

Верификация результатов расчета на потерю устойчивости панели из композиционного материала в современных пакетах конечно-элементного анализа

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

Постановка проблемы, анализ проведенных исследований, цель работы

Современные системы конечно-элементного анализа, такие, как Ansys и Nastran, предоставляют широкий спектр возможностей для расчета конструкций. В частности, они позволяют проводить анализ потери устойчивости панели из ортотропных композиционных материалов. Однако на точность результатов такого анализа может влиять множество факторов. В случае, если конечно-элементная модель построена верно, т.е. выбран подходящий тип конечных элементов, корректно заданы граничные условия и приложены нагрузки, плотность сетки конечных элементов все же может оказаться неоптимальной. Заниженная плотность сетки приводит к погрешности, а завышенная – к росту потребных вычислительных ресурсов и увеличению времени расчета.

Цель данной работы – анализ влияния различных вариантов меширования на погрешность получаемых результатов и разработка рекомендаций по оптимальной плотности сетки конечных элементов для нескольких типовых конфигураций исследуемой панели.

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 полка 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 $+, -45^\circ$. В местах расположения подкрепляющих полок – 8 слоев толщиной d , уложенных под углом $+, -45^\circ$. Подкрепляющие ребра стоек также выполнены в 8 слоев с толщиной слоя d и укладкой $+, -45^\circ$. 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) $E_1 = 6500$ кгс/мм²; модуль упругости в поперечном

направлении (поперек основы ткани) $E_2 = 6300 \text{ кгс/мм}^2$; модуль упругости при сдвиге (в плоскости листа) $G_{1,2} = 650 \text{ кгс/мм}^2$.

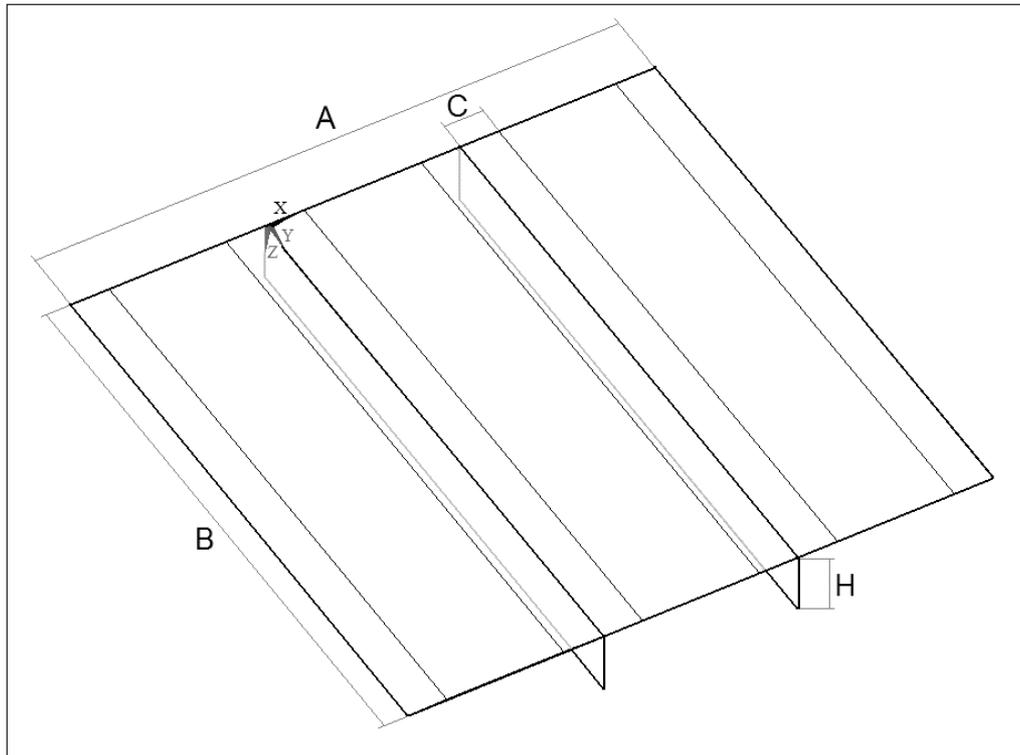


Рис. 1. Геометрическая модель панели

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

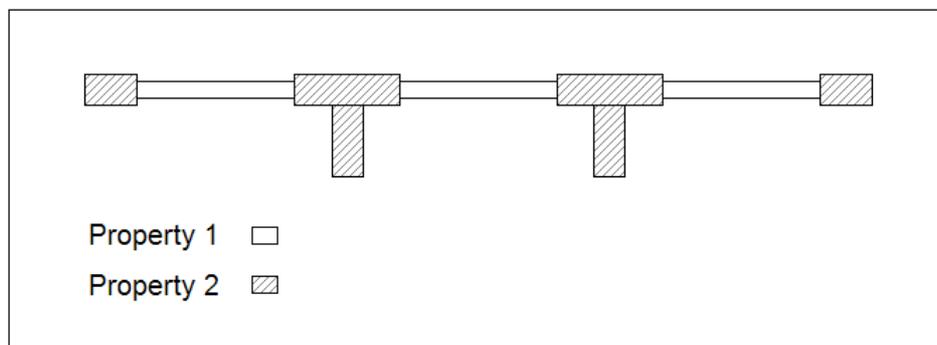


Рис. 2. Поперечное сечение панели с указанием свойств конечных элементов

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.

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

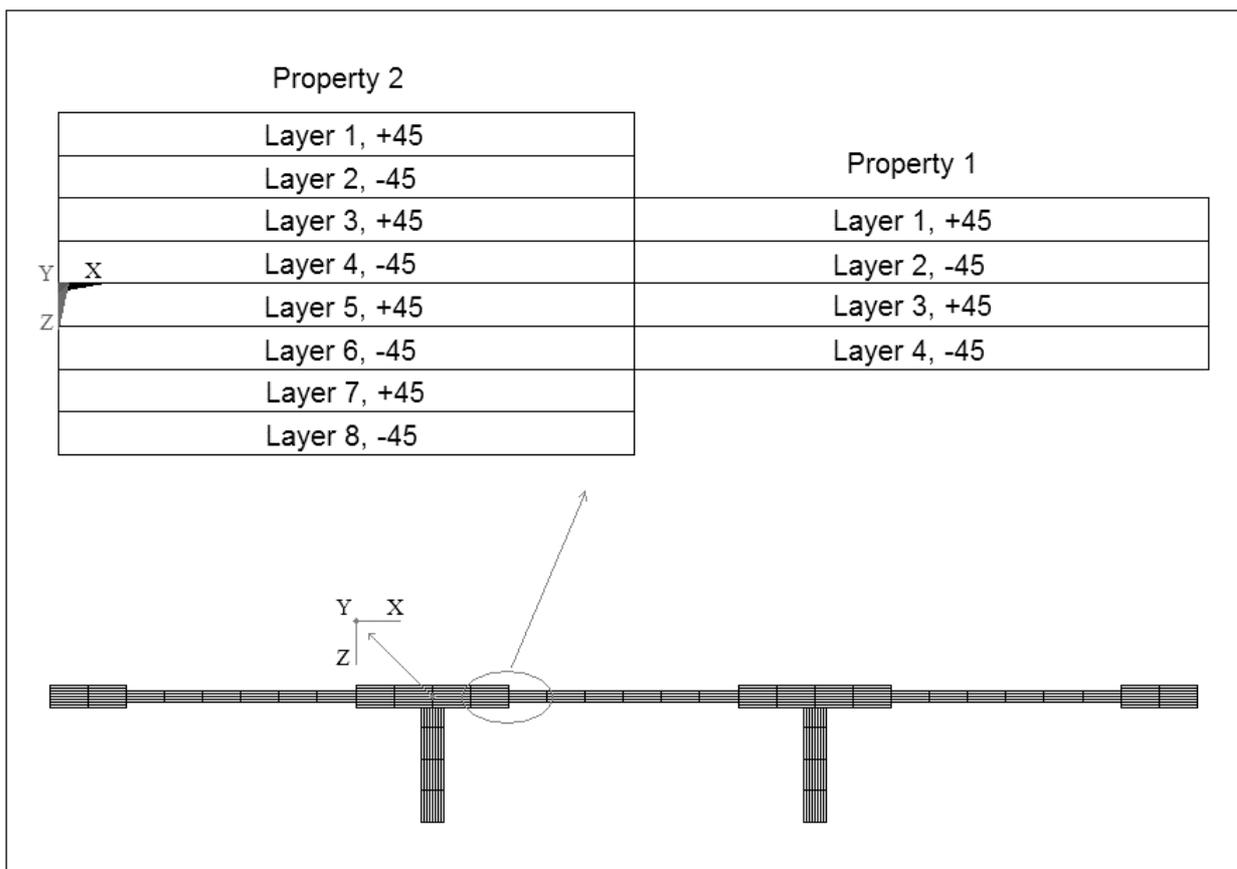


Рис. 3. Схема расположения слоев с указанием углов укладки

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.

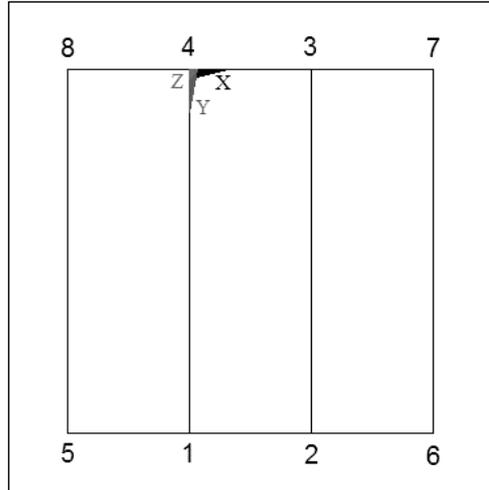


Рис. 4. Схема нумерации ключевых граней панели

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.

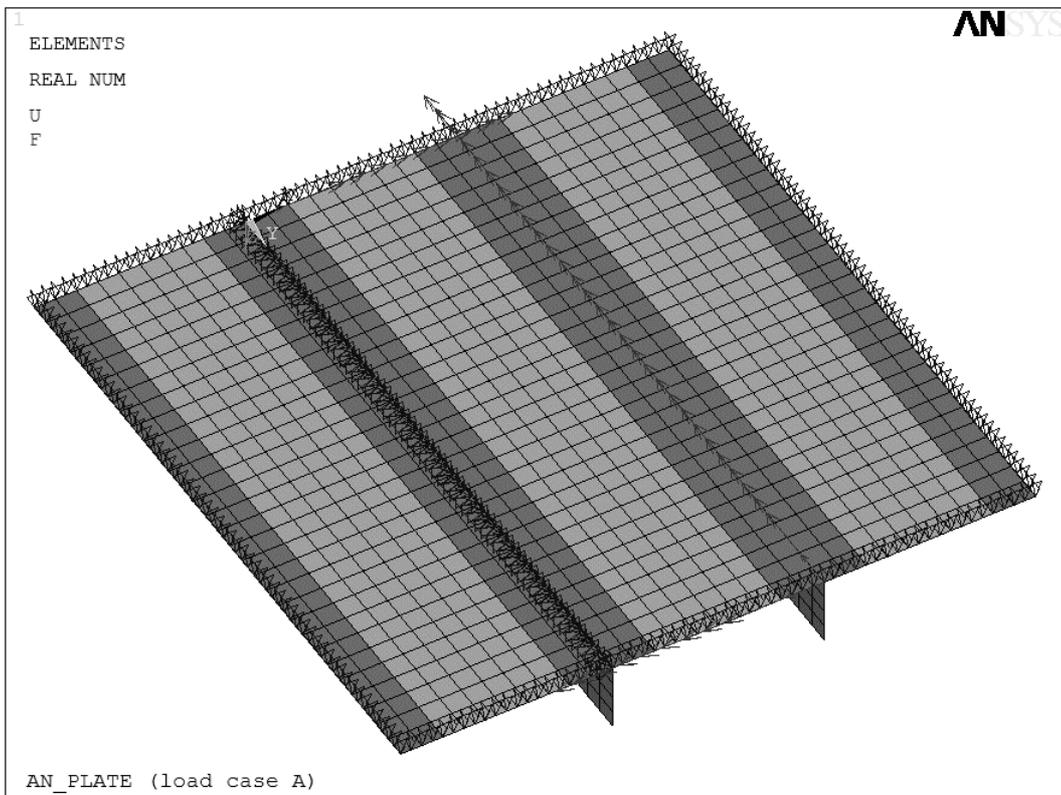


Рис. 5. Конечно-элементная модель закрепленной нагруженной панели – вариант нагружения чистым сдвигом

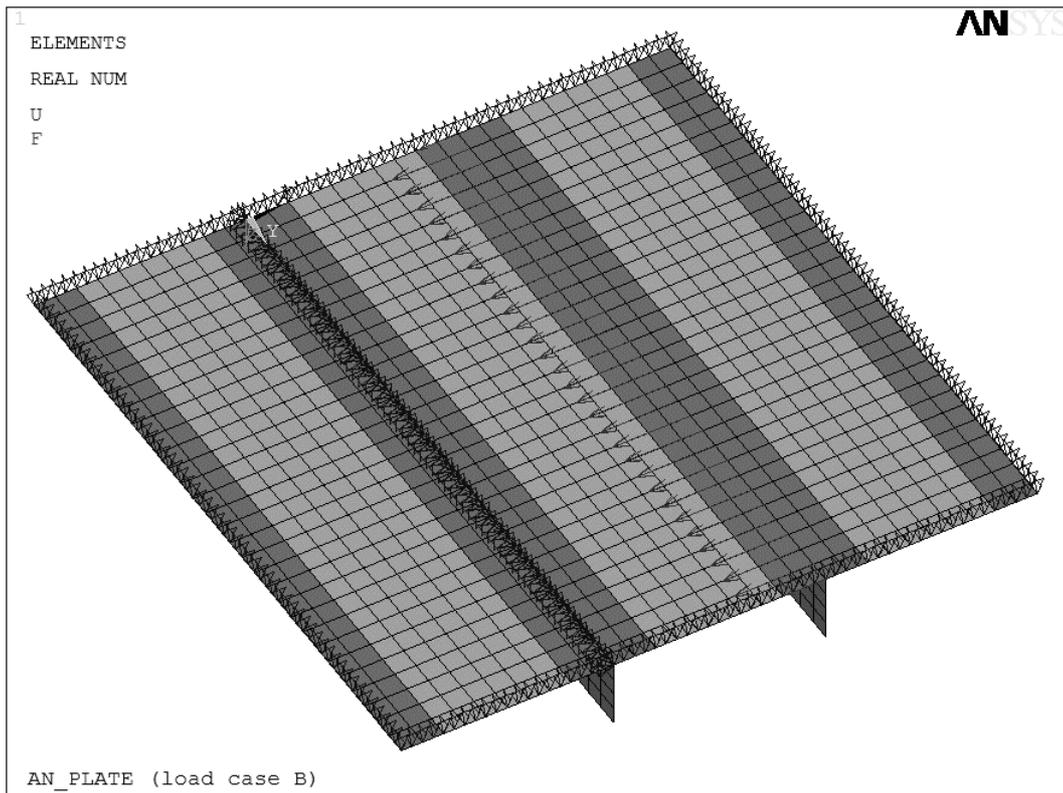


Рис. 6. Конечно-элементная модель закрепленной нагруженной панели – вариант нагружения чистым сжатием

Последовательность и методика исследования

Как уже было отмечено, цель данного исследования заключается в анализе погрешности получаемых результатов для различных вариантов меширования и формулировании рекомендаций по оптимальной плотности сетки конечных элементов для нескольких типовых конфигураций панели из композиционного материала.

Было исследовано 4 варианта конфигурации панели с различным соотношением параметров l/δ , где l – ширина средней ячейки панели, δ – толщина панели. Параметр l не изменяется и равен 150 мм. Параметр δ равен $n*d$, где d – толщина слоя, n – число слоев в панели. Толщина слоя $d=0.225$ мм.

Варианты конфигурации панели:

вариант 1 - панель из двух слоев ($l/\delta = 150/(2*0.225) = 150/0.45 = 333.3$);

вариант 2 - панель из четырех слоев ($l/\delta = 150/(4*0.225) = 150/0.9 = 166.7$);

вариант 3 - панель из шести слоев ($l/\delta = 150/(6*0.225) = 150/1.35 = 111.1$);

вариант 4 - панель из восьми слоев ($l/\delta = 150/(8*0.225) = 150/1.8 = 83.3$).

Подробное описание четырехслойной панели было приведено выше. В остальных вариантах (2, 6 и 8 слоев) меняется только конфигурация пролетов панели (и, соответственно, свойство элементов *Property 1*), конфигурация подкрепляющих полок и стоек остается неизменной (как и свойство элементов *Property 2*).

Расчет проведен для четырех вариантов меширования с 5, 10, 15 и 20 элементами вдоль ширины ячейки панели (вдоль параметра l) в системах MSC Nastran версии 4 и Ansys версии 10. Конечно-элементная модель панели для

варианта меширования с 10 элементами вдоль ширины пролета приведены выше на рис. 5 и 6. В остальных вариантах (5, 15 и 20 элементов) размер конечного элемента изменяется пропорционально.

Рекомендуемая плотность сетки определена из условия обеспечения минимальной погрешности результатов. Погрешность результатов оценивалась по следующему алгоритму.

Производился расчет на устойчивость панели с заданным соотношением l/δ с начальной плотностью сетки конечных элементов, принятой 5 элементам вдоль ширины ячейки панели, в системах Nastran и Ansys. В результате получены собственные значения для первых трех форм потери устойчивости: $\lambda_1^{A1}, \lambda_2^{A1}, \lambda_3^{A1}, \lambda_1^{N1}, \lambda_2^{N1}, \lambda_3^{N1}$. Собственные значения указаны в виде $\lambda_l^{<S>J}$, где l – индекс формы потери устойчивости ($l=1,2,3$); $<S>$ – символ системы, в которой получен результат ($<S>=A$ – Ansys, $<S>=N$ – Nastran); J – индекс варианта меширования ($J=1 : m=5, J=2 : m=10, J=3 : m=15, J=4 : m=20$, где m – количество конечных элементов вдоль ширины ячейки, определяющее плотность меширования).

Затем расчет повторялся для других вариантов меширования. Каждый раз при повышении плотности сетки конечных элементов по полученным собственным значениям $\lambda_l^{<S>J}$ вычислялись следующие параметры:

$$\Delta\lambda_{l\ dens}^J = SKO(\lambda_l^{N(J-1)}, \lambda_l^{NJ})/CP(\lambda_l^{N(J-1)}, \lambda_l^{NJ}), \text{ где } J = 2,3,4;$$

$$\Delta\lambda_{l\ sys}^J = SKO(\lambda_l^{NJ}, \lambda_l^{AJ})/CP(\lambda_l^{NJ}, \lambda_l^{AJ}), \text{ где } J = 1,2,3,4;$$

SKO – среднеквадратическое отклонение, CP – среднее значение.

Параметр $\Delta\lambda_{l\ dens}^J$ представляет собой относительную погрешность результатов от изменения плотности сетки конечных элементов при расчете в системе Nastran. Он позволяет оценить, насколько результаты расчета изменяются при увеличении плотности сетки. При достаточно корректном выборе плотности сетки дальнейшее увеличение количества конечных элементов в модели не должно существенно влиять на результат расчета. Параметр $\Delta\lambda_{l\ sys}^J$ представляет собой относительную погрешность результатов, полученных для одного варианта меширования в разных системах (Ansys и Nastran). При правильном выборе плотности сетки результаты расчетов в обеих системах должны быть практически одинаковыми.

Результаты расчетов на устойчивость представлены в табл. 1, 2, 3 и 4 для соответствующих вариантов конфигурации панели.

Таблица 1. Результаты расчетов на устойчивость для двухслойной панели

m (J)	l	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
		Ansys	Nastran	$\Delta\lambda_{l\ dens}^J$	$\Delta\lambda_{l\ sys}^J$	Ansys	Nastran	$\Delta\lambda_{l\ dens}^J$	$\Delta\lambda_{l\ sys}^J$
		λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}			λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}		
5 (1)	1	0.043587	0.093204		0.512965	0.013367	0.017091		0.172899
	2	0.04368	0.093528		0.513785	0.015139	0.021025		0.230169
	3	0.048081	0.102874		0.513325	0.017247	0.024333		0.241019
10 (2)	1	0.04118	0.047897	0.454098	0.106641	0.013127	0.014148	0.13322	0.052939
	2	0.04119	0.047934	0.455803	0.107018	0.014887	0.015937	0.194649	0.048192
	3	0.044171	0.051682	0.468413	0.11082	0.016966	0.017877	0.216307	0.036984
15 (3)	1	0.041271	0.0436	0.066418	0.038807	0.013131	0.013601	0.027857	0.024885
	2	0.041282	0.043601	0.066952	0.038633	0.014898	0.015322	0.027865	0.019819
	3	0.04425	0.046808	0.069993	0.039724	0.016993	0.0173	0.023221	0.012644
20 (4)	1	0.041338	0.042512	0.017865	0.019802	0.013135	0.013416	0.009689	0.014983
	2	0.041351	0.042513	0.01786	0.0196	0.014907	0.015136	0.008618	0.010775
	3	0.044329	0.045574	0.018889	0.019581	0.017008	0.017157	0.005873	0.006147

Таблица 2. Результаты расчетов на устойчивость для четырехслойной панели

m (J)	l	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
		Anslys	Nastran	$\Delta\lambda_l^J$ _{dens}	$\Delta\lambda_l^J$ _{sys}	Anslys	Nastran	$\Delta\lambda_l^J$ _{dens}	$\Delta\lambda_l^J$ _{sys}
		λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}			λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}		
5 (1)	1	0.22137	0.313708		0.24405	0.059583	0.064182		0.052553
	2	0.22164	0.314054		0.24397	0.089667	0.106611		0.122084
	3	0.24866	0.361374		0.2613	0.092295	0.107605		0.108312
10 (2)	1	0.21947	0.237752	0.194788	0.056547	0.059647	0.061503	0.030152	0.02166
	2	0.21957	0.237847	0.195276	0.056508	0.089045	0.093796	0.090434	0.036745
	3	0.24257	0.264684	0.218415	0.061653	0.092161	0.095597	0.083573	0.025879
15 (3)	1	0.22012	0.228118	0.029245	0.025234	0.059733	0.061023	0.005536	0.015106
	2	0.22023	0.228165	0.029382	0.025027	0.089101	0.091599	0.016756	0.019551
	3	0.24336	0.25244	0.033484	0.0259	0.092324	0.094115	0.011045	0.013587
20 (4)	1	0.22038	0.225498	0.008168	0.016233	0.05975	0.060881	0.001647	0.013258
	2	0.22049	0.225556	0.008132	0.016062	0.089114	0.090885	0.005532	0.013917
	3	0.24369	0.249288	0.008884	0.016059	0.09238	0.093702	0.003111	0.010048

Таблица 3. Результаты расчетов на устойчивость для шестислойной панели

m (J)	l	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
		Anslys	Nastran	$\Delta\lambda_l^J$ _{dens}	$\Delta\lambda_l^J$ _{sys}	Anslys	Nastran	$\Delta\lambda_l^J$ _{dens}	$\Delta\lambda_l^J$ _{sys}
		λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}			λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}		
5 (1)	1	0.49194	0.621187		0.164207	0.11925	0.124662		0.031379
	2	0.49726	0.637315		0.174574	0.19543	0.205752		0.036386
	3	0.58088	0.759645		0.188592	0.23242	0.269961		0.105679
10 (2)	1	0.49247	0.517508	0.128765	0.035059	0.1194	0.121185	0.020001	0.010493
	2	0.49777	0.523831	0.138217	0.036077	0.19629	0.198578	0.025092	0.008194
	3	0.57798	0.610707	0.153705	0.038936	0.23147	0.240995	0.080172	0.028511
15 (3)	1	0.49349	0.504651	0.017788	0.015813	0.11946	0.120688	0.002906	0.007232
	2	0.49891	0.510332	0.01846	0.016005	0.19656	0.198183	0.001408	0.005815
	3	0.57956	0.593118	0.020663	0.016351	0.23154	0.236193	0.014231	0.014069
20 (4)	1	0.49383	0.501208	0.004841	0.010486	0.11946	0.120554	0.000786	0.006446
	2	0.4993	0.506773	0.004949	0.010505	0.19663	0.198232	0.000175	0.005738
	3	0.58008	0.588961	0.004973	0.010744	0.23154	0.234609	0.004758	0.009311

Таблица 4. Результаты расчетов на устойчивость для восьмислойной панели

m (J)	l	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
		Anslys	Nastran	$\Delta\lambda_l^J$ _{dens}	$\Delta\lambda_l^J$ _{sys}	Anslys	Nastran	$\Delta\lambda_l^J$ _{dens}	$\Delta\lambda_l^J$ _{sys}
		λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}			λ_l^{AJ}	λ_l^{NJ}		
5 (1)	1	0.85034	1.037125		0.139952	0.207	0.214933		0.026589
	2	0.88451	1.11144		0.160789	0.32906	0.340057		0.023243
	3	1.052	1.359001		0.180077	0.4485	0.486518		0.057502
10 (2)	1	0.85301	0.889333	0.108494	0.029482	0.2071	0.209392	0.018467	0.007783
	2	0.88757	0.928106	0.127123	0.031573	0.33038	0.332184	0.016563	0.003851
	3	1.0538	1.105432	0.14551	0.033817	0.44795	0.460414	0.038986	0.019405
15 (3)	1	0.85449	0.871075	0.014667	0.013592	0.20714	0.208592	0.002707	0.004939
	2	0.8894	0.907338	0.016002	0.014119	0.33072	0.332236	0.000111	0.003234
	3	1.0565	1.07816	0.017663	0.01435	0.44819	0.454998	0.008367	0.01066
20 (4)	1	0.85476	0.86619	0.003977	0.009393	0.2071	0.208358	0.000794	0.004282
	2	0.88977	0.90197	0.004196	0.009629	0.33074	0.33254	0.000647	0.003838
	3	1.0569	1.072123	0.00397	0.010112	0.44813	0.453128	0.002912	0.007843

Рекомендуемая плотность сетки выбиралась из условия:

$$(\min(\Delta\lambda_{I\ dens}^J) \text{ и } \min(\Delta\lambda_{I\ sys}^J)) \text{ при } \min(m),$$

т.е. из условия, что значения погрешностей $\Delta\lambda_{I\ dens}^J$ и $\Delta\lambda_{I\ sys}^J$ будут минимальными при наименьшей возможной плотности сетки.

Анализ данных из таблиц 1 - 4 производился следующим образом. Варианты меширования, при которых хотя бы одно из значений параметров $\Delta\lambda_{I\ dens}^J$ и $\Delta\lambda_{I\ sys}^J$ превышает 0.10 (больше 10%), классифицируются как «некорректные». Варианты меширования, при которых значения обоих параметров $\Delta\lambda_{I\ dens}^J$ и $\Delta\lambda_{I\ sys}^J$ лежат в диапазонах от 0.05 до 0.10 (5..10%), от 0.02 до 0.05 (2..5%) и от 0.01 до 0.02 (1..2%), классифицируются соответственно как «не-рекомендуемые», «оптимальные» и «с минимальной погрешностью». Варианты меширования, при которых значения обоих параметров $\Delta\lambda_{I\ dens}^J$ и $\Delta\lambda_{I\ sys}^J$ меньше 0.01 (меньше 1%), классифицируются как варианты «с высокой точностью».

При выборе оптимальной плотности меширования кроме параметров $\Delta\lambda_{I\ dens}^J$ и $\Delta\lambda_{I\ sys}^J$ принимался во внимания также факт совпадения или несовпадения самих форм потери устойчивости при расчете в Nastran и Ansys. Результаты сравнения по первым трем формам потери устойчивости приведены в табл. 5.

Таблица 5. Совпадение по формам потери устойчивости

Сетка к.э.	I	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
		2 слоя	4 слоя	6 слоев	8 слоев	2 слоя	4 слоя	6 слоев	8 слоев
5	1	--	++	+-	+-	++	++	++	++
	2	--	+-	++	++	+-	--	+-	+-
	3	--	--	++	++	++	--	++	+-
10	1	++	++	++	++	++	++	++	++
	2	++	+-	++	++	+-	++	+-	+-
	3	+-	++	++	++	++	+-	++	++
15	1	++	++	++	++	++	++	++	++
	2	++	++	++	++	+-	++	+-	+-
	3	++	++	++	++	++	+-	++	++
20	1	--	++	++	++	++	++	++	++
	2	--	+-	++	++	++	++	+-	+-
	3	++	++	++	++	++	+-	++	++

В табл. 5 использованы следующие обозначения: “++” – полное совпадение по I-й форме потери устойчивости; “+-” – неполное совпадение I-й форме потери устойчивости; “--” – полное несовпадение по I-й форме потери устойчивости.

Под “неполным совпадением” понимается совпадение во всем, кроме знака перемещения вдоль оси Z (все пики совпадают, но с противоположным знаком).

На рис. 7 отображены узловые перемещения по оси Z при первой и второй формах потери устойчивости, полученные в Ansys и Nastran для панели, нагруженной сдвигом. На рис. 8 аналогичным образом показаны перемещения по Z для панели, нагруженной сжатием. Графические результаты приведены только для четырехслойной панели и варианта меширования с 10 элементами вдоль ширины ячейки.

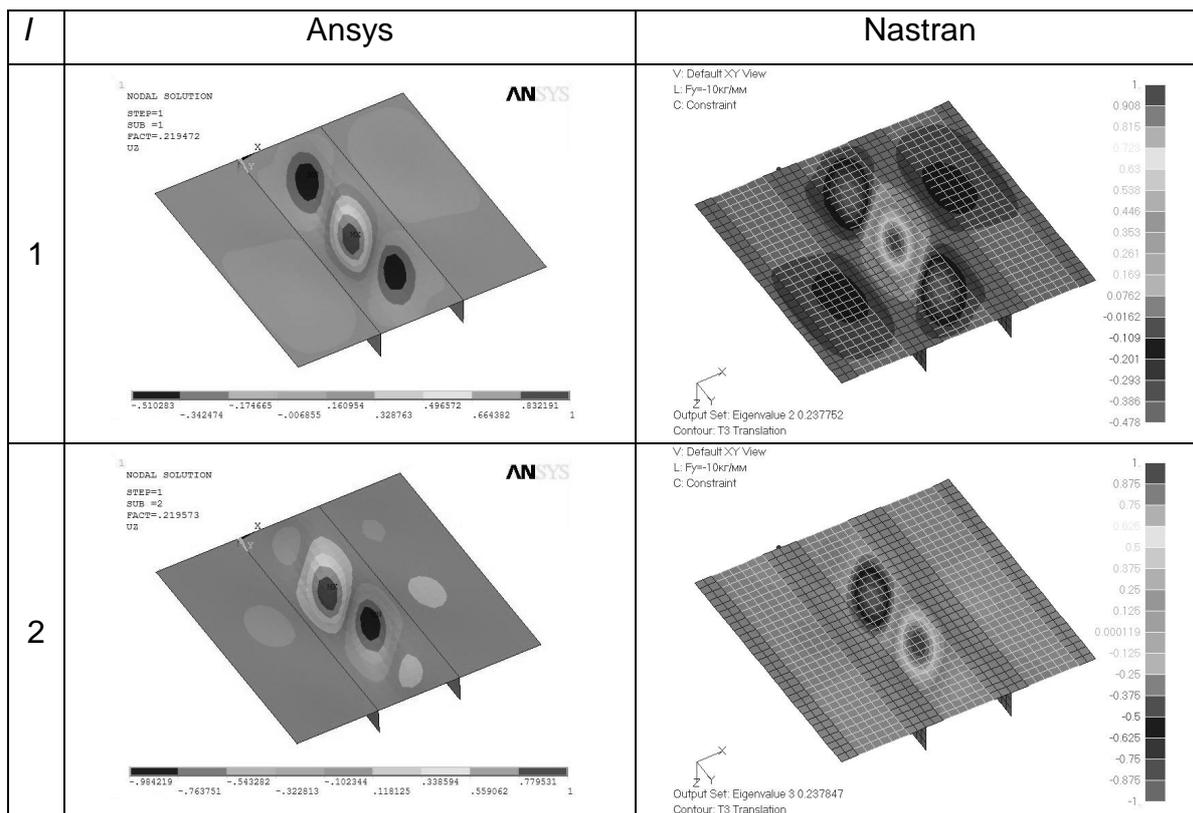


Рис. 7. Перемещения по Z при 1-й и 2-й формах потери устойчивости для четырехслойной панели, нагруженной сдвигом

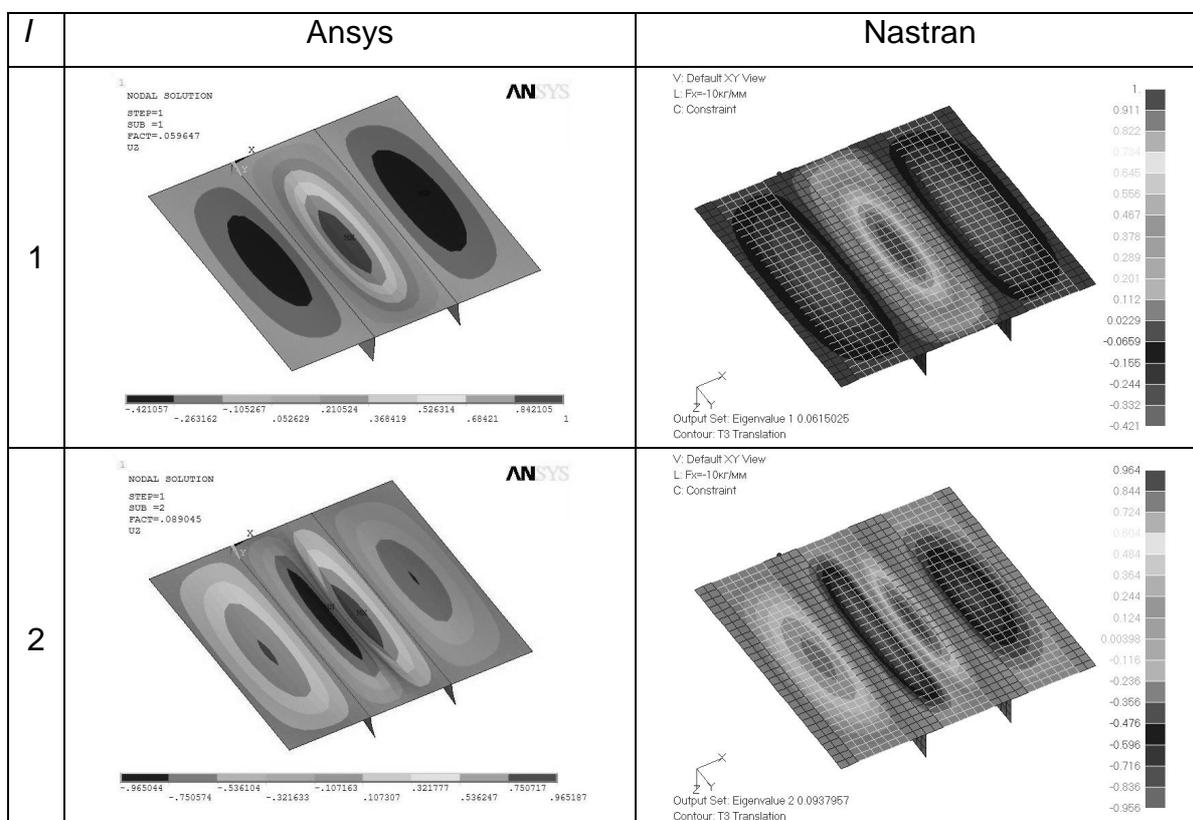


Рис. 8. Перемещения по Z при 1-й и 2-й формах потери устойчивости для четырехслойной панели, нагруженной сжатием

Также для контроля влияния плотности сетки на точность результатов проводилось сравнение по максимальному эквивалентному напряжению. Под максимальным эквивалентным напряжением понимается максимальное напряжение по Мизесу в первом слое среднего пролета панели S_e , полученное в результате линейного анализа напряженного состояния (НС), предшествующего анализу на устойчивость.

При этом для каждого варианта меширования вычислялись следующие параметры:

$$\Delta S_e^J_{dens} = CKO(S_e^{N(J-1)}, S_e^{NJ})/CP(S_e^{N(J-1)}, S_e^{NJ}), \text{ где } J = 2,3,4;$$

$$\Delta S_e^J_{sys} = CKO(S_e^{NJ}, S_e^{AJ})/CP(S_e^{NJ}, S_e^{AJ}), \text{ где } J = 1,2,3,4.$$

Результаты анализа НС представлены в табл. 6, 7, 8 и 9 для соответствующих вариантов конфигурации панели.

Таблица 6. Результаты анализа НС для двухслойной панели

$m (J)$	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
	Anslys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$	Anslys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$
	S_e^{AJ}	S_e^{NJ}			S_e^{AJ}	S_e^{NJ}		
5 (1)	38.825	38.54		0.00521	23.929	22.34		0.048568
10 (2)	39.017	38.63	0.001649	0.007049	25.711	24.85	0.075221	0.024083
15 (3)	39.035	38.67	0.000732	0.006643	26.534	26.01	0.032255	0.014103
20 (4)	39.081	38.7	0.000548	0.006927	26.937	26.6	0.01586	0.008902

Таблица 7. Результаты анализа НС для четырехслойной панели

$m (J)$	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
	Anslys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$	Anslys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$
	S_e^{AJ}	S_e^{NJ}			S_e^{AJ}	S_e^{NJ}		
5 (1)	19.389	19.27		0.004353	13.296	11.61		0.095735
10 (2)	19.366	19.3	0.0011	0.002414	13.521	13.01	0.080418	0.027238
15 (3)	19.423	19.32	0.000732	0.00376	13.917	13.62	0.032395	0.015253
20 (4)	19.444	19.33	0.000366	0.004158	15.633 *	13.94 *	0.01642	0.080961

Таблица 8. Результаты анализа НС для шестислойной панели

$m (J)$	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
	Anslys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$	Anslys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$
	S_e^{AJ}	S_e^{NJ}			S_e^{AJ}	S_e^{NJ}		
5 (1)	12.926	12.85		0.00417	8.282	7.867		0.036343
10 (2)	12.867	12.88	0.001649	0.000714	11.573 *	9.35 *	0.121814	0.150256
15 (3)	12.914	12.9	0.001097	0.000767	13.453 *	10.89 *	0.107603	0.148898
20 (4)	12.931	12.91	0.000548	0.001149	15.008 *	12.16 *	0.07792	0.148251

Таблица 9. Результаты анализа НС для восьмислойной панели

$m (J)$	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
	Ansys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$	Ansys	Nastran	$\Delta S_e^J_{dens}$	$\Delta S_e^J_{sys}$
	S_e^{AJ}	S_e^{NJ}			S_e^{AJ}	S_e^{NJ}		
5 (1)	10.034	9.645		0.027955	8.898	6.887		0.18017
10 (2)	10.047	9.662	0.001245	0.027626	11.295 *	8.885 *	0.179153	0.168893
15 (3)	10.016	9.671	0.000658	0.024783	13.041 *	10.35 *	0.107711	0.162697
20 (4)	10.021	9.678	0.000512	0.024624	14.465 *	11.54 *	0.07688	0.159068

Некоторые значения эквивалентных напряжений S_e^{AJ} и S_e^{NJ} в таблицах помечены символом “*”. В данных случаях максимальное эквивалентное напряжение в первом слое было получено не в середине центрального пролета панели, а в его подкрепляющей полке. Но, как уже было показано в разделе описания исследуемого объекта, элементам пролетов панели и элементам подкрепляющих полок присвоены различные свойства элемента - *Property 1* и *Property 2*. При этом слой 1 элемента пролета панели не соответствует слою 1 подкрепляющей полки. Таким образом, помеченные значения эквивалентных напряжений не были использованы при анализе влияния плотности сетки на точность результатов из-за их неоднозначности. В остальном оценка результатов анализа напряжений для различных вариантов меширования производилась по аналогии с оценкой результатов анализа форм потери устойчивости.

Результаты исследования

Рекомендуемая для задач устойчивости плотность сетки конечно-элементного моделирования панели из композиционного материала при заданном соотношении параметров l/δ представлена в табл. 10.

Таблица 10. Рекомендуемая плотность сетки моделирования для расчета на устойчивость панели из композиционного материала

Сетка к.э.	Сдвиг (вариант нагружения А)				Сжатие (вариант нагружения В)			
	2 слоя	4 слоя	6 слоев	8 слоев	2 слоя	4 слоя	6 слоев	8 слоев
5	-	-	-	-	-	-	о	о
10	-	с	о	о	о	о	+	+
15	о	о	+	+	+	+	++	++
20	+	+	++	++	++	++	++	++

В таблице использованы следующие обозначения: “-” - вариант меширования, дающий максимальную погрешность результатов (некорректный); “с” - средний вариант меширования, дающий незначительную погрешность результатов (не рекомендуется); “о” - оптимальный вариант меширования, обеспечивающий достаточную точность при относительно небольшой плотности сетки при небольшом времени расчета; “+” - вариант меширования, обеспечивающий минимальную погрешность результатов; “++” - вариант

меширования, обеспечивающий высокую точность результатов (приводит к увеличению времени расчета из-за большой плотности сетки).

Выводы

Рекомендуемая плотность сетки конечных элементов для анализа потери устойчивости исследованной панели следующая:

- при нагружении сдвигом:
 - для двухслойной панели (с соотношением $l/\delta = 333.3$) - 20 элементов (вдоль ширины ячейки панели),
 - для четырехслойной панели (с соотношением $l/\delta = 166.7$) - 20 элементов,
 - для шестислойной панели (с соотношением $l/\delta = 111.1$) - 15 элементов,
 - для восьмислойной панели (с соотношением $l/\delta = 83.3$) - 15 элементов;
- при нагружении сжатием:
 - для двухслойной панели - 15 элементов,
 - для четырехслойной панели - 15 элементов,
 - для шестислойной панели - 10 элементов,
 - для восьмислойной панели - 10 элементов.

При необходимости экономии машинных и временных ресурсов можно также использовать менее плотную сетку:

- при нагружении сдвигом:
 - для двухслойной панели - 15 элементов,
 - для четырехслойной панели - 15 элементов,
 - для шестислойной панели - 10 элементов,
 - для восьмислойной панели - 10 элементов;
- при нагружении сжатием:
 - для двухслойной панели - 10 элементов,
 - для четырехслойной панели - 10 элементов,
 - для шестислойной панели - 5 элементов,
 - для восьмислойной панели - 5 элементов.

Однако такое уменьшение плотности сетки вызывает некоторое снижение точности результатов.

Дальнейшее уменьшение плотности сетки не рекомендуется, так как это приводит к существенным погрешностям расчета.

Список литературы

1. Рычков С.П. MSC.visual Nastran для Windows.- М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.
2. Басов К.А. Ansys: Справочник пользователя.- М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
3. Каплун А.Б. Ansys в руках инженера. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
4. Чигарев А.В. Ansys для инженеров. - М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.