

Оценка допускаемых напряжений для расчета устойчивости панели из композиционного материала при различных уровнях надежности

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова*

Постановка проблемы, анализ проведенных исследований, цель работы

Композиционные материалы (КМ), находящие все более широкое применение в современной авиационной технике, отличаются от традиционных металлических материалов, в частности, тем, что здесь исчерпание несущей способности зачастую связано с местной потерей устойчивости тонкостенными элементами. Поэтому при определении допускаемых напряжений в тонкостенных элементах должны быть рассмотрены как само явление потери устойчивости, так и влияющие на него факторы, в том числе стохастического характера.

Технологически при выполнении расчетов на устойчивость возникает необходимость введения неких дополнительных понижающих допускаемые напряжения коэффициентов, которые могли бы быть применены при проектировании панелей из КМ, предположительно разрушающихся при возникновении уже низшей формы потери устойчивости. Хотя использование подобных коэффициентов и не регламентировано современными нормами проектирования самолетных конструкций, оно вытекает из особенностей поведения ламинатов с относительно слабой межслойной связью.

Цель данной работы – оценка значений коэффициентов понижения допускаемых напряжений по критерию устойчивости для использования в практике проведения прочностных расчетов тонкостенных композиционных конструкций в авиастроении для различных уровней надежности.

Объект исследования

Объект исследования имеет вид трехпролетной панели, выполненной из армированного пластика, и представляет собой характерный фрагмент монолитной дискретно подкрепленной тонкостенной композиционной конструкции, применяемой в планере современных самолетов.

Геометрические параметры исследуемой панели приведены на рис. 1.

Номинальные размеры панели: ширина $A = 450$ мм; длина $B = 450$ мм; высота ребер подкрепляющих стоек $H = 50$ мм; ширина полок подкрепляющих стоек $C = 30$ мм; ширина одного пролета $l = 150$ мм. Продольные подкрепляющие стойки расположены по краям среднего пролета; продольные кромки всей панели усилены накладками, аналогичными полкам стоек.

Материал обшивки панели – армированный пластик на основе углеткани УТ-900-2.5 и эпоксидного связующего ЭДТ-69Н; четыре слоя толщиной $d = 0.225$ мм каждый уложены под углом $\pm 45^\circ$. В местах расположения подкрепляющих полок – 8 слоев толщиной d , уложенных под углом $\pm 45^\circ$. Подкрепляющие ребра стоек также выполнены в 8 слоев с толщиной слоя d и

укладкой $\pm 45^\circ$. Номинальные значения свойств пластика УТ-900-2.5/ЭДТ-69Н: коэффициент Пуассона $\mu_{1,2} = 0.07$; модуль упругости в продольном направлении (вдоль основы ткани) $E_1 = 6500 \text{ кгс/мм}^2$; модуль упругости в поперечном направлении (поперек основы ткани) $E_2 = 6300 \text{ кгс/мм}^2$; модуль упругости при сдвиге (в плоскости листа) $G_{1,2} = 650 \text{ кгс/мм}^2$.

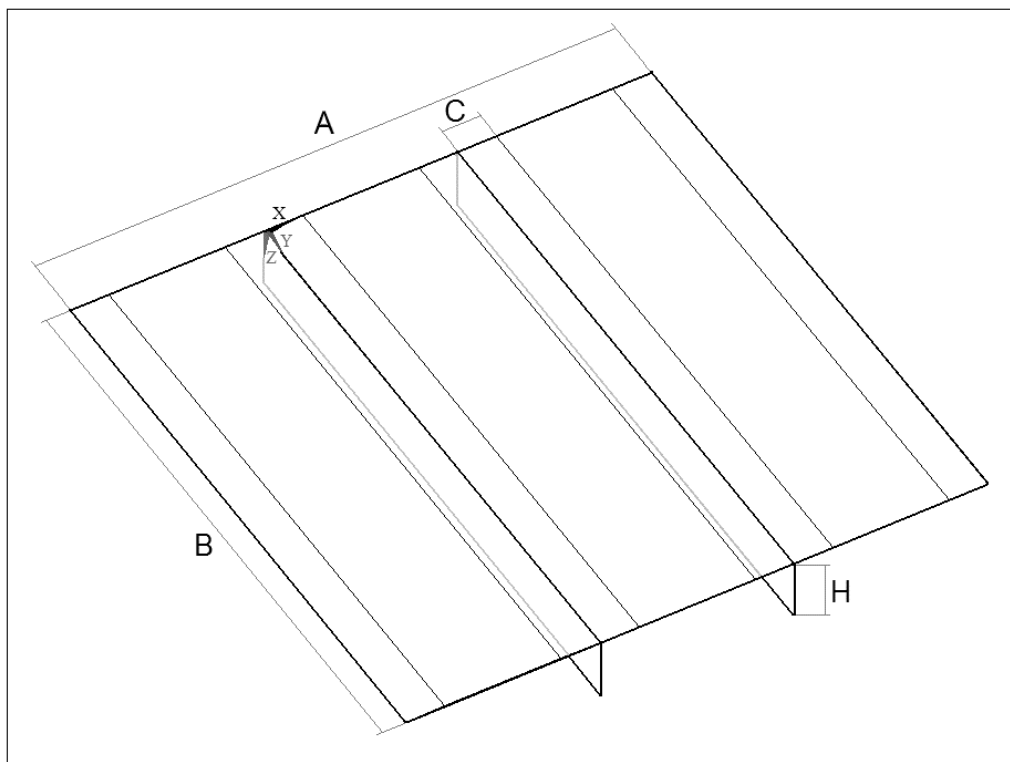


Рис. 1. Геометрическая модель панели

На рис. 2 изображено поперечное сечение панели с указанием свойств конечных элементов, обозначенных как *Property 1* и *Property 2*.

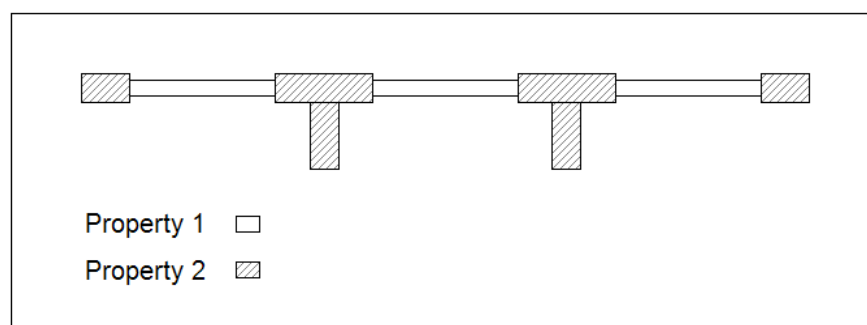


Рис. 2. Поперечное сечение панели с указанием свойств конечных элементов

Как показано на рис. 2, *Property 1* соответствует элементам пролетов панели, а *Property 2* – элементам подкрепляющих полок и стоек. Каждое свойство (*property*) представляет собой таблицу реальных констант элемента, в которой для каждого слоя элемента содержится информация о материале, толщине и угле укладки. Номинальные значения свойств материала и толщины слоя одинаковы для всех слоев элемента. Значения углов укладки по слоям и расположение слоев относительно системы координат показано на рис. 3.

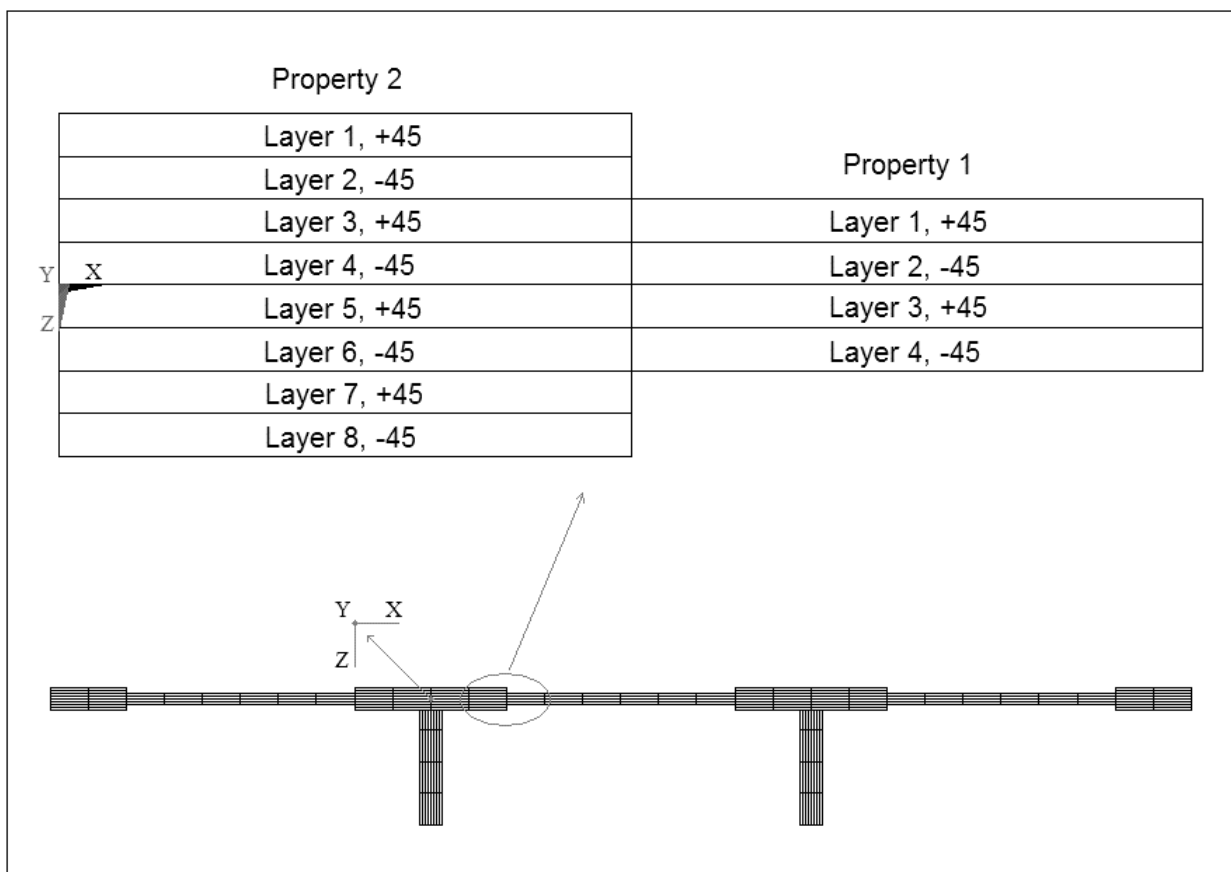


Рис. 3. Схема расположения слоев с указанием углов укладки

На рис. 3 толщина слоя элемента увеличена в 5 раз по отношению к истинной толщине слоя элемента в масштабе данного изображения.

При анализе панели будут использованы два варианта нагружения: А. Чистый сдвиг; В. Чистое сжатие.

Граничные условия при всех видах нагружения имеют одинаковый вид:

- по граням 5-1, 1-2, 2-6, 6-7, 7-3, 3-4, 4-8, 8-5 – запрет на перемещение вдоль оси Z;
- по грани 1-4 - запрет на перемещение вдоль осей X, Y;
- по узлам в начале и конце грани 1-4 – шарнирное закрепление (запрет на перемещение вдоль осей X, Y, Z).

Такие граничные условия обусловлены необходимостью исследования потери устойчивости средней ячейкой (пролетом) панели. Левая и правая ячейки моделируют граничные условия, нагружается только средняя ячейка панели.

Вариант нагружения А – чистый сдвиг:

- грань 2-3 нагружается погонной силой $q_y = -10$ кг/мм;
- грань 4-3 нагружается погонной силой $q_x = 10$ кг/мм;
- грань 1-2 нагружается погонной силой $q_x = -10$ кг/мм.

Вариант нагружения В – чистое сжатие:

- грань 2-3 нагружается погонной силой $q_x = -10$ кг/мм.

Схема нумерации ключевых граней панели показана на рис. 4.

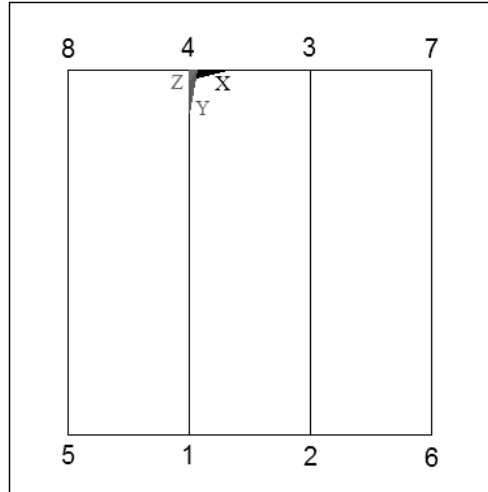


Рис. 4. Схема нумерации ключевых граней панели

Конечно-элементные модели закрепленной нагруженной панели приведены на рис. 5 и 6 для вариантов нагружения чистым сдвигом и сжатием соответственно.

Плотность сетки конечных элементов задана количеством элементов вдоль ширины пролета панели, равным 10. Размер конечного элемента по умолчанию в таком случае равен 15 мм. Получаем по 30 элементов вдоль ширины и высоты панели, по 4 элемента вдоль высоты подкрепляющих стоек и по 2 элемента вдоль ширины подкрепляющих полок.

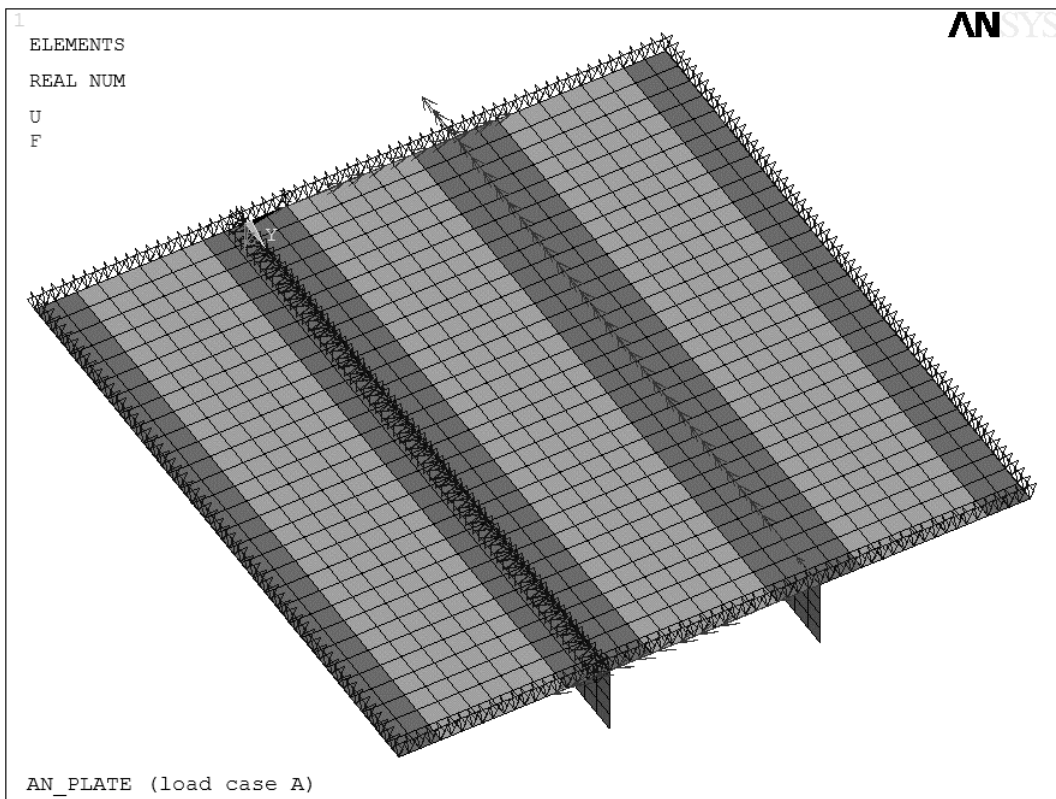


Рис. 5. Конечно-элементная модель закрепленной нагруженной панели – вариант нагружения чистым сдвигом

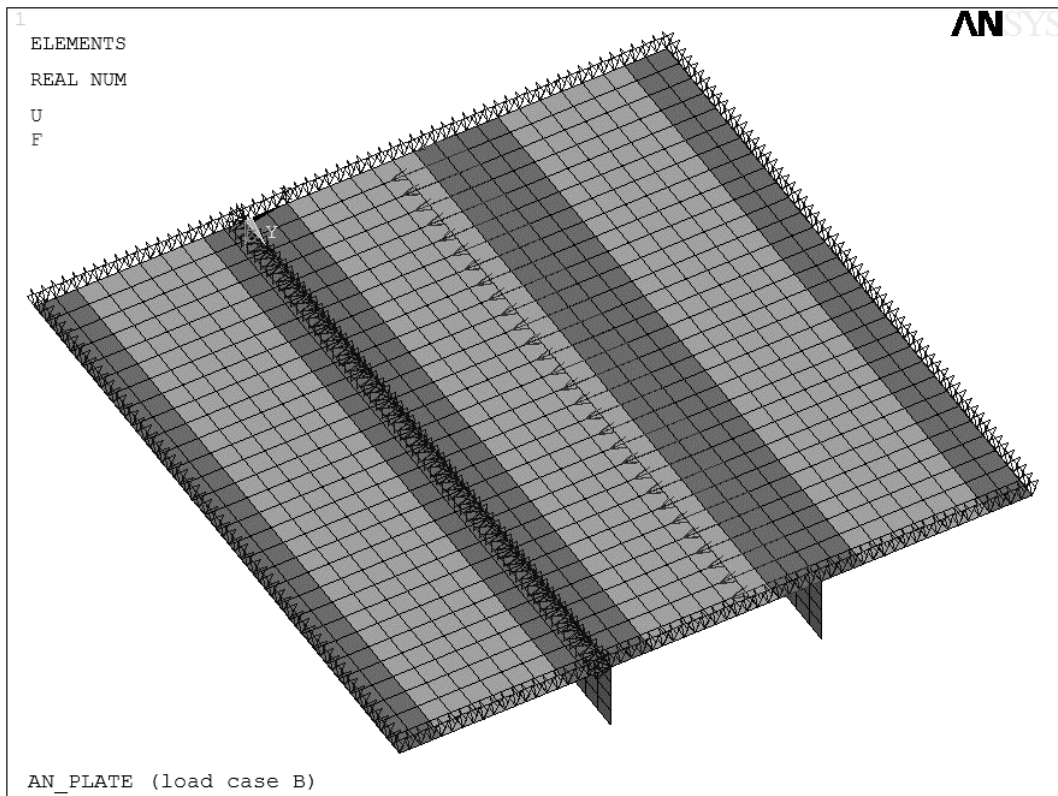


Рис. 6. Конечно-элементная модель закрепленной нагруженной панели – вариант нагружения чистым сжатием

Последовательность и методика исследования

Как уже было отмечено, задачей данного исследования является определение значений коэффициентов понижения допускаемых напряжений по устойчивости для панели из КМ, которые бы обеспечивали заданную надежность.

Коэффициент понижения допускаемых напряжений по отношению к максимальной эксплуатационной нагрузке определяется таким образом:

$$f_{доп} = q_{ном} / q_{вер}, \quad (1)$$

где $q_{ном}$ – критическая погонная нагрузка, определяемая при анализе на устойчивость пластины с номинальными параметрами; $q_{вер}$ – максимальная эксплуатационная нагрузка, обеспечивающая заданный уровень вероятности работоспособности P .

Исследования проводились в два этапа:

этап 1 – расчет на устойчивость по номинальным значениям: линейный анализ потери устойчивости исследуемой панели в системе конечно-элементного анализа Ansys;

этап 2 – вероятностное проектирование: построение граничных моделей критериальной функции (КФ) и проведение ускоренного статистического моделирования (УСМ) по всем моделям для определения проектной оценки вероятности работоспособности конструкции.

Расчет на устойчивость по номинальным значениям

Анализ потери устойчивости (ПУ) панели из КМ проведен в коммерческой системе конечно-элементного анализа Ansys версии 10.0. Получены следующие результаты:

- критические погонные усилия чистого сдвига $q_{НОМ} = 2.1947$ кг/мм, что соответствует первой форме ПУ панели при сдвиге нагрузкой $q_Y = -10$ кг/мм и собственному значению по этой форме $Eigenvalue\ 1 = 0.21947$;
- критические погонные усилия чистого сжатия $q_{НОМ} = 0.5965$ кг/мм, что соответствует первой форме ПУ панели при сжатии нагрузкой $q_X = -10$ кг/мм и собственному значению по этой форме $Eigenvalue\ 1 = 0.05965$.

Соответствующие формы потери устойчивости для случаев нагружения панели сдвигом и сжатием приведены на рис. 7 и 8.

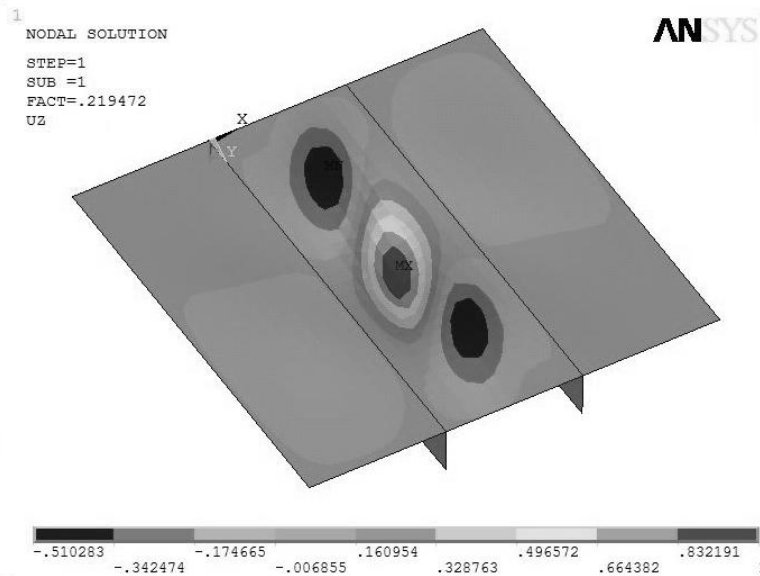


Рис. 7. Первая форма потери устойчивости панели при нагружении сдвигом

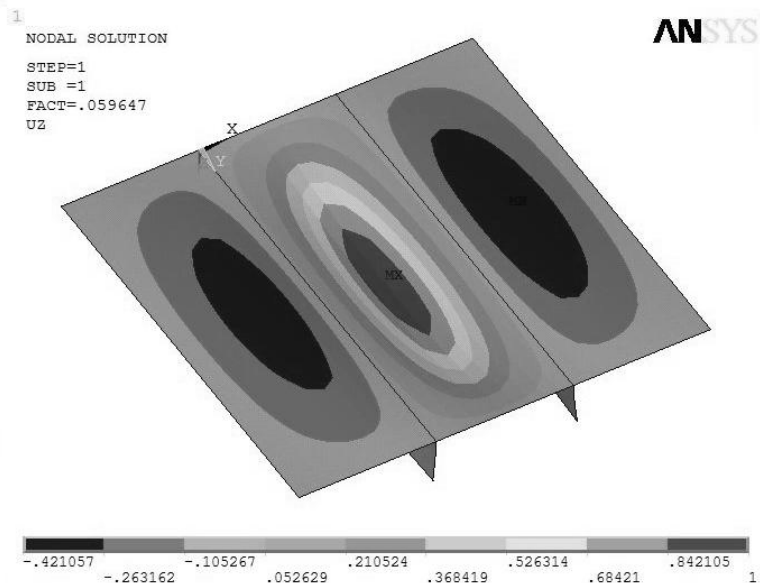


Рис. 8. Первая форма потери устойчивости панели при нагружении сжатием

Вероятностное проектирование

Для реализации методов построения граничных моделей функций случайных величин [6 - 8], а также проведения ускоренного статистического моделирования [9 - 11] была разработана «автоматизированная система (АС) проведения УСМ в среде Ansys» [12]. Данная АС позволяет для описанной выше модели пластины при заданных случайных разбросах геометрии и материала определить вероятность разрушения конструкции Q с точностью до 10^{-5} (а именно такая точность является минимально необходимой для допустимой величины вероятности разрушения авиационной конструкции в соответствии с нормами летной годности [3 - 5]). Вероятность работоспособности – это вероятность, обратная вероятности разрушения, т.е. $P = 1 - Q$.

Приняв во внимание то, что панели из КМ часто разрушаются в результате потери устойчивости, условие целостности исследуемой конструкции можно записать в виде

$$1/f_1 < 1, \quad (2)$$

где f_1 – собственное значение первой формы потери устойчивости по Эйлеру (*Eigenvalue 1*).

Левая часть условия (2) представляет собой функцию случайных величин, которую мы называем критериальной функцией (КФ). Случайными величинами являются некоторые случайные параметры геометрии и свойств материала. Вероятность работоспособности – это вероятность выполнения условия (2). Таким образом, вероятность работоспособности в данном исследовании - это вероятность того, что панель не потеряет устойчивость при заданной нагрузке.

В данном исследовании в качестве случайных параметров вероятностного проектирования выступают: из геометрических параметров - толщина пластины, из свойств материала – модули упругости при сжатии и модуль упругости при сдвиге. В табл. 1 приведены математические ожидания m , среднеквадратические отклонения σ и случайные разбросы параметров геометрии и свойств материала на уровне 3σ . Процент разброса на уровне 3σ определяется как $(\sigma \cdot 100\%) / m \cdot 3$.

Таблица 1. Случайные разбросы параметров геометрии и свойств материала

Параметр	m	σ	Разброс, %
d_1-d_8 , мм	0.24125	0.014972	18.62
E_1 , кгс/мм ²	6721.65	686.56	30.64
E_2 , кгс/мм ²	6702.79	1204.685	53.92
G_{12} , кгс/мм ²	650	65	30

Статистические данные по свойствам материала УТ-900-2.5/ЭДТ-69Н и толщинам монослоев были получены на основании анализа данных входного контроля, выполняемого на АНТК им. О.К. Антонова. По толщинам монослоев панели получены следующие данные для образца из восьми слоев: математическое ожидание (МО) толщины образца $m_{\text{образца}} = 1.93$ мм, среднеквадратическое отклонение (СКО) толщины образца $\sigma_{\text{образца}} = 0.042348$. МО и СКО для одного слоя вычислены по формулам:

$$m_{\text{образца}} = m_{\text{образца}} / n,$$

$$\sigma_{\text{образца}} = \sigma_{\text{образца}} / \text{sqrt}(n),$$

где n - число слоев образца; sqrt – квадратный корень.

Считаем, что толщина каждого слоя случайна, то есть необходимо 8 случайных параметров толщин слоев d_1-d_8 со значениями $m = 0.24125$ мм, $\sigma = 0.014972$.

Материал панели ортотропный, и его свойства задаются в двух направлениях: 1 – продольное направление (или направление вдоль основы), 2 – поперечное направление (или направление поперек основы). Были получены следующие статистические данные по модулям упругости материала:

- модуль упругости в продольном направлении (вдоль основы) E_1
 $m = 6721.65$ кгс/мм², $\sigma = 686.56$;
- модуль упругости в поперечном направлении (поперек основы) E_2
 $m = 6702.79$ кгс/мм², $\sigma = 1204.685$.

При отсутствии статистических данных по модулю сдвига процент разброса (на уровне 3σ) для этого случайного параметра был принят примерно равным соответствующему проценту разброса для модуля упругости в продольном направлении (а именно 30%). Значению МО для модуля сдвига присвоено номинальное значение модуля сдвига для данного материала, а СКО вычислено исходя из известных значений МО и процента разброса на уровне 3σ . Таким образом, были получены следующие статистические данные по модулю сдвига материала в плоскости листа: $m = 650$ кгс/мм², $\sigma = 65$.

Для учета ухудшения упругих свойств материала на момент окончания эксплуатации из-за воздействия окружающей среды выполнена корректировка модулей упругости и сдвига по методике фирмы Boeing. Были использованы следующие корректирующие коэффициенты:

- $K_{Ex} = 0.98$ – для корректировки модуля упругости в продольном направлении;
- $K_{Ey} = 0.96$ – для корректировки модуля упругости в поперечном направлении;
- $K_{Gxy} = 0.97$ – для корректировки модуля сдвига в плоскости листа;
- $K_{Eсж} = 0.9715$ – для корректировки модулей упругости при сжатии по отношению к соответствующим значениям при растяжении.

Корректировка для МО производилась по следующим формулам:

$$E_1' = E_1 * K_{Ex} * K_{Eсж},$$

$$E_2' = E_2 * K_{Ey} * K_{Eсж},$$

$$G_{12}' = G_{12} * K_{Gxy}.$$

СКО скорректированных модулей было вычислено с соблюдением процента разброса (на уровне 3σ) для исходных модулей. В табл. 2 приведены математические ожидания m и среднеквадратические отклонения σ скорректированных свойств материала.

Таблица 2. Статистические параметры скорректированных свойств материала

Параметр	m	σ
E_1 , кгс/мм ²	6399.48	653.65
E_2 , кгс/мм ²	6251.29	1123.54
G_{12} , кгс/мм ²	630.5	63.05

Алгоритм вероятностного проектирования состоит в следующем.

КФ аппроксимируется граничными моделями:

- SLM – секущая граничная линейная модель;
- $KSLM$ – касательная граничная линейная модель;
- ALM_SLM – аппроксимирующая граничная линейная модель, построенная на основе секущей ГЛМ;

- *ALM_KSLM* – аппроксимирующая граничная линейная модель, построенная на основе касательной ГЛМ;
- *KM_SLM* – квадратичная граничная модель, построенная на основе секущей ГЛМ;
- *KM_KSLM* – квадратичная граничная модель, построенная на основе касательной ГЛМ;
- *LSM_SLM* – аппроксимирующая граничная модель, построенная с использованием МНК на основе секущей ГЛМ;
- *LSM_KSLM* – аппроксимирующая граничная модель, построенная с использованием МНК на основе касательной ГЛМ.

Все линейные модели определены в виде

$$\lambda_m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n b_i \eta_i, \quad (3)$$

квадратичные – как

$$\lambda_m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n b_i \eta_i + \sum_{i=1}^n c_i \eta_i^2, \quad (4)$$

где λ_m - модели левой части (1); λ_0, b_i, c_i - коэффициенты моделей; η_i - случайные разбросы. Погрешность построения граничных моделей - не более 0.1%.

Для каждой модели аналитически определяется вероятность разрушения Q' , аналитическая вероятность работоспособности $P' = 1 - Q'$.

По построенным граничным моделям проводится УСМ с целью уточнения вероятности работоспособности. Объем УСМ определяется по формулам

$$N_{\Lambda} = (U^2/\beta^2), \quad N_{УСМ} = K_{\Gamma} * N_{\Lambda},$$

где $U = 1.96$ (что соответствует доверительной вероятности $P_{\delta} = 0.95$); $\beta = 0.15$; $K_{\Gamma} = 1.5$ (коэффициент перекрытия [13]). Получаем: $N_{\Lambda} = 170$, $N_{УСМ} = 255$.

Объем СМ определяется АС автоматически из условия получения набора хвостовых реализаций, превышающих границу, в объеме N_{Λ} . Всего при проведении СМ сохраняется $N_{УСМ}$ хвостовых реализаций.

В результате проведения УСМ по выбранной граничной модели получаем:

Q^* – вероятность потери устойчивости, определенная с помощью УСМ; $P^* = 1 - Q^*$ – вероятность работоспособности, определенная с помощью УСМ.

В данном исследовании решается обратная задача – определение максимальной эксплуатационной нагрузки $q_{\text{сер}}$, обеспечивающей заданный уровень вероятности работоспособности P .

Погонную нагрузку выбирают из условия обеспечения заданной вероятности работоспособности P по следующему алгоритму. При заданной нагрузке q_i' вероятность работоспособности P_i' вычисляют аналитически по секущей и/или касательной ГЛМ. Если вероятность близка к требуемой, а значит, соблюдается условие $((P_i' \geq P) \text{ и } (P_i' \rightarrow P))$, то нагрузку принимают равной $q_i = q_i'$. Строят остальные граничные модели и проводят УСМ, в результате которого получают уточненное значение вероятности работоспособности P_i^* . Если выполняется условие $((P_i^* \geq P) \text{ и } (P_i^* \rightarrow P))$, то значение максимальной эксплуатационной нагрузки $q_{\text{сер}}$ для i -го уровня вероятности принимают равным подобранному значению погонной нагрузки q_i . В табл. 3 приведены значения погонной нагрузки для заданных уровней вероятности работоспособности: 0.9, 0.99 (оговоренных в п. 613 (b) АП [23, 25, 27, 29] в качестве требований к прочностным характеристикам материалов), а также повышенных уровней 0.999 и

0.9999. Для уровня вероятности $P = 0.99$ вероятностное проектирование производится повторно, без коррекции модулей упругости и сдвига, которая описана выше. В таблицах этот вариант помечен символом “*”.

Таблица 3. Значения погонной нагрузки q для заданного уровня вероятности работоспособности P

i	P_i	Сдвиг				Сжатие			
		q_i кгс/мм	P_i'		q_i кгс/мм	P_i'			
			SLM	KSLM		SLM	KSLM		
1	0.9	2.25	0.9078541	0.9091147	0.62	0.90615196	0.90562739		
2	0.99	1.95	0.991317	0.991528	0.54	0.991918	0.992261		
3	0.999	1.75	0.9990942	0.9991693	0.49	0.9991376	0.9992175		
4	0.9999	1.585	0.9999110	-	0.45	0.99991215	0.99991862		
5	0.99 *	2.05	0.991981	0.992419	0.57	0.991692	0.992054		

Для вероятности работоспособности $P = 0.99$ проведено УСМ по всем восьми моделям. Для $P = 0.999$ и $P = 0.9999$ проведено УСМ по секущей и касательной моделям. Для панели, нагруженной сдвигом, при уровне вероятности $P = 0.9999$, из-за несходимости не удалось построить касательную граничную модель.

Результаты УСМ для панели, нагруженной сдвигом, представлены в табл. 4, а для панели, нагруженной сжатием, – в табл. 5.

Таблица 4. Результаты УСМ для панели, нагруженной сдвигом

Модель	P	0.99	0.999	0.9999	* 0.99
	q	1.95	1.75	1.585	2.05
SLM	P^*	0.99097849	0.999092934	0.9999174853	0.99126209
KSLM		0.99132547	0.999182742	-	0.99149572
ALM_SLM		0.99087935	-	-	0.99121536
ALM_KSLM		0.99078021	-	-	0.99121536
KM_SLM		0.99092892	-	-	0.99121536
KM_KSLM		0.99097849	-	-	0.99121536
LSM_SLM		0.99092892	-	-	0.99121536
LSM_KSLM		0.99078021	-	-	0.99140227

Таблица 5. Результаты УСМ для панели, нагруженной сжатием

Модель	P	0.99	0.999	0.9999	* 0.99
	q	0.54	0.49	0.45	0.57
SLM	P^*	0.99168418	0.999091065	0.9999105641	0.99106653
KSLM		0.99177556	0.999129135	0.9999105641	0.99131607
ALM_SLM		0.99150142	-	-	0.99096671
ALM_KSLM		0.99141003	-	-	0.99101662
KM_SLM		0.99141003	-	-	0.99096671
KM_KSLM		0.99182126	-	-	0.99091680
LSM_SLM		0.99141003	-	-	0.99091680
LSM_KSLM		0.99154711	-	-	0.99086690

Графическая зависимость вероятности работоспособности P^* от приложенной погонной нагрузки q для панели, нагруженной сдвигом, показана на рис. 9, а для панели, нагруженной сжатием, – на рис. 10. Эти зависимости можно также трактовать обратным образом - как зависимость максимальной эксплуатационной нагрузки $q_{вер}$ от заданного уровня вероятности работоспособности P .

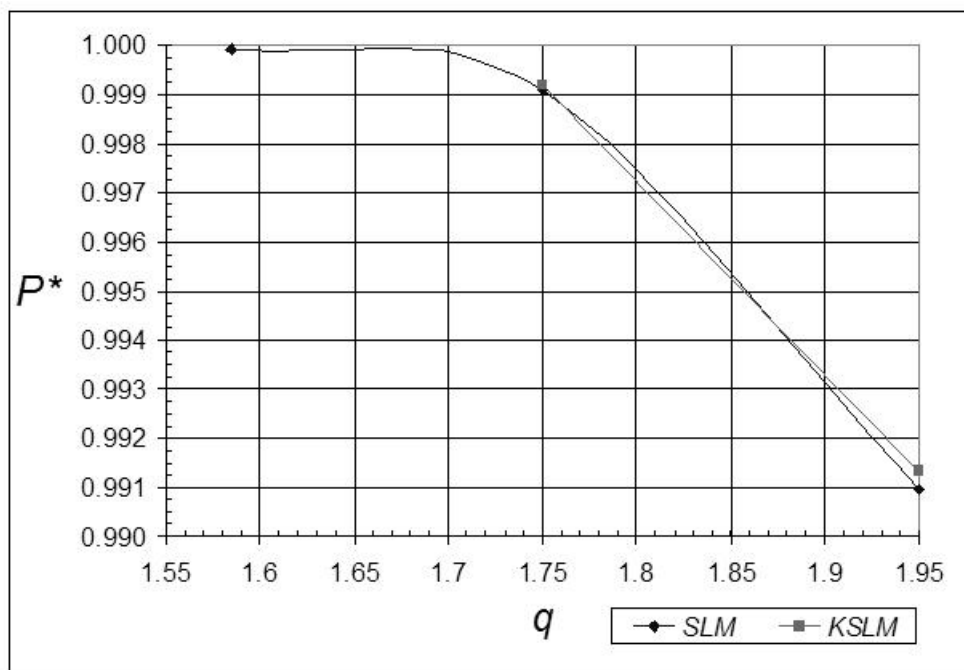


Рис. 9. Зависимость вероятности работоспособности от заданной погонной нагрузки для панели, нагруженной сдвигом

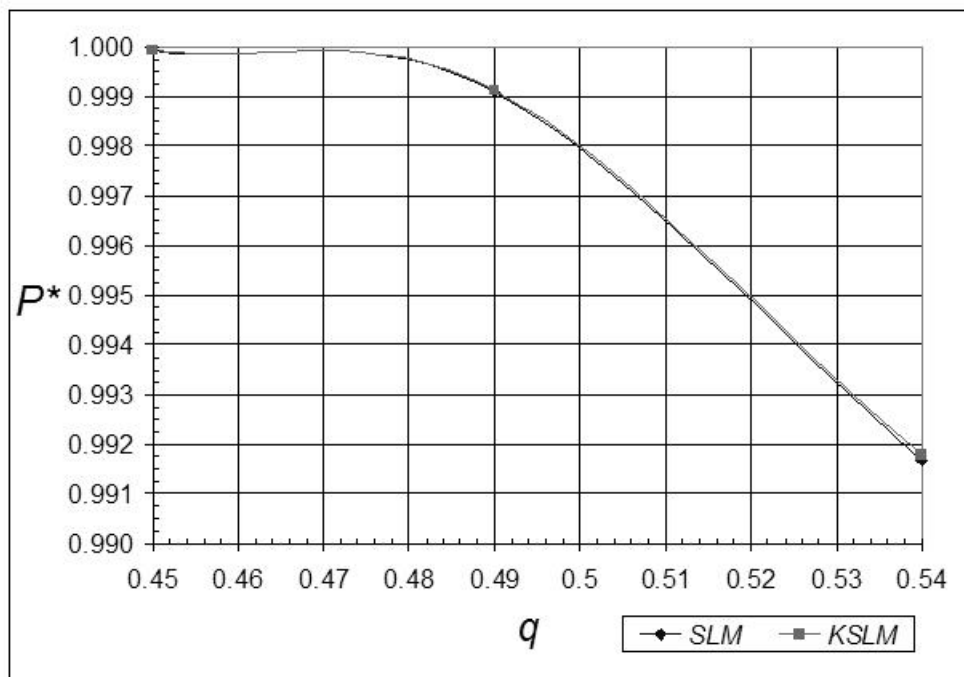


Рис. 10. Зависимость вероятности работоспособности от заданной погонной нагрузки для панели, нагруженной сжатием

Для уровня вероятности $P = 0.9$ определены только аналитические значения вероятности работоспособности по секущей и касательной моделям, без проведения УСМ. Для панели, нагруженной сдвигом: при $q = 2.25$ $P' = 0.9078541$ по секущей модели и $P' = 0.9091147$ по касательной модели. Для панели, нагруженной сжатием: при $q = 0.62$ $P' = 0.90615196$ по секущей модели и $P' = 0.90562739$ по касательной модели.

По полученным значениям номинальной критической погонной нагрузки $q_{ном}$ и максимальной эксплуатационной нагрузки $q_{вер}$, обеспечивающей заданный уровень вероятности работоспособности P , по формуле (1) вычисляют значения коэффициентов понижения допускаемых напряжений по критерию устойчивости $f_{доп}$ для каждого из четырех заданных уровней вероятности 0.9, 0.99, 0.999 и 0.9999 для случаев нагружения панели сдвигом и сжатием.

Результаты исследования

Значения коэффициента понижения допускаемых напряжений по критерию устойчивости $f_{доп}$ для различных уровней вероятности работоспособности P приведены в табл. 6.

Таблица 6. Значения коэффициента понижения допускаемых напряжений по критерию устойчивости для различных уровней вероятности работоспособности

P	Сдвиг (вариант нагружения А)		Сжатие (вариант нагружения В)	
	$q_{ном} = 2.1947$		$q_{ном} = 0.5965$	
	$q_{вер}$	$f_{доп}$	$q_{вер}$	$f_{доп}$
0.9	2.25	0.9754	0.62	0.9621
0.99	1.95	1.1255	0.54	1.1046
0.999	1.75	1.2541	0.49	1.2173
0.9999	1.585	1.3847	0.45	1.3255

Выводы

Для обеспечения заданного уровня надежности монолитных подкрепленных тонкостенных конструкций из слоистых углепластиков, несущая способность которых определяется устойчивостью, рекомендуется использовать следующие коэффициенты понижения допускаемых напряжений по критерию устойчивости тонкостенных элементов:

- при нагружении сдвигом:
 - для вероятности 0.9 $f_{доп} = 0.9754$,
 - для вероятности 0.99 $f_{доп} = 1.1255$,
 - для вероятности 0.999 $f_{доп} = 1.2541$,
 - для вероятности 0.9999 $f_{доп} = 1.3847$;
- при нагружении сжатием:
 - для вероятности 0.9 $f_{доп} = 0.9621$,
 - для вероятности 0.99 $f_{доп} = 1.1046$,
 - для вероятности 0.999 $f_{доп} = 1.2173$,
 - для вероятности 0.9999 $f_{доп} = 1.3255$.

Список литературы

1. Композиционные материалы: В 8 т. Пер. с англ. / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 7. Анализ и проектирование конструкций. Ч. 1 / Под ред. К. Чамиса. – 1978. – 300 с.
2. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике.- М.: Стройиздат, 1965. – 279 с.
3. Нормы летной годности гражданских самолетов СССР. Изд. третье// Межведомственная комиссия по нормам летной годности гражданских самолетов и вертолетов СССР. – 1984. - С.22 – 24.
4. Нормы летной годности гражданских самолетов, часть 23 (АП-23). Межгосударственный авиационный комитет. - М.: ООО «Авиаиздат», 1993. – С.14.
5. Нормы летной годности гражданских самолетов, часть 25 (АП-25). Межгосударственный авиационный комитет. - М.: ЛИИ им. М.М. Громова, 1994. – С. 19 – 20.
6. Сухоребрый В.Г., Шевцова М.А. Эффективные методы оценки вероятности разрушения самолетных конструкций//Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - Х.: ХАИ. – 1998. – Вып. 12. - С. 53 - 60.
7. Лежнина М.В., Сухоребрый В.Г. Алгоритмы построения граничных линейных моделей критериальных функций для оценки вероятности работоспособности объектов аэрокосмической техники// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2002. – Вып. 12. - С. 63 - 74.
8. Сухоребрый В.Г. Статистические модели разрушения конструкций// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2001. – Вып. 10. - С. 89 - 95.
9. Сухоребрый В.Г., Айзенберг Е.Я. Ускоренное статистическое моделирование для оценки вероятности устойчивости динамических систем со случайными параметрами // Математическое моделирование динамических процессов в системах с жидкостью. – К.: ИМ АН УССР. – 1988. – С. 128 - 136.
10. Сухоребрый В.Г. Оценка вероятности работоспособности технических объектов с помощью ускоренного статистического моделирования// Авиационно-космическая техника и технология. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2000. – Вып. 19. - С. 215 - 218.
11. Сухоребрый В.Г., Стерлева А.С. Оценка качества граничных моделей для определения вероятности разрушения конструкции// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2004. – Вып. 24. - С. 242 - 249.
12. Стерлева А.С. Автоматизированная система определения вероятности разрушения конструкции с помощью проведения ускоренного статистического моделирования в среде Ansys// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2004. – Вып. 24. - С. 263 - 277.
13. Сухоребрый В.Г., Стерлева А.С. Выбор коэффициента перекрытия для ускоренного статистического моделирования НДС конструкций// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2005. – Вып. 29. - С. 46 - 56.