

УДК 620.174.22 : 620.22-419

Л.В. СМОВЗЮК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИН СТУПЕНЧАТО-ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Выполнена экспериментальная проверка аналитического метода расчета напряженно-деформированного состояния пластины ступенчато-переменной толщины, изготовленной из композиционного материала. Для исследования деформированного состояния образцов использован метод голографической интерферометрии двойной экспозиции. Физико-механические характеристики испытываемых образцов, используемые в аналитическом расчете, были определены в соответствии со стандартами ASTM. Результаты, полученные методом голографической интерферометрии, демонстрируют хорошую сходимость с аналитическим решением.

напряженно-деформированное состояние, оптические методы, голографическая интерферометрия, пластина, композиционный материал.

Введение

Широкое использование композиционных материалов в авиационных конструкциях является причиной разработки новых теоретических методик расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценки несущей способности сложных и ответственных элементов летательных аппаратов.

Необходимым условием внедрения таких решений является проверка достоверности получаемых результатов. К сожалению, большое количество современных авторов ограничивается сравнением с литературными данными, полученными ранее теоретическими путем, либо результатами моделирования методом конечного элемента, который не всегда адекватно описывает реальную конструкцию, вследствие высокой чувствительности к выбору конечного элемента, граничных условий и т.д. Такая проверка является достаточной лишь для конструкций, находящихся в условиях простого напряженного состояния. Для остальных случаев лучшей проверкой остается проведение экспериментальных исследований.

В работе [1] предложен аналитический метод расчета НДС пластин ступенчато-переменной толщины, который может быть применен для решения

целого ряда перспективных прикладных задач, например, исследования конструкций, локально ослабленных вырезом или усиленных накладным элементом произвольной жесткости. Такие широкие возможности ставят целью данной работы экспериментальную проверку результатов, полученных в соответствии с предлагаемым методом.

1. Выбор экспериментального метода

В настоящее время существует большое количество экспериментальных методов анализа деформированного состояния, возникающего в конструкциях под действием внешних нагрузок [2, 3]. Основанные на различных принципах и явлениях, все они направлены на измерение деформаций или перемещений в исследуемых элементах.

Среди экспериментальных способов измерения деформаций широкое распространение имеет метод тензометрии. Однако область его применения ограничивается зонами конструкции с регулярным НДС, так как тензодатчик измеряет среднее значение деформации в пределах базы. В данном случае, вследствие неоднородности поля деформаций, вызванной ступенчатым изменением толщины, применение метода тензометрии является малоэффективным.

Оптические методы (метод муаровых полос, поляризационно-оптические и интерференционные методы) позволяют получить непрерывное поле перемещений по всей поверхности исследуемой конструкции, для предложенной задачи является оптимальным, поскольку не только обеспечивает наглядность результатов, но и представляет их в виде, наиболее удобном для сравнения с аналитическим решением. Использование различных оптических методов при исследовании конструкций из композиционных материалов подробно рассмотрено в работе [4].

Преимуществами голографической интерферометрии, выбранной для проведения исследований, перед другими оптическими методами является возможность проведения исследований на реальной конструкции независимо от материала, из которого она изготовлена, и отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности.

В процессе исследования был применен метод голографической интерферометрии двойной экспозиции с регистрацией голограмм во встречных лучах.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

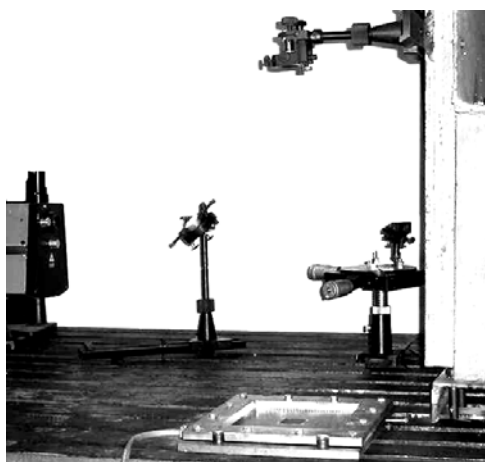


Рис. 1. Экспериментальная установка

2. Определение упругих характеристик используемых материалов

Исследования были проведены на образцах, изготовленных на основе стеклоткани AeroGlass-163 и

эпоксидного связующего горячего отверждения “Эпикур”. Для определения упругих характеристик используемого стеклопластика в соответствии со стандартами Американского общества по испытанию материалов (ASTM) D3039 и D3518, регламентирующими методы определения модулей упругости и сдвига, а также коэффициента Пуассона армированных композиционных материалов, было изготовлено и испытано три партии образцов с углами укладки армирующего материала $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ и $[\pm 45^\circ]$.

В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных определены среднее значение, стандартное отклонение и коэффициент вариации для каждой определяемой величины, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Упругие свойства стеклопластика

ФМХ	\bar{x}	S_x	$V_x, \%$
$E_1, \text{ГПа}$	18,117	0,227	1,25
$E_2, \text{ГПа}$	18,096	0,405	2,24
μ_{12}	0,129	0,0042	3,26
μ_{21}	0,132	0,0036	2,73
$G_{12}, \text{ГПа}$	9,39	0,806	8,58

Для выборок, определяющих значение модулей упругости и коэффициентов Пуассона, были выполнены проверки нормальности распределения экспериментальных данных по критерию Пирсона и равенства генеральных дисперсий для выборок ($E_1 - E_2$) и ($\mu_{12} - \mu_{21}$). Положительный результат этих вычислений дал возможность применить двойной t -критерий Стьюдента для проверки гипотезы о совпадении средних значений указанных выше совокупностей. В обоих случаях проверяемая гипотеза оказалась верной, что позволило, объединив соответствующие выборки, получить уточненное значение упругих характеристик, приведенное в табл. 2.

Доверительный интервал в табл. 2 был рассчитан с учетом статистического коэффициента Стьюдента, применяемого для оценки малых выборок, для заданной вероятности $P=95\%$.

Таблица 2

Упругие свойства, используемые при расчете

ФМХ	\bar{x}	S_x	$V_x, \%$	Интервал
$E_1 = E_2,$ ГПа	18,11	0,302	1,67	18,11±0,20
$\mu_{12} = \mu_{21}$	0,13	0,004	3,07	0,13±0,003
G_{12} , ГПа	9,39	0,806	8,58	9,39±1,0

3. Исследование деформированного состояния образцов

Теоретическое решение, предложенное в работе [1], получено в линейной постановке теории упругости, следовательно, перемещения испытываемых образцов также не должны выходить за рамки линейной зоны деформирования, допускающей, согласно литературным источникам [5], прогибы от

1/5 до 1 толщины пластины. Такое неоднозначное определение стало причиной экспериментального определения области линейности деформаций.

Для этого на бездефектной пластине были проведены исследования, заключающиеся в следующем:

1. К исследуемой пластине прикладывалось начальное давление p_0 , приводящее к возникновению начального прогиба w_0 , равного $0,5 \cdot \delta$, δ и $1,5 \cdot \delta$ соответственно.

2. Перемещение w_z , фиксируемое на голограмме, является результатом приложения давления Δp , равного во всех трех экспериментах.

Интерферограммы, демонстрирующие полученные нормальные перемещения, представлены на рис. 2.

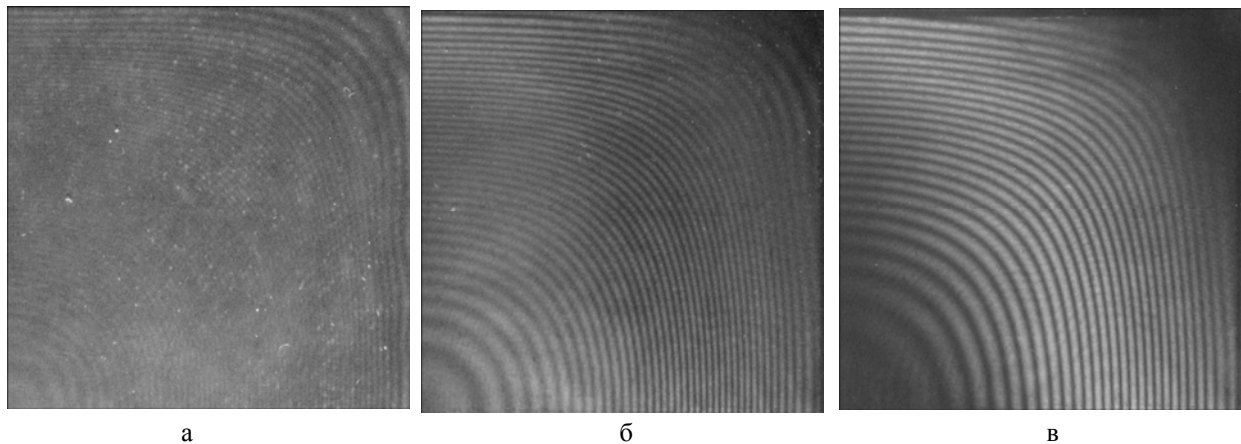


Рис. 2. Голографические интерферограммы целой пластины при постоянном давлении Δp , в зависимости от начального прогиба w_0 : а – начальный прогиб – $0,5 \cdot \delta$; б – начальный прогиб – δ ; в – начальный прогиб – $1,5 \cdot \delta$

Графики нормальных перемещений по центральному сечению пластины, полученные во всех трех экспериментах, а также ожидаемое теоретическое распределение (пунктирная линия), представлены на рис. 3.

Наиболее близким к теоретическому значению оказалось перемещение, полученное при начальном прогибе равном половине толщины пластины (погрешность составляет 2,4%). В соответствии с полученными результатами все дальнейшие исследования были выполнены при начальном прогибе пластины равном половине ее толщины.

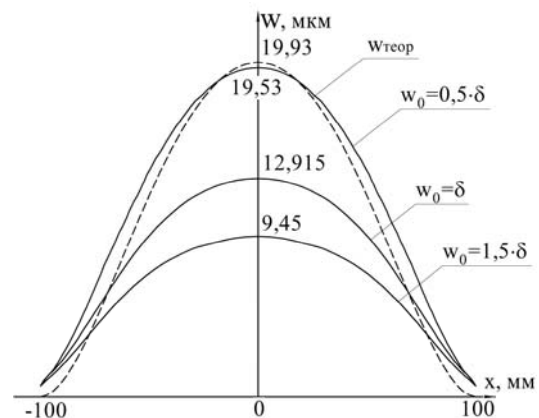


Рис. 3. Корреляция аналитического решения в линейной постановке и экспериментальных значений в зависимости от начального прогиба w_0

Сравнение теоретических результатов, полученных согласно методике [1], со значениями, полученными экспериментальным методом, выполнено для 3 типов образцов, жестко закрепленных по контуру во вспомогательной оснастке и нагруженных равномерно распределенным давлением Δp :

1. бездефектного ($\delta = 1,85$ мм);
2. образца с вырезом, расположенным в центре пластины ($\delta = 1,773$ мм);
3. образца с вырезом, смещенным относительно центра пластины ($\delta = 1,84$ мм).

Для каждого типа образцов были получены голографические интерферограммы и построены графики нормальных перемещений по центральному сечению пластины, представленные на рис. 4 – 6.

Представленные на рис. 4-6 результаты получены для образцов, отличающихся по толщине. Для удобства их сравнения, значения теоретических и экспериментальных прогибов для каждой из пластин были приведены к одному значению толщины $\delta = 1,85$ мм. Результаты представлены в виде графиков на рис. 7 и сведены в табл. 3.

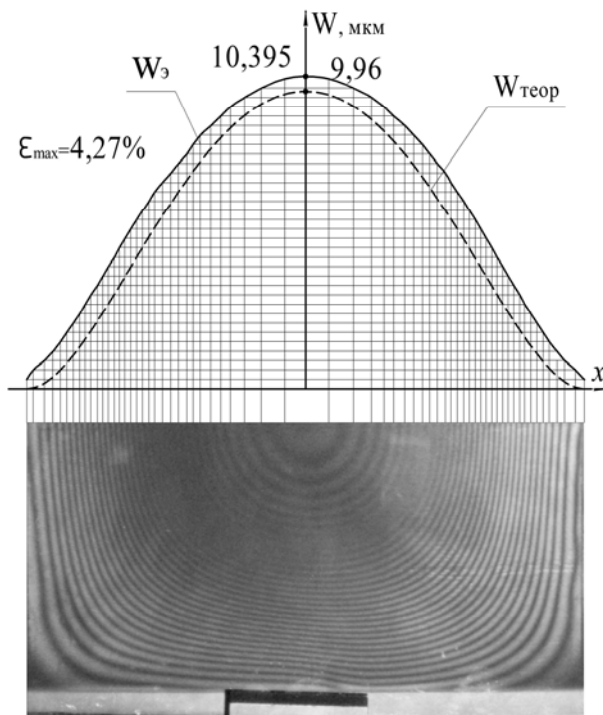


Рис. 4. Прогиб целой пластины под действием давления Δp

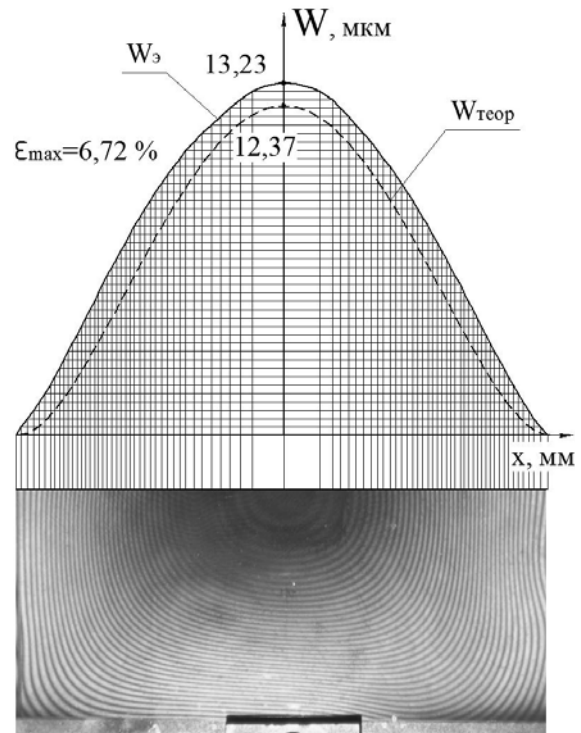


Рис. 5. Прогиб пластины с вырезом по центру под действием давления Δp

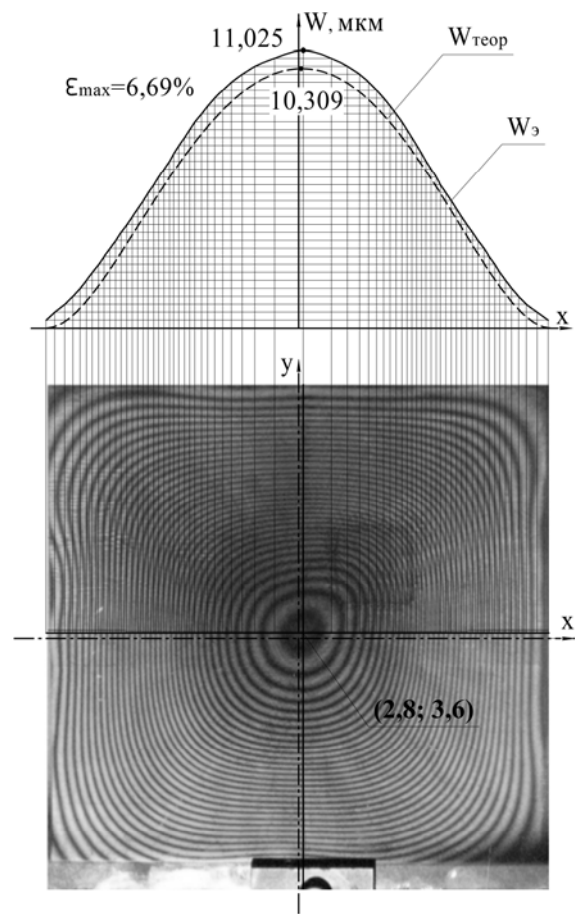


Рис. 6. Прогиб пластины с вырезом, смещенным относительно центра под действием давления Δp

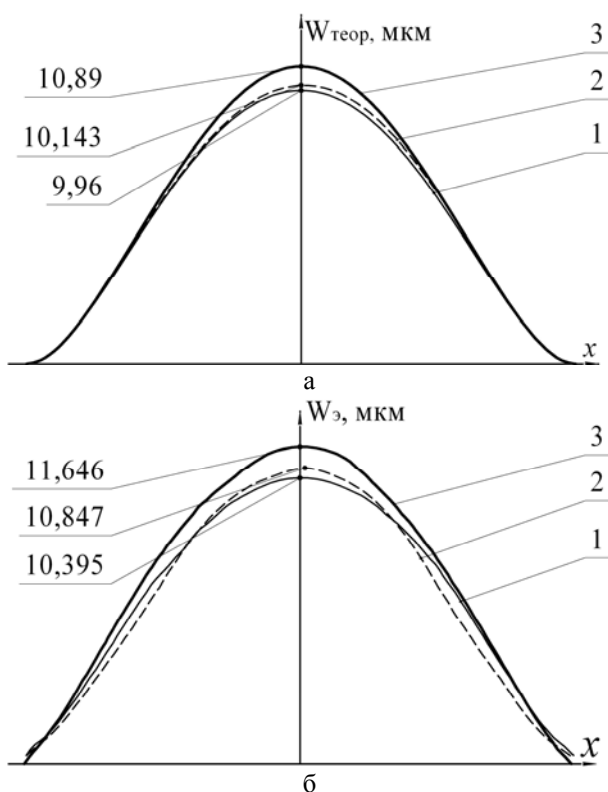


Рис. 7. Сравнение теоретически (а) и экспериментально (б) полученных результатов прогиба в пластинах с дефектами (1 – целый образец, 2 – вырез смещен, 3 – вырез в центре)

Таблица 3

Сравнение результатов

Тип образца	$W_{теор},$ МКМ	$W_{э},$ МКМ	$\epsilon,$ %	$\Delta W_{теор},$ %	$\Delta W_{э},$ %
Целый	9,96	10,395	4,27	—	—
Вырез в центре	10,89	11,646	6,71	9,33	12,03
Вырез смещен	10,143	10,847	6,84	1,84	4,35

Выводы

Выбранный для исследования экспериментальный метод позволяет получить результаты в виде непрерывного поля перемещений, что дает возможность глубже понять поведение конструкции в зоне нерегулярности структуры.

Оценивая результаты выполненной работы, можно сделать следующие выводы:

- полученные экспериментально поля перемещений качественно соответствуют прогнозируемым теоретическим результатам;
- максимальная погрешность численных значений не превышает 7%, демонстрируя хорошую сходимость результатов.

Все это позволяет утверждать, что предложенная в работе [1] методика расчета напряженно-деформированного состояния пластин ступенчато-переменной толщины может успешно применяться для решения прикладных задач.

Литература

1. Шашкова Л.В., Шевцова М.А. Определение напряженно-деформированного состояния анизотропной пластины переменной толщины // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 5. – С. 21-29.
2. Кобаяси А.. Экспериментальная механика: В 2 т. – М.: Мир, 1990. – 419 с.
3. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справ. пособие / Под ред. Б.С. Касаткина. – К.: Наук. думка, 1981. – 314 с.
4. Benton Heslehurst R. Optical NDI methods for composite structures // SAMPE Journal. – 2007. – Vol. 43, № 5. – P. 7-14.
5. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 419 с.

Поступила в редакцию 15.03.2008

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