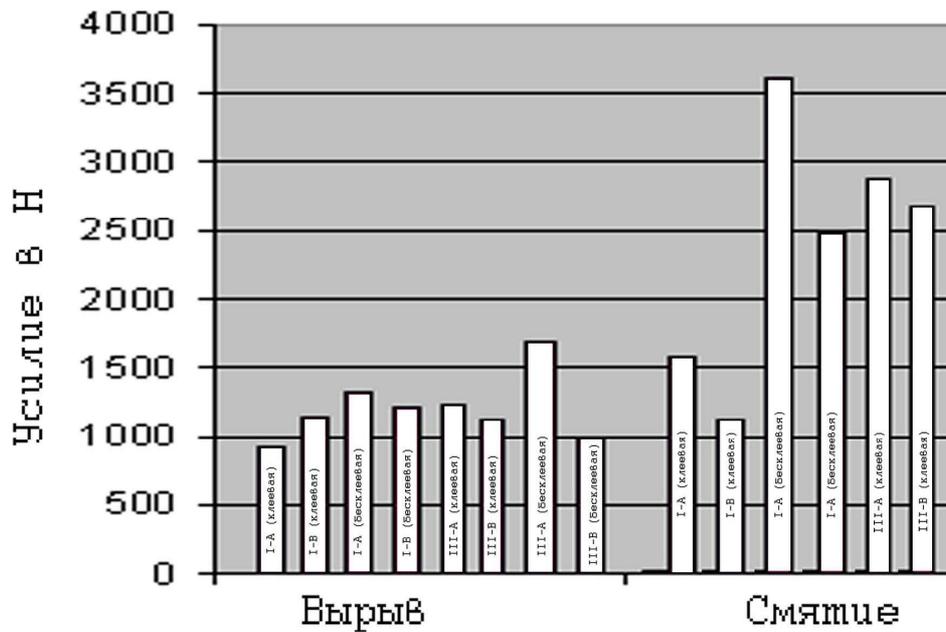


Рисунок 4

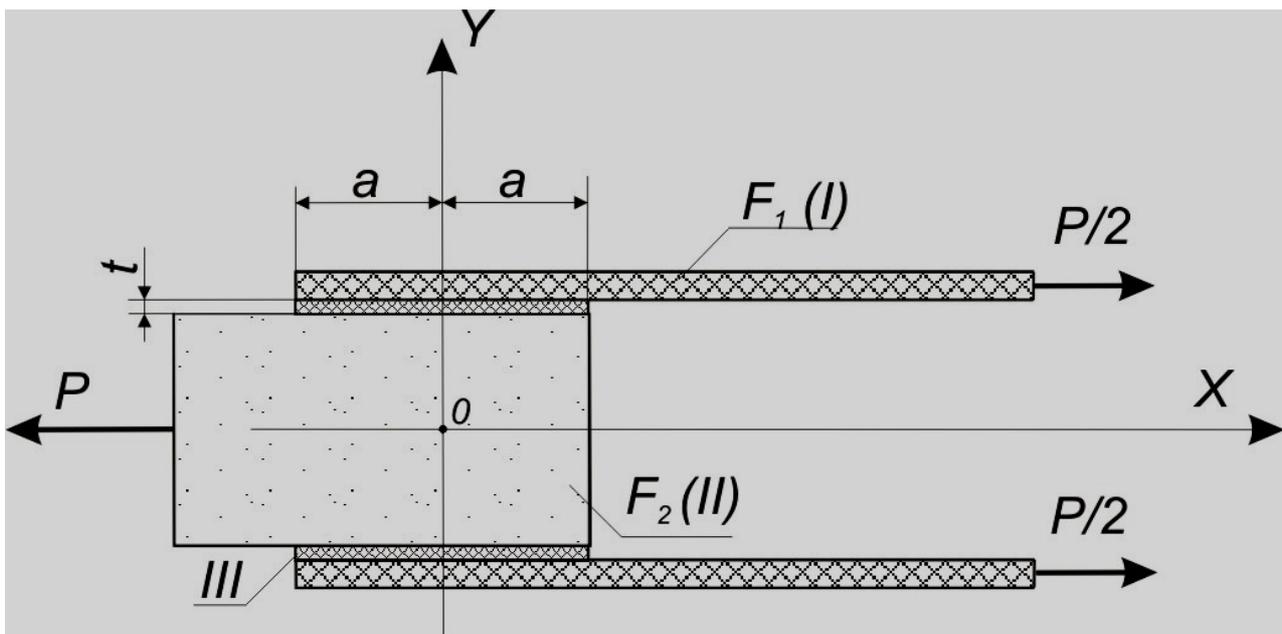


Рисунок 5

Обшивка состоит из трех слоев стеклоткани: два слоя Т10-14 (укладка $0^0/90^0$) и одного слоя Т15П (укладка 0^0). Модуль упругости обшивки вдоль действия усилия $E = 24,9$ ГПа определялся по программе «Композит» разработки ЦАГИ.

Если принять, что клеевой слой имеет упругую диаграмму деформирования, то задача определения напряженного состояния в клеевом слое сводится к линейному дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами [2]:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \lambda^2\tau = 0, \text{ где } \lambda^2 = \frac{G(1+\Delta)b}{tE_{II}F_{II}}, \Delta = \frac{E_{II}F_{II}}{E_1F_1}.$$

Интегрируя это выражение, получаем аналитическое выражение для распределения касательных напряжений в клеевом слое в виде

$$\tau(x) = C_1 e^{\lambda x} - C_2 e^{-\lambda x},$$

а распределение нормальных напряжений в элементах стыка в виде

$$\sigma_{xm} = (-1)^m \frac{b}{\lambda F_m} (C_1 \exp(\lambda x) - C_2 \exp(-\lambda x)) + \frac{P_m}{F_m(1+\Delta)}, \text{ где } m = 1, 2.$$

Константы $C_1 = \frac{\lambda [P(\Delta \exp(\lambda R) + \exp(-\lambda R))]}{b(1+\Delta)(\exp(-2\lambda R) - \exp(2\lambda R))}$ и

$$C_2 = \frac{\lambda [P(\exp(\lambda R) + \Delta \exp(-\lambda R))]}{b(1+\Delta)(\exp(-2\lambda R) - \exp(2\lambda R))}$$

определяются из граничных

условий (напряжения $\sigma_x = 0$ в элементе I при $x = -a$ и $\sigma_x = 0$ при $x = a$ в элементе II).

Касательные напряжения в клеевом слое и напряжения в соединяемой детали зависят от механических характеристик соединяемых элементов и величины модуля сдвига клея. На рис. 6 показано изменение касательных напряжений в клеевом слое и продольных нормальных напряжений в элементе I для трех значений величины модуля сдвига клея $G = 50$ МПа (I, II), $G = 500$ МПа (III, IV) $G = 1000$ МПа (V, VI) при значении для материала II модуля упругости $E = 600$ МПа и для модуля сдвига клея $G = 1000$ МПа при значении для материала II модуля упругости $E = 3730$ МПа (VII, VIII).

Из рис. 6, видно, что распределение напряжений по длине стыка неравномерно. В случае $\Delta \approx 1$ (эпюры 1,3,5), когда величины жесткостей соединяемых деталей равны, величины касательных напряжений достигают экстремальных значений у краев стыка.

При увеличении жесткости элемента I величина касательного напряжения в слое клея достигают экстремальных значений у левого края стыка, а при увеличении жесткости элемента II (см. эпюру 7) величина касательного напряжения в слое клея достигает экстремальных значений у правого края стыка. Эпюры распределения напряжений в обшивке по размаху стыка при одной и той же величине модуля сдвига клея также зависят от соотношения жесткостей соединяемых элементов (см. эпюры 6 и 8). Кроме того увеличение величины модуля сдвига клея приводит к увеличению градиента напряжений у краев стыка.

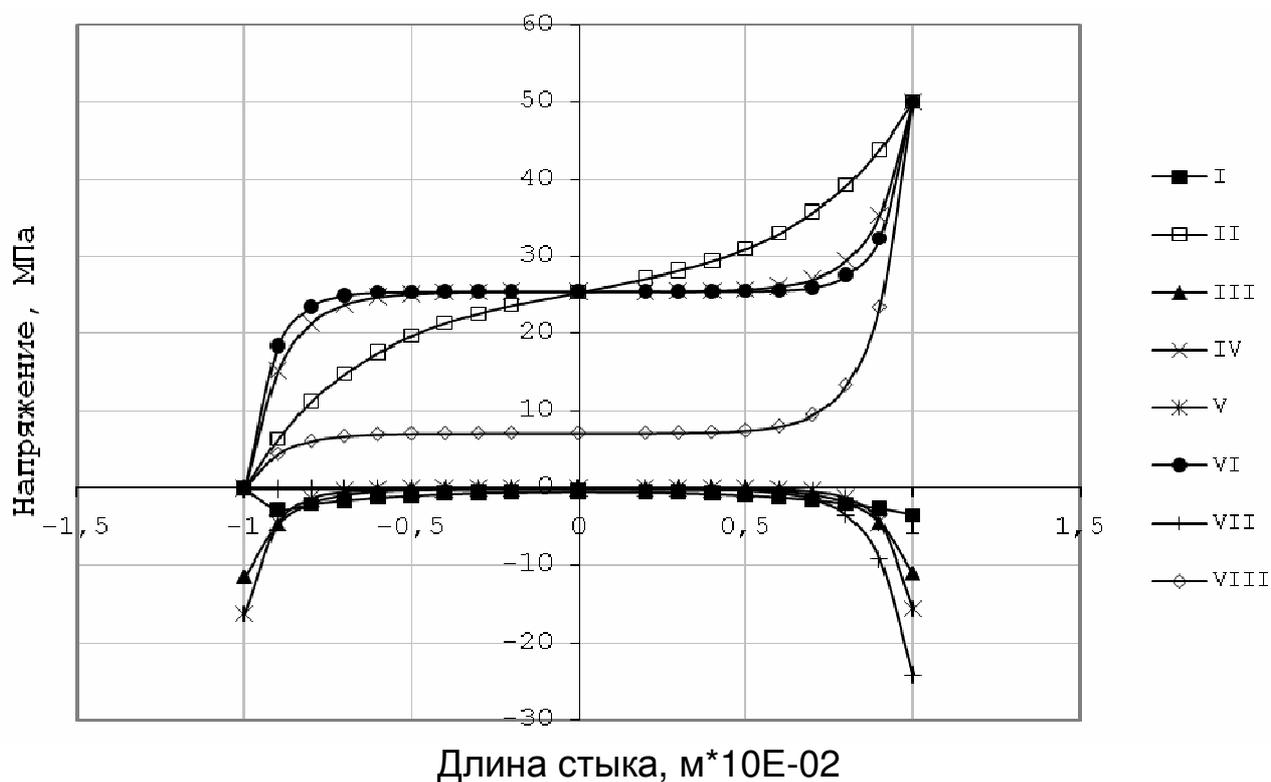


Рисунок 6

Была разработана конечно-элементная модель клеевого стыка (см. рис. 7), в которой клеевой слой III соединялся с обшивкой I и заливкой II с помощью жестких стержней. Было рассмотрено три варианта модели, в которых жесткость элемента обшивки I соответствовала жесткости обшивки модели рис.4, а модуль упругости элемента II принимался равным 100 МПа, 600 МПа, 3730 МПа. Характер изменения перерезывающих сил в стержнях приведен на рис. 7 и подтверждает результаты, полученные аналитическим расчетом.

Так как реальная загрузка заливки из ВПЗ происходит через металлическую втулку, то распределение напряжений между обшивкой трехслойной панели и заливкой под установку втулки, будет несколько иным, что вызвано сложной картиной передачи нагрузки от втулки к вкладышу из ВПЗ и от вкладыша на обшивку. Для получения картины распределения нормальных напряжений в обшивке из КМ и касательных напряжений в клеевом слое использовался конечно-элементный численный программный комплекс NASTRAN. Была разработана упрощенная модель нагружения соединения, состоящая из обшивки из КМ, вкладыша 20x20x20 из ВПЗ-1 и прослойки клея между обшивкой и вкладышем из ВПЗ-1 (см. рис. 8). Результаты расчета показывают, что изменение нормальных напряжений в обшивке по длине стыка плавное (близкое к линейному), что вызвано включением в работу массива из ВПЗ.

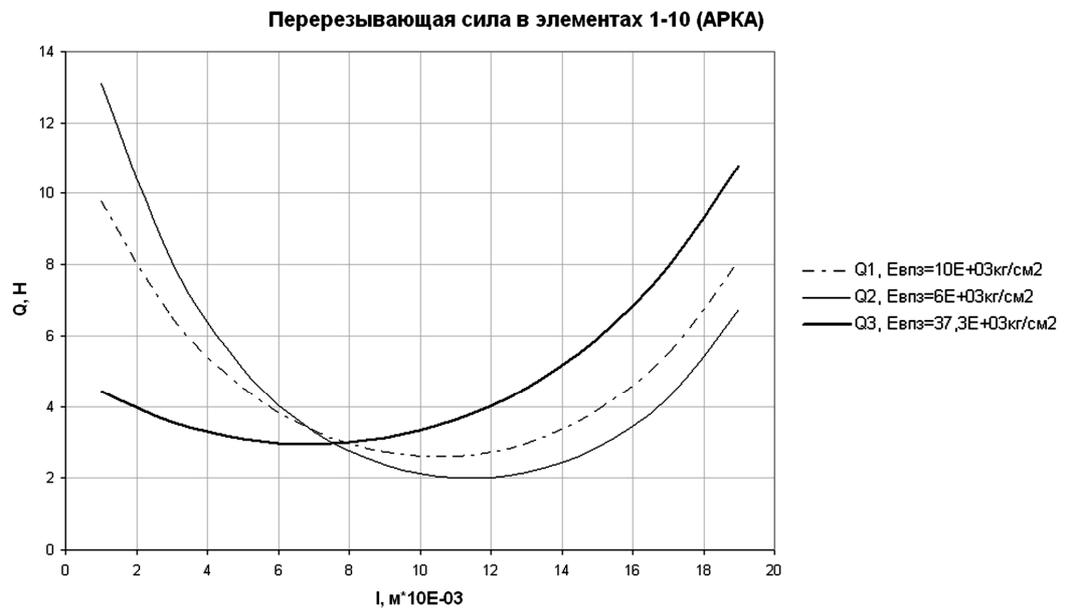
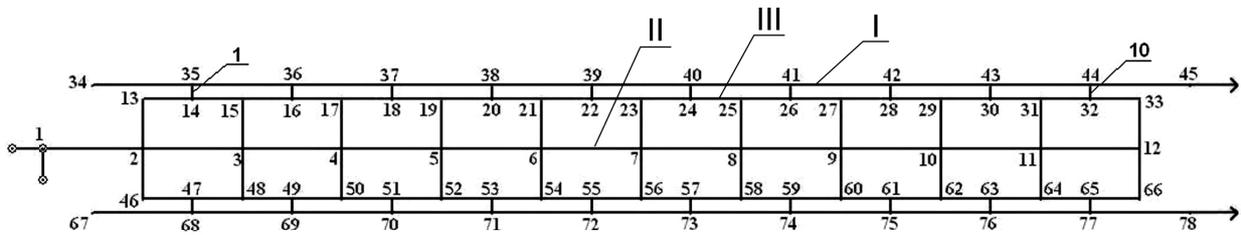


Рисунок 7

При этом максимальные значения нормальных напряжений принимают по продольной оси клевого стыка. Учитывая, что стык симметричен, а величина передаваемого стыком усилия равна 1000 Н, через одну плоскость стыка передается половина усилия, т.е. 500 Н.

Распределение нормальных напряжений по длине стыка плавное, это позволяет предположить, что такое включение в работу конструкции системы «втулка-ВПЗ» обеспечивает распределение касательных усилий под длине стыка близкое к равномерному (т.е. $\tau = P / F = 1,25\text{МПа} < [\tau]$).

Поэтому несущая способность соединения определится усилием вырыва втулки из вкладыша из ВПЗ и в зависимости от технологии установки составит 700...1000 Н. При этом в соответствии с требованиями авиационных Норм и Правил (например АП 25) при выполнении расчетов на прочность к экспериментальным данным необходимо применять дополнительный коэффициент безопасности, учитывающий воздействие климатических условий, технологические факторы, стабильность характеристик исходных материалов, наличие концентраторов напряжений и т.д.

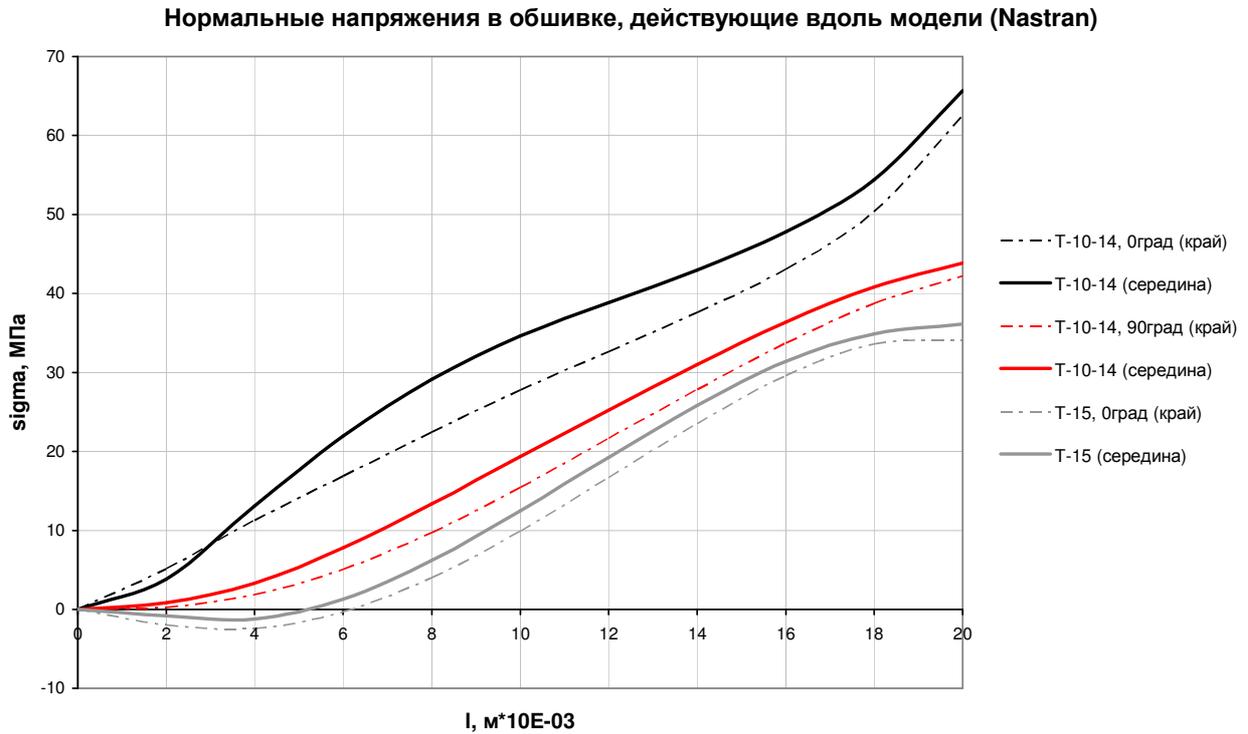
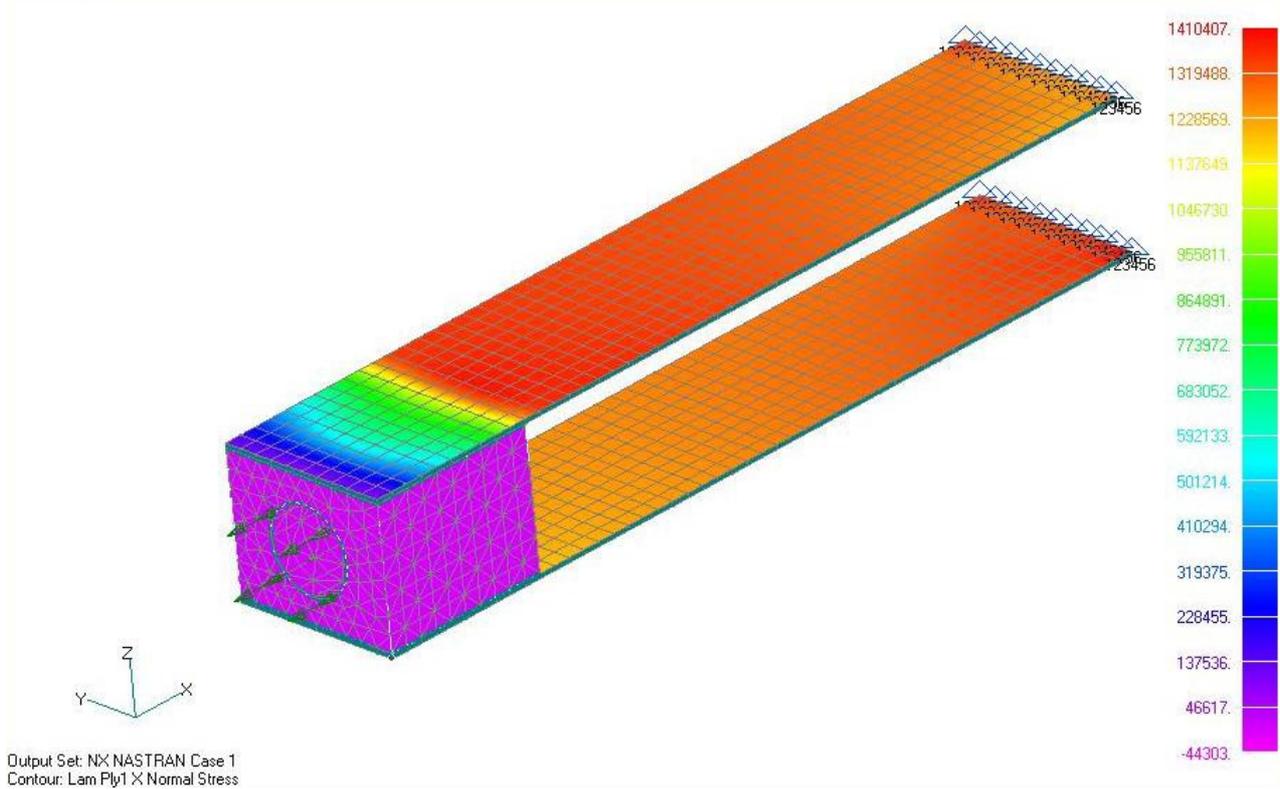


Рисунок 8

Выводы

1. Бесклеевая технология изготовления трехслойных панелей приводит к повышению усилий вырыва втулки и смятия материала трехслойной панели под втулкой. Такие соединения рекомендуется применять в конструкциях интерьера самолета в местах, где происходит передача больших усилий. При проектировании соединений панелей из КМ, изготавливаемых по приведенной выше технологии с использованием односторонних клеиваемых втулок, величины расчетных усилий на вырыв втулок, устанавливаемых по клеевой технологии, следует принимать не более 700 Н, а по бесклеевой технологии - 1000 Н; расчетные усилия смятия панели под втулкой для втулок, устанавливаемых по клеевой технологии, следует принимать не более 1500 Н, а по бесклеевой технологии - 2500 Н.

При проектировании соединений панелей из КМ с использованием сквозных клеиваемых втулок величины расчетных усилий смятия панели под втулкой для втулок, устанавливаемых по клеевой технологии, следует принимать не более 1500 Н, а по бесклеевой технологии - 3000 Н.

2. Распределение касательных напряжений в клеевом слое зависит от соотношений жесткостей соединяемых деталей и модуля сдвига клея. При этом в случае сбалансированности жесткостных характеристик $E_I F_I = E_{II} F_{II}$ соединяемых деталей максимальные напряжения сдвига наблюдаются по обеим границам клеевого стыка. В случае несбалансированных жесткостных характеристик $E_I F_I \neq E_{II} F_{II}$ максимальные касательные напряжения возникают по границе стыка со стороны торца более жесткого элемента соединения. Для сбалансированного соединения уменьшение модуля сдвига клея приводит к более равномерной передаче нагрузки от одного элемента стыка к другому по длине стыка.

Список использованных источников

1. Карпов Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я.С. Карпов. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 2006. – 358 с.
2. Кутьинов В.Ф. Расчет несущей способности клеевого соединения при совместном воздействии нагрузок и температур с учетом реальной диаграммы деформирования клеевого слоя // Тр. ЦАГИ 2629, – 1997. – С. 3 – 15.

Поступила в редакцию 19.02.09.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*