

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ТЕРМОНЕРАВНОВЕСНОСТИ ИХ СТРУКТУРЫ**

В современной авиационной и ракетно-космической технике широко применяются панельные конструкции, изготавливаемые из полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих высокой удельной жесткостью и прочностью. Эффективная эксплуатация таких композитных панелей требует сохранения в заданных пределах их геометрии и обеспечения несущей способности конструкции при регламентированных внешних воздействиях. Как известно, образование структуры волокнистого ПКМ происходит в результате установления физико-химических связей между поверхностями армирующих материалов и полимерной матрицей в условиях повышенных температур (160...180°C) с последующим охлаждением до окружающей комнатной температуры [1]. Вследствие различия их термоупругих свойств в композитных слоистых панелях при их изготовлении из разноориентированных слоев образуются остаточные технологические напряжения и деформации (коробление), что предопределяет их начальное напряженное состояние и геометрическую точность готового изделия.

Слоистые панели, изготовленные из волокнистых ПКМ, как правило, имеют постоянную толщину\* и разделяются на панели с симметричной и несимметричной структурами по толщине. Обычно композитные слоистые панели стараются изготавливать так, чтобы каждому слою с определенными свойствами материала, толщиной и ориентацией волокон, расположенному с одной стороны относительно срединной плоскости панели, соответствовал равностоящий по другую сторону от нее слой с такими же свойствами, толщиной и ориентацией волокон. Симметричные по толщине слоистые панели не испытывают коробления при изготовлении, и появление трещин в таких изделиях является практически единственным признаком, свидетельствующим о наличии в них остаточных напряжений, вызванных мембранным взаимодействием слоев между собой [1]. Если указанная симметрия нарушается хотя бы для одной пары слоев, например вследствие погрешности технологического процесса, то слоистая композитная панель оказывается термонеуравно-

---

\* В работе [2] получены зависимости для обоснованного назначения полей допусков для физико-механических и прочностных характеристик ПКМ в результате изменения толщины формируемого полуфабриката (препрега) и изделия.

вешенной. В этом случае в результате приложения термических нагрузок в процессе изготовления панели будет наблюдаться мембранно-изгибное взаимодействие слоев и, как следствие, появление коробления в виде нормального к срединной поверхности перемещения – прогиба. Это свойство и особенности поведения несимметричных слоистых композитов, хотя и не являются неожиданными, но до настоящего времени мало изучены [1].

При проектировании слоистых панелей из ПКМ довольно часто оказывается необходимым изменять как соотношение числа слоев, так и порядок их укладки. Учитывая вышесказанное, представляется актуальным исследование влияния разнесения относительно срединной плоскости композитной панели термонеровесных слоев на ее остаточное напряженно-деформированное состояние (НДС).

Рассмотрим заполимеризованную композитную панель, подлежащую после освобождения ее из оснастки монтажу в жесткий каркас сборной конструкции. Примем, что паковка отформована из шести монослоев толщиной  $\delta$  при температуре  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ . Приращение температуры примем однородным по толщине панели. Будем исходить из того, что структуры пакета (рис. 1) являются заданными. Рассмотрим одну симметричную терморавновесную структуру (рис. 1, а) и три несимметричные с разной степенью термонеровесности (рис. 1, б - г). Введем понятие условной степени термонеровесности паковки. Пусть паковка в общем случае состоит из  $m$  слоев. Тогда условную степень термонеровесности  $\xi$  паковки будем называть суммарное отстояние пар термонеровесных слоев от геометрической срединной плоскости паковки, отнесенное к ее толщине

$$\xi = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \delta_j}{\sum_{i=1}^m n_i \delta_i},$$

где  $n_j$ ,  $\delta_j$  – номер и толщина  $j$ -го термонеровесного монослоя;  $k$  – число пар термонеровесных монослоев в паковке (отсчет пар термонеровесных слоев ведется от срединной плоскости);  $m$  – общее число монослоев в паковке;  $\delta_j$  – толщина  $i$ -го монослоя.

Тогда для структур, показанных на рис. 1, б - г

а)  $\xi = 0/6 = 0$ ; б)  $\xi = 1/6 = 0,167$ ;

в)  $\xi = 2/6 = 0,334$ ; г)  $\xi = 3/6 = 0,5$ .

В качестве возможных наполнителей для паковки композитной панели рассмотрим три наиболее применяемых в настоящее время: углеволокно, стекловолокно и органоволокно.

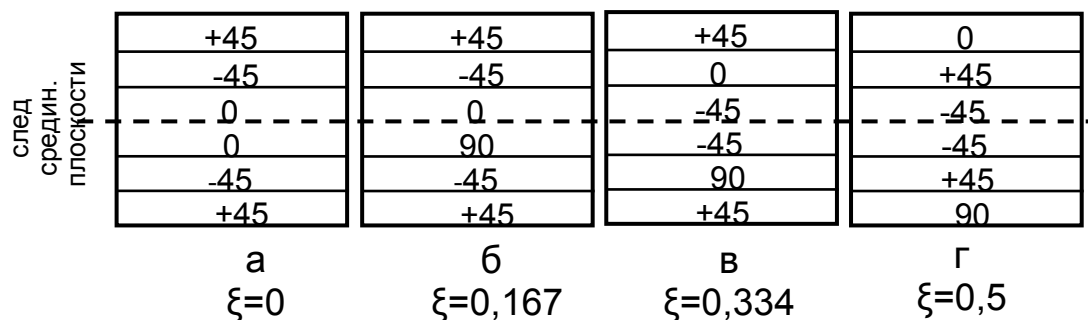


Рисунок 1 – Рассматриваемые структуры пакета с разной степенью условной термонравновесности:

а – терморавновесная; б – минимальная; в – средняя; г – высокая

Принятые для расчетов физико-механические характеристики (ФМХ) монослоев ПКМ на их основе приведены в табл. 1 [3 – 5] \*.

Таблица 1 – Принятые для расчетов ФМХ монослоев ПКМ

ФМХ монослоя	Тип ПКМ	Углепластик однонаправленный			Стекло- пластик одна- прав- ленный	Органопла- стик однонаправ- ленный	
		[3]	[4]	[4]		[3]	[3]
Модуль упругости вдоль волокон $E_1$ , ГПа		100	142,8	114,2	45	80	81,8
Модуль упругости поперек волокон $E_2$ , ГПа		10	9,13	8,1	10	5,5	5,1
Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа		6	5,49	3,94	5	2	1,82
Коэффициент Пуассона $\mu_{12}$		0,35	0,32	0,34	0,3	0,31	0,31
Коэффициент температурного линейного расширения вдоль волокон $\alpha_1 \cdot 10^{-6}$ , 1/гр		0	0	-0,011	8	-4	-4
Коэффициент температурного линейного расширения поперек волокон $\alpha_2 \cdot 10^{-6}$ , 1/гр		30	27,7	30,6	25	60	79
Предел прочности при растяжении вдоль волокон $\sigma_{\epsilon 1}^+$ , МПа		900	1400	1322	800	1600	1850
Предел прочности при сжатии вдоль волокон $\sigma_{\epsilon 1}^-$ , МПа		700	1108	719	1000	300	235
Предел прочности при растяжении поперек волокон $\sigma_{\epsilon 2}^+$ , МПа		50	34,5	35,3	50	16	7,9
Предел прочности при сжатии поперек волокон $\sigma_{\epsilon 2}^-$ , МПа		120	186	133	40	300	53
Предел прочности при сдвиге $\tau_{\epsilon 12}$ , МПа		75	74	112	60	30	24,4
Толщина монослоя $\delta$ , мм		0,12	0,12	0,12	0,15	0,12	0,12

\* Полных комплектов свойств монослоев, необходимых для определения НДС паковки в вызывающих доверие источниках, весьма мало. К ним можно отнести опубликованные в [4] для углепластиков и [5] для органопластика. Они достаточно существенно отличаются от приведенных в работе [3].

Если предположить, что при монтаже панели, т.е. ее насильственным возвращении в ограничивающий жесткий каркас, происходит полный возврат перемещений панели в напряженное состояние, то можно считать взаимнообратимыми задачи коробления заневоленной панели в жесткой окантовке и коробления идентичной ей свободной панели по напряженному состоянию, возникающему в первом случае до выемки изделия из формообразующей оснастки, а во втором – при монтажном заневоливании ранее свободной панели. Тогда определение монтажных напряжений является обратной задачей относительно рассматриваемой нами прямой – коробления заполимеризованной панели после освобождения ее из оснастки, когда технологические остаточные напряжения трансформируются в прогибы со стрелой  $W$ .

Известны решения обратной задачи на основе аналитических моделей [1, 6]. Так, в работе [1] разработаны модели и алгоритмы, позволяющие оценить поведение панелей из ПКМ при их свободном короблении, а также при монтаже в жесткий каркас. Однако в данной работе рассмотрены только плоские панели с симметричными граничными условиями. В работе [6] проведены аналитические исследования монтажных напряжения плоских пластин и панелей одинарной кривизны из ПКМ на основе препрегов из углеродных волокон различных структур, обладающих разной степенью термонеровесности при различных условиях опирания панели. Однако в данной работе для оценки уровня монтажных напряжений применен критерий максимальных напряжений, что, по мнению авторов, не является достаточно корректным для рассматриваемого слоистого ортотропного композита, подверженного сложному напряженному состоянию, и может внести существенные погрешности в оценку несущей способности панели. Поэтому в дальнейшем для оценки уровня (индекса) напряженности  $\psi$  будем использовать энергетический критерий разрушения Мизеса – Хилла [1]\*

$$\frac{\sigma_{1i}^2}{\sigma_{e1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}\sigma_{2i}}{\sigma_{e1i}\sigma_{e2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2}{\sigma_{e2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2}{\tau_{e12i}^2} = \psi_i \leq 1, \quad (1)$$

где  $\sigma_{1i}$ ,  $\sigma_{2i}$ ,  $\tau_{12i}$ ,  $\sigma_{e1i}$ ,  $\sigma_{e2i}$ ,  $\tau_{e12i}$  – действующие напряжения в  $i$ -м слое ПКМ и его пределы прочности в системе координат 102, где направление 1 соответствует расположению армирующих волокон однонаправленного монослоя.

Под индексом напряженности будем понимать численное значение правой части принятого критерия прочности ПКМ  $\psi \leq 1$ , который при исчерпании несущей способности материала в рассматриваемой точке ра-

---

\*В работе [1] указывается, что данный критерий удовлетворительно соответствует результатам испытаний на прочность слоистых ПКМ. В то же время вид критерия (1) не является принципиальным и может быть принят в ином виде, который в большей степени отвечает результатам испытаний того или иного конкретного класса ПКМ.

вен единице. Картина значений индекса напряженности различна как в каждой точке панели, так и в каждом монослое паковки, поэтому будем выявлять его максимальное значение  $\psi_{max}$  для всей панели, не локализуя конкретно местоположение монослоя и координаты точки.

Для определения НДС рассматриваемой панели под действием температурного поля был использован один из программных комплексов конечно-элементного анализа, возможности которых позволяют решать широкий круг задач [7].

В табл. 2 приведены полученные результаты расчетов для свободноопертой панели размерами 500x500 мм различной условной степени термонеровесности структуры (рис. 1).

На рис. 2 показана зависимость относительного прогиба

$$\bar{W}_{max} = \frac{W_{max}}{\delta_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где  $W_{max}$  – величина максимального прогиба,  $\delta_{\Sigma}$  – суммарная толщина паковки ПКМ.

Таблица 2 – Результаты расчетов для свободноопертой панели размерами 500x500 мм различной условной термонеровесности  $\xi$  структуры ПКМ

Материал ПКМ	Степень условной термонеровесности							
	$\xi=0$		$\xi=0,167$		$\xi=0,334$		$\xi=0,5$	
	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$
Углепластик однонаправленный [3]	0	0,047	0,434	0,048	1,43	0,05	2,5	0,051
Углепластик однонаправленный [4]	0	0,0168	0,302	0,0159	1,04	0,0163	1,848	0,0167
Углепластик однонаправленный [4]	0	0,0268	0,365	0,0288	1,257	0,0298	2,22	0,03
Стеклопластик однонаправленный [3]	0	0,089	0,3	0,102	0,938	0,11	1,59	0,114
Органопластик однонаправленный [3]	0	0,023	0,768	0,012	2,69	0,013	4,75	0,013
Органопластик однонаправленный [5]	0	0,3	0,726	0,329	2,57	0,34	4,55	0,348

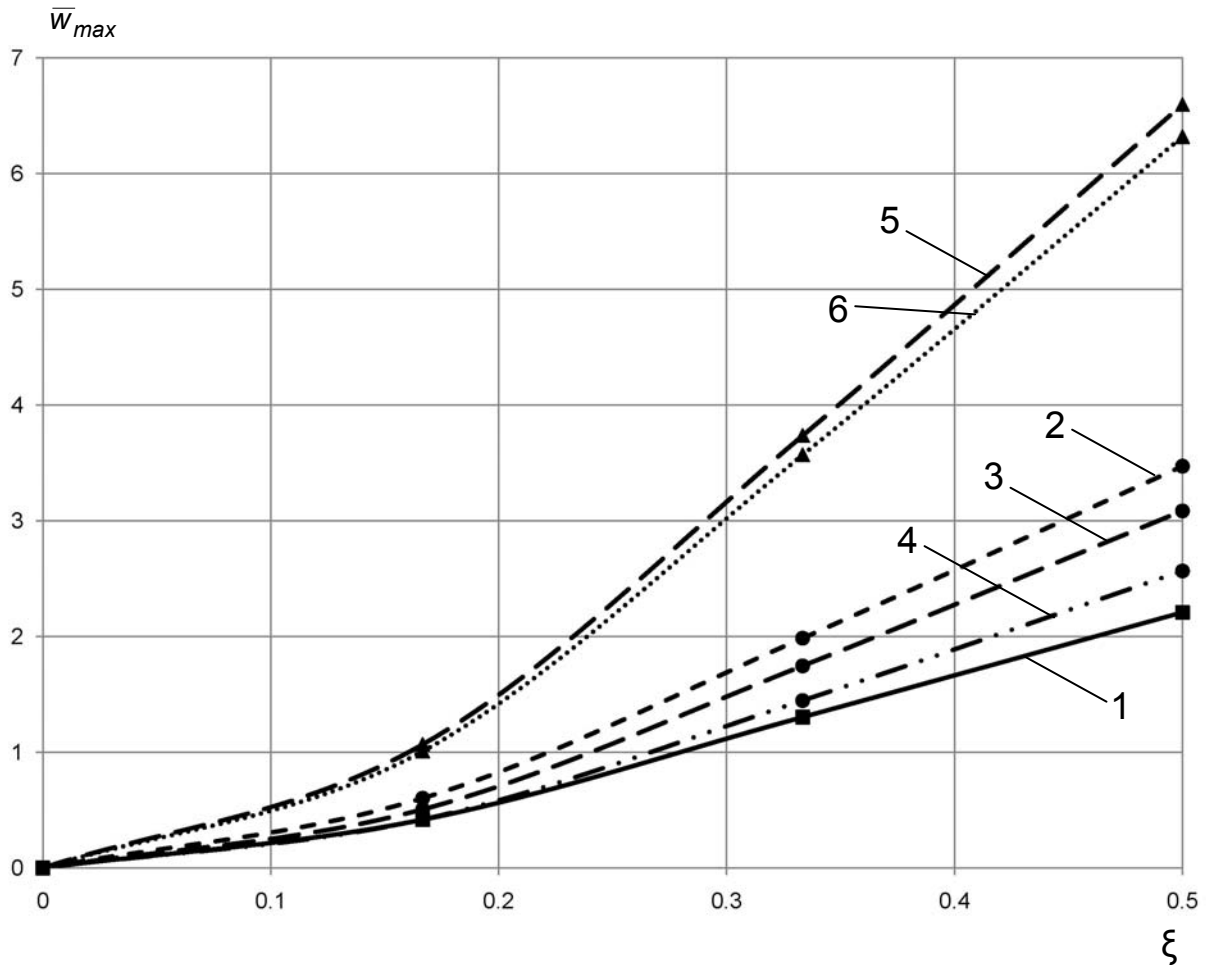


Рисунок 2 – Зависимость относительного прогиба панели  $\bar{W}_{max}$  от условной степени термонеровесности  $\xi$  структуры ПКМ: 1 – стеклопластик; 2, 3, 4 – углепластики; 5, 6 – органопластики

Как и следовало ожидать, анализ полученных результатов свидетельствует о существенном влиянии на НДС панели разнесения относительно ее срединной плоскости термонеровесных слоев. Так, к примеру, для однонаправленного углепластика при минимальном разнесении термонеровесных слоев величина относительного прогиба  $\bar{W}_{max} = 0,6$ , при среднем –  $\bar{W}_{max} = 1,98$ , а при максимальном – 3,47. При превращении исходной структуры ПКМ в терморавновесную прогиб равен нулю, т.е. коробление отсутствует.

На рис. 3 показана зависимость максимального значения индекса напряженности  $\psi_{max}$  от условной степени термонеровесности  $\xi$  структуры ПКМ при использовании данных табл. 1.

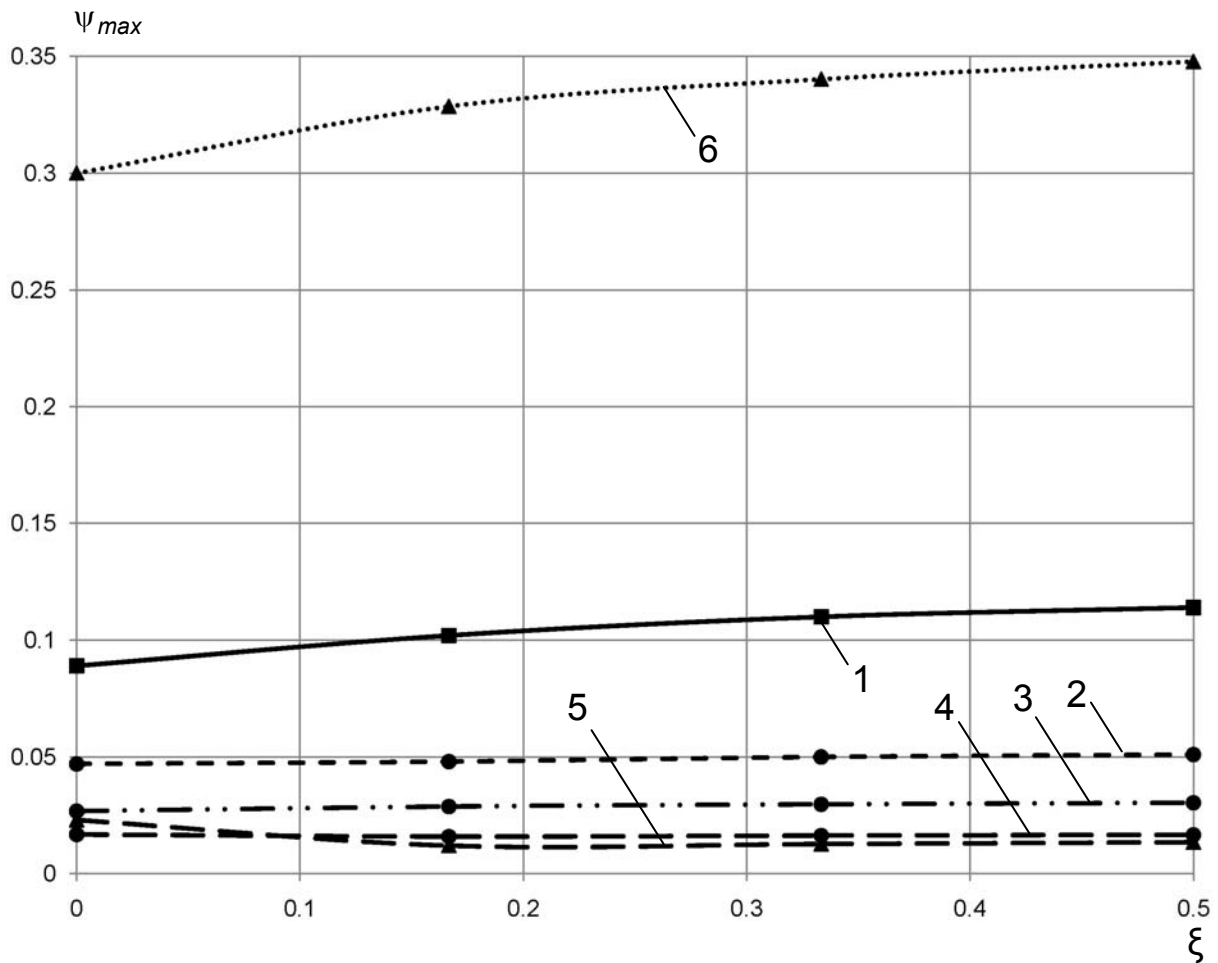


Рисунок 3 – Зависимость максимального значения индекса напряженности  $\psi_{max}$  панели от условной степени термонеровновесности  $\xi$  структуры ПКМ:  
 1 – стеклопластик; 2, 3, 4 – углепластики; 5, 6 – органопластики

Максимальный индекс напряженности  $\psi_{max}$  с увеличением термонеровновесности незначительно растет, изменяясь при этом очень слабо. Так для углепластиков относительное различие между  $\psi_{max}$  для минимального разнесения и максимального не превышает 6%, для стеклопластика – 11%, для органопластиков – 12%.

Анализ полученных данных позволил установить связь между относительным максимальным прогибом  $\bar{W}_{max}$  и индексом напряженности термонеуровновешенных структур различных ПКМ (рис. 4 – 6).

Полученные зависимости позволяют установить максимальный индекс напряженности локальной зоны  $\psi_{max}$ , измеряя ее максимальный прогиб  $W_{max}$  после формования с последующим его отнесением к суммарной толщине паковки  $\delta_{\Sigma}$  ПКМ.

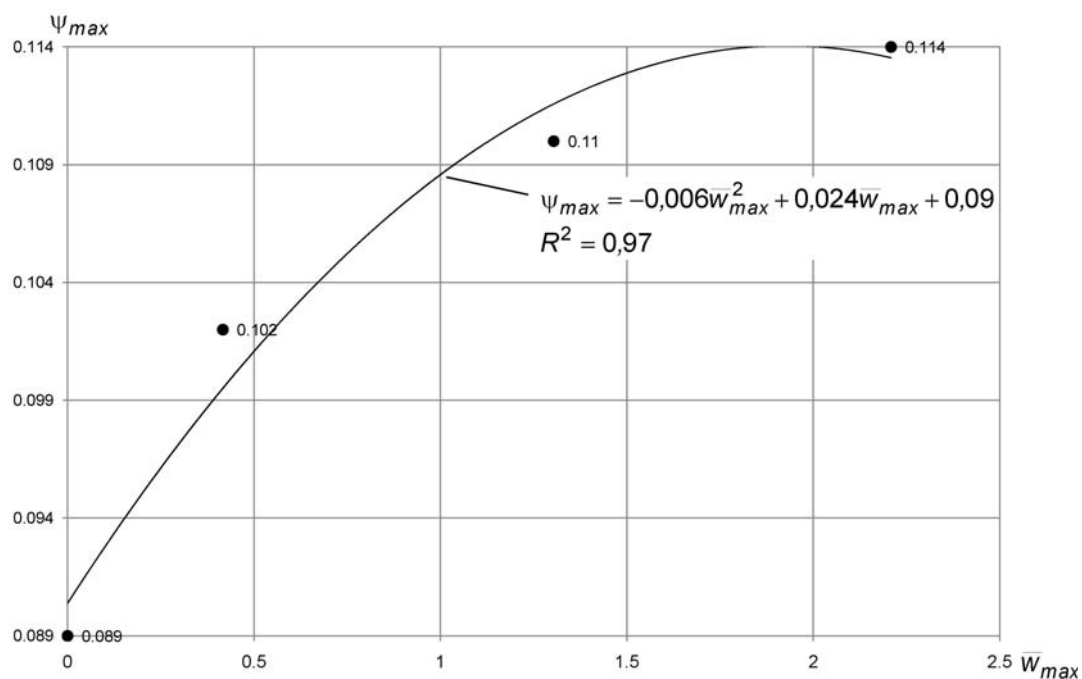


Рисунок 4 – Зависимость индекса максимальной напряженности свободноопертой стеклопластиковой панели от максимального относительного прогиба ( $R^2$  – коэффициент детерминации)

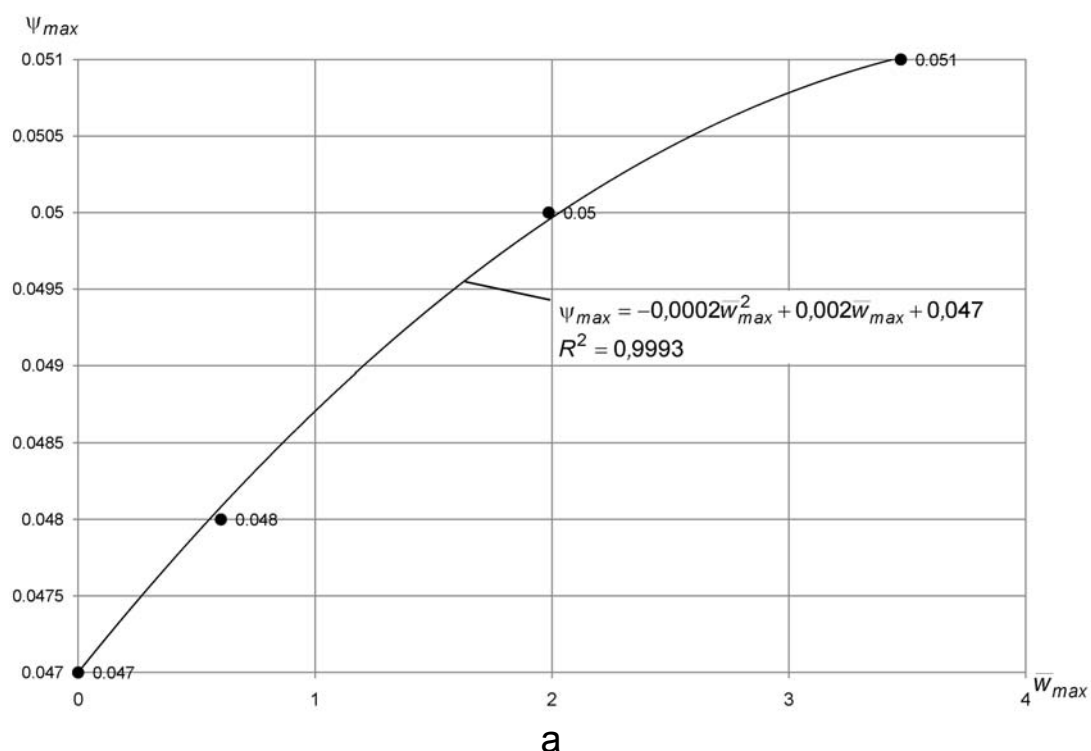


Рисунок 5 – Зависимость индекса максимальной напряженности свободноопертых углепластиковых панелей от максимального относительного прогиба ( $R^2$  – коэффициент детерминации):  
а – углепластик [3]; б, в – углепластик [4]



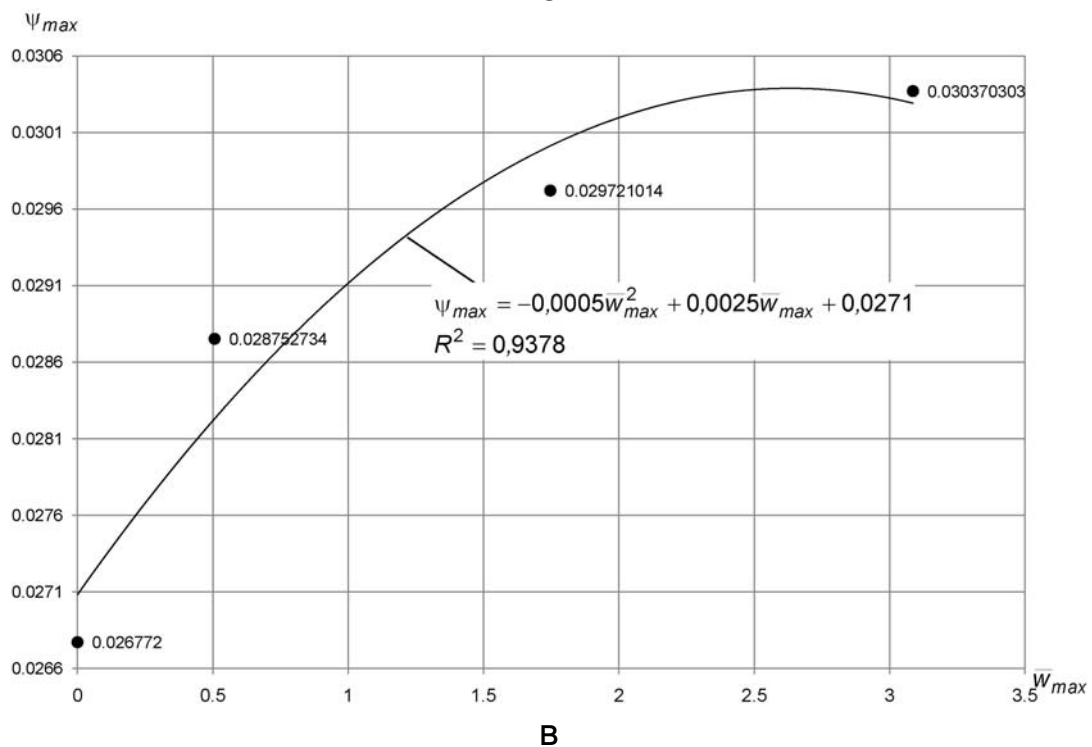
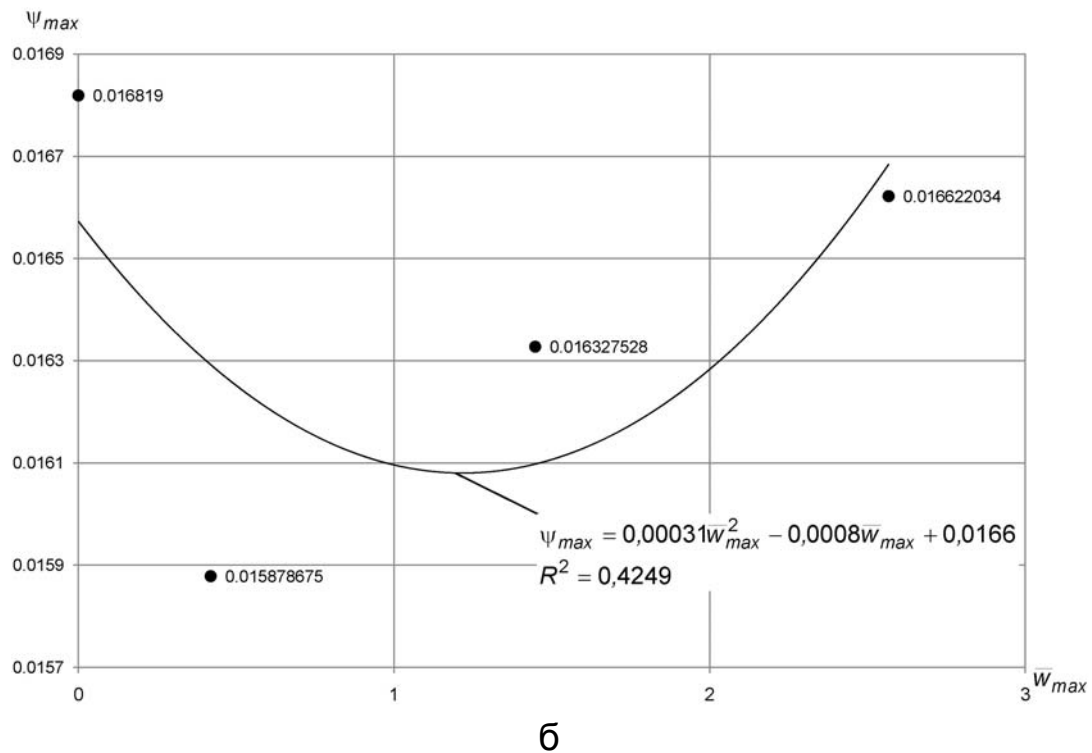
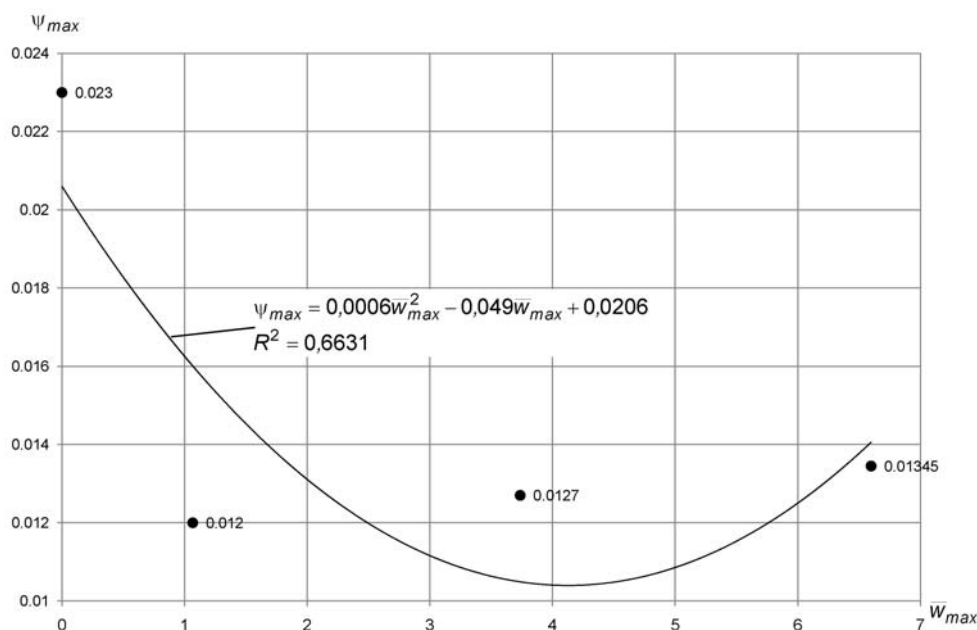
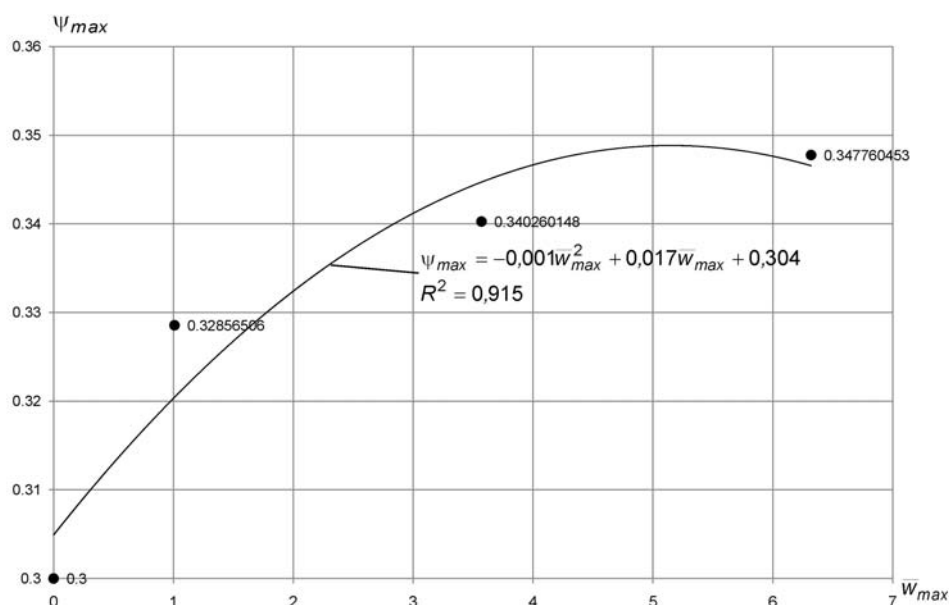


Рисунок 5 – Зависимость индекса максимальной напряженности свободноопертых углепластиковых панелей от максимального относительного прогиба ( $R^2$  – коэффициент детерминации):  
 а – углепластик [3]; б, в – углепластик [4]



а



б

Рисунок 6 – Зависимость индекса максимальной напряженности свободноопертой органопластиковой панели от максимального относительного прогиба ( $R^2$  – коэффициент детерминации):  
а – органопластик [3]; б – органопластик [5]

Исходные структуры (рис. 1) были исследованы в случае различных отклонений углов армирования монослоев в пределах  $-3^\circ \leq \Delta\varphi_j \leq 3^\circ$  и  $-5^\circ \leq \Delta\varphi_j \leq 5^\circ$ . При этом исходили из допущения, что диапазон отклонений  $\pm \Delta\varphi_j = 3^\circ$  может соответствовать механизированной или автоматизированной намотке (выкладке) структуры ПКМ, а  $\pm \Delta\varphi_j = 5^\circ$  – ручной выкладке. В результате исследования установлено, что при одинаковых отклонениях углов во всех монослоях в положительном или отрицательном

направлении  $+\Delta\varphi_j=3^\circ$ ,  $-\Delta\varphi_j=-3^\circ$  и  $+\Delta\varphi_j=5^\circ$ ,  $-\Delta\varphi_j=-5^\circ$  для всех рассматриваемых материалов наполнителя ПКМ отклонения  $\bar{W}_{max}$  и  $\psi_{max}$  от идеальной структуры ( $\pm\Delta\varphi_j=0^\circ$ ) не превышают 1%.

Более существенное влияние оказывает несимметричное распределение отклонений углов армирования.

Так, для свободноопертой панели из ПКМ на основе углеволокна:

- при  $\Delta\varphi_j=+3^\circ$  вверх от срединной поверхности и  $\Delta\varphi_j=-3^\circ$  вниз от нее  $\Delta\bar{W}_{max} \approx -11,7\%$ ;

- при  $\Delta\varphi_j=+5^\circ$  вверх от срединной поверхности и  $\Delta\varphi_j=-5^\circ$  вниз от нее  $\Delta\bar{W}_{max} \approx -18,6\%$ .

И в первом, и во втором случаях уровень изменения максимальной напряженности  $\Delta\psi_{max}$  не превысил 5%.

При допущении о том, что диапазоном отклонений углов армирования  $\Delta\varphi_j$  охвачены наибольшие отклонения  $\Delta\bar{W}_{max}$  и соответствующие им  $\Delta\psi_{max}$ , можно сделать вывод о том, что в этом диапазоне изменения максимальных прогибов либо пренебрежимо малы, либо имеют тенденцию к снижению, а изменения  $\psi_{max}$  лежат в пределах точности расчетов\*.

Исходные структуры были исследованы на случай изменения размеров свободноопертой панели: рассматривались габариты панели 250x500 мм и 500x250 мм (табл. 3 и 4). На рис. 7 для примера показаны картины распределения прогибов панели для ПКМ на основе углеволокна [3] минимальной степени термонеровновесности при различных габаритах панели.

Таблица 3 – Результаты расчетов для свободноопертой панели размерами 500x250мм различной условной термонеровновесной структуры

Материал ПКМ	Степень условной термонеровновесности							
	$\xi=0$		$\xi=0,167$		$\xi=0,334$		$\xi=0,5$	
	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\psi_{max}$
Углепластик однонаправленный [3]	0	0,047	-1,2	0,049	-4,33	0,052	-8,51	0,054
Стеклопластик однонаправленный [3]	0	0,089	-0,86	0,11	-2,84	0,12	-5,16	0,13
Органопластик однонаправленный [3]	0	0,023	-2,05	0,013	-8,14	0,014	-17,36	0,015

\*Однако представляется необходимым проведение дополнительных исследований в этом направлении.

Таблица 4 – Результаты расчетов для свободноопертой панели размерами 250х500 мм различной условной термонеровновесной структуры

Материал ПКМ	Степень условной термонеровновесности							
	$\xi=0$		$\xi= 0,167$		$\xi= 0,334$		$\xi=0,5$	
	$W_{max}$ , мм	$\Psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\Psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\Psi_{max}$	$W_{max}$ , мм	$\Psi_{max}$
Углепластик однонаправленный [3]	0	0,047	1,2	0,049	4,33	0,052	8,51	0,054
Стеклопластик однонаправленный [3]	0	0,089	0,86	0,11	2,84	0,12	5,16	0,13
Органопластик однонаправленный [3]	0	0,023	2,05	0,013	8,14	0,014	17,36	0,015

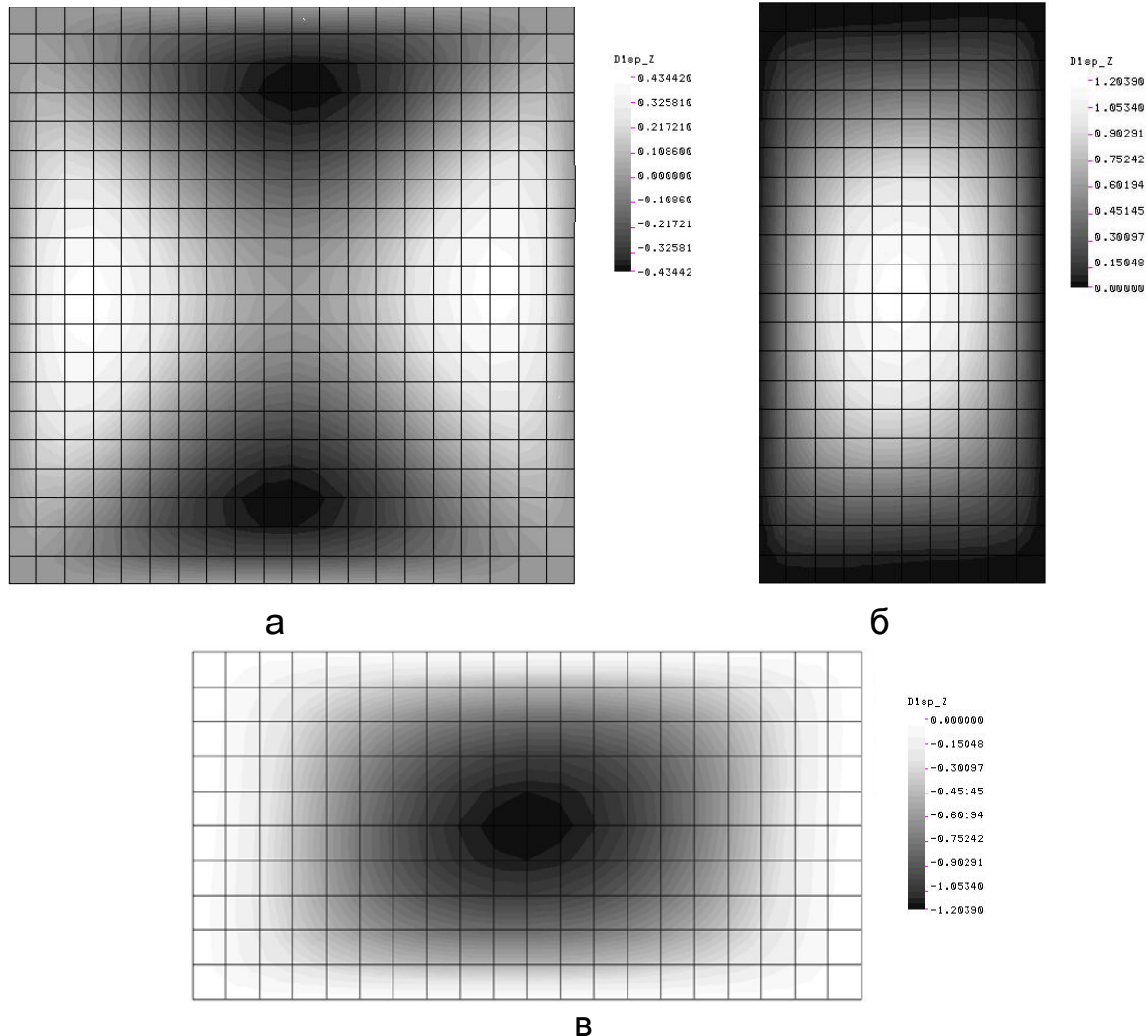


Рисунок 7 – Картины распределения прогибов для ПКМ на основе углеволокна [3] минимальной степени термонеровновесности  $\xi=0,167$  при различных габаритах панели:

а – 500х500 мм; б – 250х500 мм; в – 500х250 мм

При этом получен вполне прогнозируемый результат о существенном изменении величины  $\bar{W}_{max}$  по сравнению с исходной панелью 500x500 мм, в то время как уровень максимальной напряженности  $\psi_{max}$  практически не изменился. Этот вывод свидетельствует о существенной зависимости от габаритных размеров панели коэффициентов полиномиальной аппроксимации функции индекса максимальной напряженности от максимального относительного прогиба панели.

### Выводы

1. На основе конечно-элементного анализа выявлено наличие связи между индексом максимальной напряженности в определенной точке одного из монослоев паковки и ее относительным максимальным прогибом  $\psi_{max} = f(\bar{W}_{max})$ , аппроксимируемой для различных структур разных классов ПКМ полиномами с отличающимися коэффициентами.

2. Установленная связь является условной, так как координаты точек, определяющих  $\psi_{max}$  и  $\bar{W}_{max}$ , не совпадают. Кроме того даже для одной и той же структуры ПКМ, сформированной из монослоев разных классов или обладающих отличными свойствами, характер изменения этой связи может быть различен.

3. Наличие этой связи, конкретный вид которой должен устанавливаться при допустимых отклонениях в структуре теоретически до формирования изделия (панели), позволяет после его изготовления и измерения  $W_{max}$  прогнозировать индекс максимальной напряженности в критической точке структуры от остаточных температурных напряжений.

4. Установленная связь может оказаться в дальнейшем продуктивной при анализе совместного действия на изделие остаточных температурных монтажных или эксплуатационных воздействий и силовых нагрузок с учетом синергетического эффекта.

5. Изложенное выше свидетельствует об актуальности дальнейших исследований в плане учета уровня термонеравновесной структуры ПКМ различных классов, в том числе гибридных структур при проектировании и производстве ответственных панельных конструкций авиационной и ракетно-космической техники.

### Список использованных источников

1. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов [Текст] / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 352 с.

2. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1. Допуски на от-

клонения толщины формуемого изделия от проектного значения [Текст] / В.А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технолог* – Вып. 3(90). (В печати).

3. Карпов, Я.С. Основы производства изделий из композиционных материалов [Текст]: учеб. пособие / Я.С. Карпов, С.П. Кривенда, И.М. Тараненко. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 1999. – 37 с.

4. Композиционные материалы [Текст]: справ. / под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

5. Справочник по композиционным материалам [Текст]: в 2 кн. – Кн. 1 под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.

6. Ставиченко, В.Г. Метод учета температурного напряженно-деформированного состояния при расчетах на прочность панелей обшивки из слоистых композитов [Текст]: дис...канд. техн. наук: 05.07.02 / Ставиченко Вадим Григорьевич. – Х., 2010. – 149 с.

7. Статические и динамические расчеты транспортных и энергетических сооружений на базе программного комплекса COSMOS/M [Текст] / С.В. Елизаров, А.В. Бенин, В.А. Петров, О.Д. Тананайко. – СПб.: Иван Федоров, 2004. – 260 с.

*Поступила в редакцию 21.03.2012.*

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