

А. А. Смердов, А. М. Думанский,
Л. П. Таирова

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАТИВНЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ОТСЕКОВ И ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Представлены технические особенности проведения испытаний по определению комплекса характеристик жесткости и прочности композитных материалов, в том числе трехслойных с легким (сотовым) наполнителем и тонкими обшивками из высокопрочных композитов. Даны методические особенности анализа экспериментальных данных, в том числе с использованием идентификации характеристик однонаправленного слоя, позволяющие обеспечить максимально достоверное прогнозирование жесткости и прочности при расчете и проектировании несущих конструкций ракет-носителей

E-mail: asmerdov@mail.ru

Ключевые слова: многослойные материалы, характеристики упругости, характеристики прочности, идентификация, эксперимент, достоверность.

Постановка задачи. Углепластики широко используются в процессе создания конструкций аэрокосмического назначения, поэтому экспериментальные исследования, на основе которых возможно выполнить построение определяющих соотношений и критериев предельного состояния, позволяющих рассчитать и прогнозировать деформативные и прочностные свойства, представляются актуальными. Несущие конструкции отсеков и обтекателей ракет-носителей часто представляют собой трехслойные конструкции. Получение надежных экспериментальных данных способствует созданию адекватных структурно-феноменологических моделей деформирования и разрушения слоистых композитов и элементов из них. Обсуждение применимости критериев предельного состояния слоистых композитов на полимерной основе приведено в работах [1, 2]. Следует отметить, что основным составляющим элементом многослойного композита является однонаправленный слой, характеристики упругости и прочности этого слоя используются в качестве исходных данных при проектировании и поверочных расчетах конструкций. В связи с этим важно как можно более точно определить его механические свойства. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Будем рассматривать только плоское напряженно-деформированное состояние, поскольку эта гипотеза используется для большого числа тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения. В качестве

характеристик упругости слоя как ортотропного материала будем использовать: E_1, E_2 — модули упругости в направлениях вдоль и поперек волокон соответственно, G_{12} — модуль сдвига, μ_{12} — коэффициент Пуассона (оси 1 и 2 лежат в плоскости армирования). В качестве характеристик прочности слоя рассматриваем F_1^+, F_2^+ — пределы прочности вдоль и поперек волокон при растяжении, F_1^-, F_2^- — пределы прочности вдоль и поперек волокон при сжатии, F_{12} — предел прочности при чистом сдвиге в плоскости слоя, т.е. пределы прочности, соответствующие критерию максимальных напряжений при плоском напряженном состоянии (это минимальное число характеристик прочности слоя, позволяющих вести прочностные расчеты многослойных материалов).

Точность экспериментального определения свойств однонаправленного слоя зависит от корректности технической реализации испытаний и от методики составления программы испытаний и анализа полученных результатов. Техника эксперимента включает в себя выбор формы и вида образцов для используемых видов нагружения, выбор способов подкреплений зон передачи нагрузки, числа и расположения измерителей деформаций. Методика эксперимента включает в себя выбор схем армирования исследуемых образцов, способы аппроксимации полученных результатов и алгоритмы определения характеристик слоя по результатам испытаний. Рассмотрим особенности решения этих задач в настоящей работе.

Технические особенности проведения испытаний. Композиты широко используются в изделиях ракетно-космической техники, изготавливаемых способом выкладки. Экспериментальные исследования характеристик материалов должны быть проведены на образцах, изготовленных по той же технологии, что и реальные изделия. Поэтому все исследования проводились на плоских образцах, изготовленных способом выкладки.

Наиболее распространенным и легко реализуемым способом нагружения образцов является одноосное нагружение (растяжение и сжатие). Поскольку прочность при растяжении и сжатии композитных материалов различна, необходимы оба этих вида нагружения.

Размеры образцов для испытаний на растяжение заданы в соответствии с ГОСТ 25.601–80 и представляют собой полоски шириной 20 мм и длиной 250 мм. Значения толщин образцов определяются числом слоев.

В ГОСТ 25.601–80 предлагается использовать при испытаниях образцов с укладкой волокон, отличной от продольной, как образцы-полоски, так и образцы-лопатки. Поскольку при испытаниях таких образцов хорошо зарекомендовали себя полоски, не представлялось необходимым усложнять форму образцов.

При испытаниях образцов с продольным расположением волокон обнаружилось, что даже при максимально возможных моментах затяжки болтов захватов наблюдается выскальзывание из захватов образца до его разрушения. Для обеспечения разрушения таких образцов в рабочей зоне на концы образцов были приклеены клеем холодного отверждения ВК-9 накладки из текстолита длиной 90 мм, а на них — накладки из наждачной бумаги. Такая подготовка концов образца позволяет более равномерно распределить давление по заземленным поверхностям и обеспечить хорошее сцепление с поверхностями захватов. Однако даже при такой подготовке образцов не удалось довести их до разрушения в рабочей зоне, пока не были срезаны кромки образцов в рабочей зоне до ширины 15 мм, т.е. пока не были изготовлены образцы-лопатки в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.601–80. Таким образом, образцы с продольным направлением волокон имели форму лопаток с накладками на нагружаемых концах.

При испытаниях на сжатие тонких образцов нельзя корректно определить предел прочности, так как при малой длине образца оказывается, что краевые эффекты от зон заземления перекрывают рабочую часть, а при увеличении длины образца происходит разрушение из-за потери устойчивости до достижения предела прочности. Увеличение толщины образцов нежелательно, так как может вызвать изменение характеристик материала из-за влияния технологических особенностей изготовления тонких и толстых пластин. Поэтому испытания на сжатие проведены на трехслойных образцах с сотовым наполнителем и обшивками из исследуемого материала. Образцы были изготовлены по штатной технологии изготовления реальных трехслойных конструкций. Такие образцы требуют подкрепления нагружаемых торцов для предотвращения смятия на торцах до разрушения в рабочей зоне. Подкрепление нагружаемых торцов было выполнено с помощью заливочной композиции, используемой для подкрепления в реальных конструкциях. Образцы были вырезаны из трехслойных пластин-заготовок размером 150×150 мм на полосы с номинальной шириной 20 мм. Направления разрезки — перпендикулярно подкрепленным заливочной композицией сторонам. Высота сотового наполнителя — 20 мм.

Испытания на растяжение проводились с использованием специальных захватов, обеспечивающих необходимую соосность нагружения образцов, регулируемую силу заземления концов и защиту образцов от повреждения при подготовке образца к нагружению.

При испытаниях на сжатие использовалось приспособление, обеспечивающее параллельность перемещения нагруженных торцов образца относительно друг друга и достаточно высокую однородность поля деформаций в поперечных сечениях образца в рабочей зоне l (рис. 1).

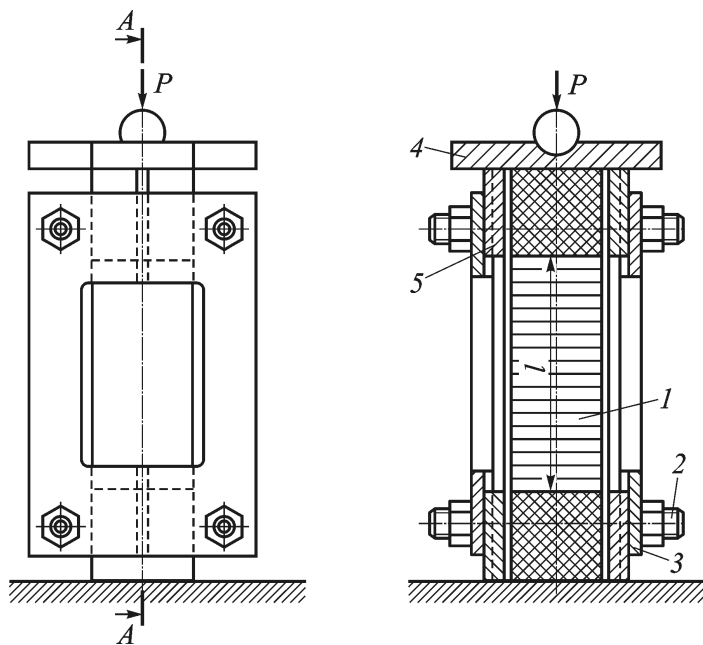


Рис. 1. Приспособление для нагружения на сжатие:

1 — образец, *2* — болтовое соединение, *3* — направляющая рамка с пазами, *4* — центрирующая платформа, *5* — накладка с выступами

Чтобы при использовании приспособления не происходило стеснения деформирования образца в продольном направлении, на поверхности накладок, соприкасающихся с рамкой, прикрепляются тонкие фторопластовые пластинки, обеспечивающие малый коэффициент трения между рамкой и накладками. Сила затяжки болтов *2* (см. рис. 1) подбирается максимально возможной, при которой продольные деформации образца в приспособлении и без нее примерно равны. Для этого проводят нагружение образца до небольших нагрузок в приспособлении и без него.

Диаграммы деформирования строились по показаниям тензодатчиков, приклеенных на каждом образце в центральном поперечном сечении (при испытаниях на растяжение — по три тензодатчика в направлении продольной оси образца и два датчика — в поперечном направлении, при испытаниях на сжатие — по два продольных датчика и по одному поперечному на каждой обшивке). Для регистрации деформаций использовалась тензоизмерительная система СИИТ-3 с контроллером, позволяющая записывать в ПЭВМ показания датчиков во время испытаний. Датчики с базой 5 мм приклеивались клеем быстрого отверждения на основе цианоакрилата. Наличие трех или четырех продольных датчиков и двух поперечных позволяло вести контроль равномерности деформаций в рабочем сечении в соответствии с ГОСТ 25.601–80.

Испытания на растяжение проведены на испытательных машинах FP-10 с максимальной силой 10 кН и FP-100 с максимальной силой 100 кН, испытания на сжатие — на EU-40 с максимальной силой 400 кН.

Методические особенности проведения испытаний. Характеристики однонаправленного слоя, определенные по характеристикам пакетов со сложными схемами армирования, лучше отражают свойства композита с любой возможной схемой армирования, чем характеристики, экспериментально определенные при испытаниях образцов из однонаправленного материала. Кроме того, модули сдвига технически сложно определять непосредственно на плоских однонаправленных образцах. Поэтому для более точного определения характеристик слоя целесообразно применять методы идентификации [3–5]. В настоящей работе использованы алгоритмы идентификации характеристик слоя, наиболее полно соответствующих всем имеющимся экспериментальным данным.

Для проведения идентификации характеристик упругости и прочности монослоя необходимы экспериментально определенные характеристики некоторых специальных структур, позволяющие обеспечить высокую устойчивость искомых характеристик слоя к случайным отклонениям в экспериментальных данных [2]. Как показывает опыт проведенных исследований [3], при определении характеристик упругости в качестве таких схем армирования лучше всего использовать перекрестно армированные структуры $\pm\varphi$, а при идентификации характеристик прочности — структуры типа $[\pm\varphi^\circ/90^\circ]$, $[\pm\varphi^\circ/0^\circ]$.

Таким образом, для проведения испытаний выбраны структуры с укладкой волокон относительно продольной оси образца: 0 (однонаправленный), $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 70^\circ$, 90° (однонаправленный), $[0^\circ/\pm 60_2^\circ]$, $[90^\circ/\pm 30_2^\circ]$, $[0_2^\circ/\pm 70_3^\circ]$, $[90_2^\circ/\pm 20_3^\circ]$, а также структура $[0_n^\circ/90_m^\circ]$, которая имеет хорошую информативность при уточнении прочности вдоль и поперек волокон. По результатам испытаний образцов с такими схемами армирования определены модули упругости, коэффициенты Пуассона, разрушающие напряжения при растяжении и сжатии, а при наличии существенной нелинейности диаграмм деформирования — напряжения нарушения монолитности. Средние значения этих характеристик для групп образцов с одинаковым армированием использованы в качестве исходных данных в задачах идентификации.

Для каждого образца модуль упругости вычислялся по средним деформациям для трех продольных датчиков на участке линейного деформирования с использованием формул линейной аппроксимации. При этом вычислялся коэффициент корреляции R , характеризующий степень отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой. Полученные значения R для всех исследованных образцов были не менее 0,98.

Коэффициент Пуассона каждого образца определялся как отношение средних поперечных приращений деформаций по двум поперечным датчикам к средним продольным приращениям деформаций по трем или четырем продольным датчикам на линейном участке деформирования. Приращения деформаций, как и при определении модуля упругости, вычислялись с помощью формул линейной аппроксимации. Значения коэффициента корреляции R для поперечных деформаций, как и для продольных, составляют не менее 0,98.

Основные результаты испытаний. На рис. 2 приведены некоторые диаграммы деформирования для исследованных схем армирования, где точки соответствуют зарегистрированным показаниям датчиков, сплошные линии — средним продольным и средним поперечным деформациям. Видно, что диаграммы для разных схем армирования очень различны — от линейных до разрушения до существенно нелинейных. На рис. 2, *a* и *б* показаны штриховые прямые, соответствующие линейной аппроксимации начальных участков деформирования. При растяжении для схемы армирования $\pm 20^\circ$ характерно небольшое отклонение от линейности только для поперечных деформаций, а для схемы армирования $\pm 40^\circ$ степень нелинейности как при растяжении, так и при сжатии очень большая для продольных и поперечных деформаций. Для схемы армирования $[0^\circ / \pm 60^\circ_2]$ при сжатии наблюдается небольшая нелинейность для продольных и поперечных деформаций.

Точка максимального напряжения на диаграммах соответствует последней точке регистрации деформаций, а не напряжению разрушения. Максимальная регистрируемая деформация для использовавшихся фольговых датчиков — около 1,5 %.

На диаграммах напряжения вычислены по фактически измеренной средней толщине каждого образца, которая отличалась от номинальной, пропорциональной числу слоев. Эти различия невелики, они связаны с колебаниями содержания связующего в пределах допустимых отклонений, однако при вычислении характеристик упругости и прочности использовались номинальные значения толщин образцов, так как характеристики слоя в большей степени определяются числом волокон в слое, а оно неизменно для всех слоев.

В качестве исходных данных (базовых характеристик) для идентификации технических постоянных слоя выбирались значения \bar{E}_x и $\bar{\mu}_{xy}$ для структур $0, \pm 20^\circ, \pm 40^\circ, \pm 50^\circ, \pm 70^\circ, 90^\circ$. При этом экспериментальные данные для структур, имеющих одни и те же углы укладки волокон, но различающихся числом слоев, объединены, поскольку влияние числа слоев на характеристики упругости оказалось статистически не значимым при доверительной вероятности 0,95.

Исходными данными для идентификации прочности являлись все экспериментальные значения прочности, а для некоторых схем ар-

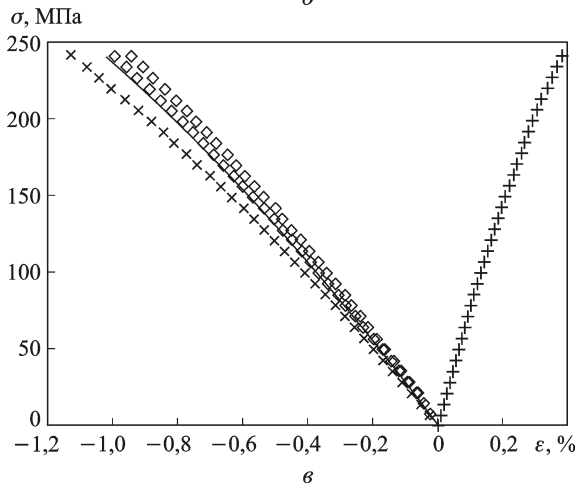
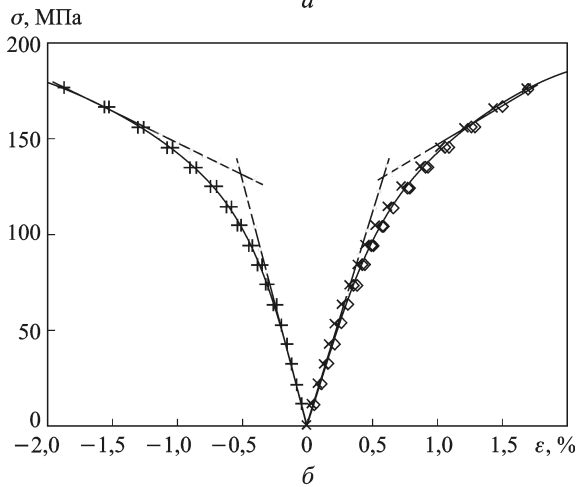
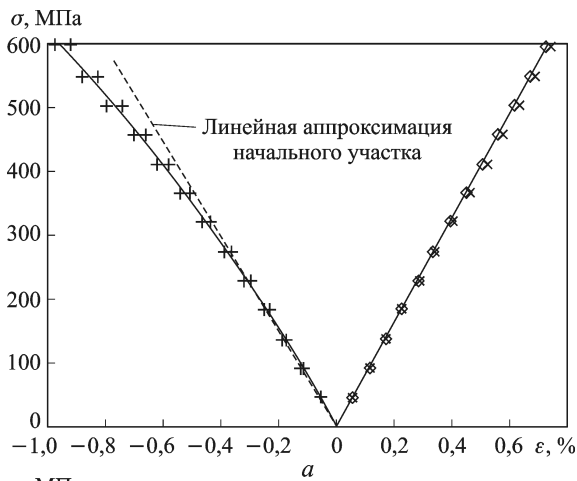


Рис. 2. Диаграммы деформирования (при растяжении положительные деформации — по показаниям продольных датчиков, отрицательные — по показаниям поперечных датчиков, при сжатии — наоборот):
 схемы армирования: $\pm 20^\circ$ (а); $\pm 40^\circ$ (б) и $[0^\circ / \pm 60^\circ]$ (в)

мирования — и напряжения нарушения монолитности, которые определялись при кусочно-линейной аппроксимации, как показано на рис. 2, а, б (напряжения в точке пересечения аппроксимирующих прямых принимаются равными напряжениям нарушения монолитности).

Характер разрушения образцов очень сильно зависит от схемы армирования: для одних структур разрушение напоминает разрушение хрупких материалов, для других — пластичных, для третьих — некий промежуточный вариант.

Например, при испытаниях на растяжение для образцов со структурой 90° , $[0_2^\circ/\pm 70_3^\circ]$ (здесь и далее углы укладки относительно продольной оси образца) характерно разделение на части при разрушении, как для хрупкого материала (рис. 3, а), а для образцов со схемами армирования $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$ — разрушение связующего с постепенным расслоением и сдвигом волокон, как для пластичного материала (рис. 3, б).

Разрушение при растяжении образцов с продольным направлением волокон оказалось нетипично для углепластика — имело вид метелки с расслоением на отдельные волокна по всей рабочей зоне. При напряжениях, составлявших примерно 70 % разрушающего напряжения, начиналось отслоение отдельных волокон, сопровождавшееся щелчками. По мере приближения к разрушающей нагрузке такие отслоения учащались до тех пор, пока не происходило резкое падение нагрузки, воспринимаемой образцом.

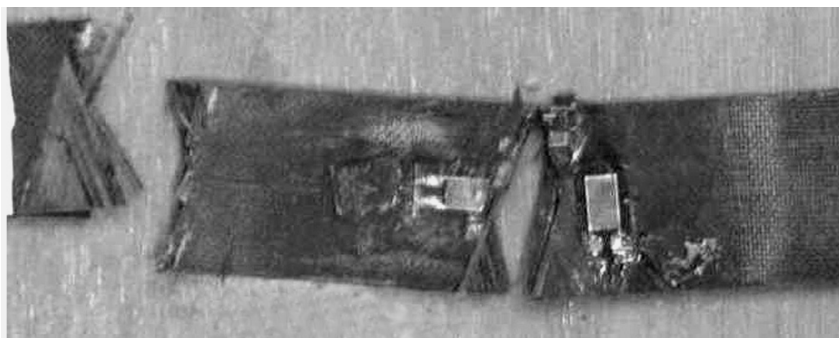
Для большинства образцов с тремя направлениями укладки при растяжении в зонах разрушения наблюдалось расслоение материала с выдергиванием волокон и разделением образца на части.

Зоны разрушения обшивок при сжатии для большинства образцов имели вид поперечных трещин или складок с последующим расслоением (рис. 3, в). В последнем случае нельзя сказать, что произошло раньше: разрушение отдельных слоев или расслоение с последующей потерей устойчивости наружных слоев.

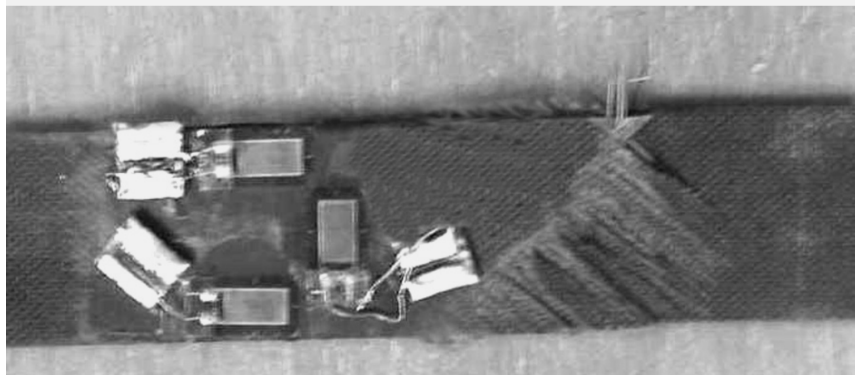
Образцы с продольным и продольно-поперечным направлением волокон после разрушения при сжатии оказались изогнуты, причем разрушение сопровождалось отслоением и расслоением обшивок как в зонах подкреплений, так и в рабочей зоне. Вероятнее всего, образцы изогнулись после образования продольных трещин перед разрушением, поскольку такое растрескивание должно приводить к случайному изменению изгибной жесткости и перераспределению нагрузки, воспринимаемой обшивками. Таким образом, можно предположить, что разрушающие нагрузки соответствуют пределу прочности материала, а не потере устойчивости образца.

Окончательные выводы о причинах разрушения образцов помогли сделать результаты идентификации характеристик прочности слоя.

Результаты идентификации характеристик слоя. Задача идентификации характеристик упругости однонаправленного слоя сводится



a



б



в

Рис. 3. Разрушение образцов с укладкой волокон $[0_2^\circ/\pm 70_3^\circ]$ (а), $\pm 40^\circ$ (б) и $[0_2^\circ/\pm 70_3^\circ]$ (в)

к решению задачи минимизации функции цели, равной сумме квадратов относительных невязок между экспериментальными значениями характеристик упругости многослойных пакетов и расчетными значениями этих характеристик, вычисленными через характеристики упругости слоя [3]. Характеристики упругости слоя являются при минимизации варьируемыми параметрами, их значения, соответствующие минимуму функции цели — искомые характеристики.

Поскольку функция цели существенно нелинейна и, возможно, имеет много экстремумов, существует вероятность получить при расчете данные, соответствующие не глобальному, а локальному минимуму функции цели. Для того чтобы уменьшить вероятность этого, были проведены расчеты с разными начальными значениями искомых характеристик. Расчеты подтвердили, что существенное изменение на-

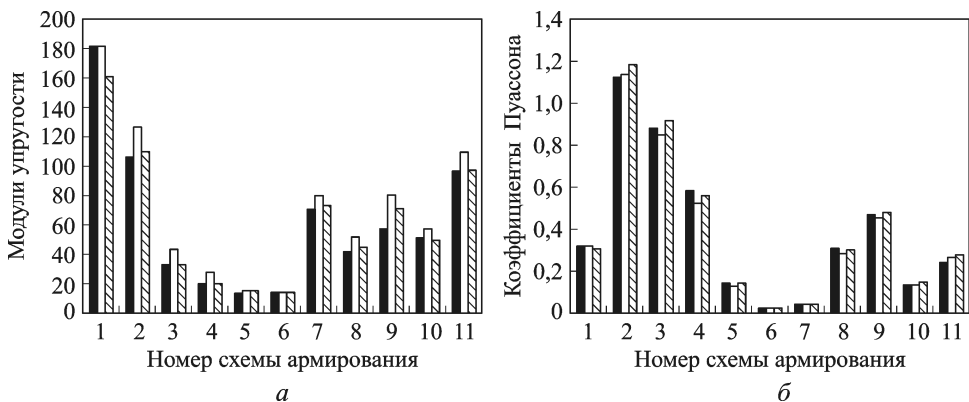


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений для исследованных структур:

первый столбец — эксперимент; второй — без идентификации; третий — после идентификации

чальных значений искомым характеристикам почти не сказывается на оптимальных значениях этих характеристик, т.е. полученные результаты расчета соответствуют глобальному минимуму функции цели и обеспечивают наилучшее соответствие расчета и эксперимента для исследуемого материала.

На рис. 4 приведено сопоставление экспериментальных значений характеристик упругости для исследованных схем армирования и двух расчетных значений этих же характеристик: одно — при использовании в качестве характеристик слоя их значений, полученных при идентификации, а второе — при использовании минимального числа экспериментальных данных. В последнем случае модули упругости вдоль и поперек волокон и коэффициент Пуассона равны полученным при испытаниях однонаправленных образцов, а модуль сдвига — экспериментальным значениям модуля упругости для структуры $\pm 50^\circ$ и характеристик упругости однонаправленных образцов. В табл. 1 приведены схемы армирования, соответствующие номерам на рис. 4.

Таблица 1

Номера схем армирования (см. рис. 4)

Номер схемы армирования	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Схема армирования	0°	$\pm 20^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 70^\circ$	90°	$0_4/90_6$	$0^\circ / \pm 60_2$	$90^\circ / \pm 30_2$	$0_2^\circ / \pm 70_3$	$90_2^\circ / \pm 20_3$

Следует отметить, что в качестве исходных данных при идентификации использованы результаты испытаний только для первых шести

структур в табл. 1, но степень соответствия расчета и эксперимента улучшилась и для остальных схем армирования.

Алгоритм идентификации характеристик прочности [5] отличается от алгоритма идентификации характеристик упругости. В настоящей работе в качестве предельных соотношений для слоя был принят критерий максимальных напряжений. В этом случае связь между характеристиками прочности слоя и пакета не может быть выражена только алгебраическими соотношениями, она представляет собой некий алгоритм анализа наиболее напряженных слоев в каждом пакете. Алгоритм идентификации, приведенный в работе [5], также основан на анализе и сопоставлении напряжений вдоль, поперек волокон и при сдвиге в слоях каждого пакета в момент разрушения или нарушения монолитности. В результате этого анализа для каждого пакета определяются слои, в которых напряжения наиболее близки к предельным. По напряжениям в этих слоях и вычисляются предельные значения характеристик слоя.

Такие расчеты проведены для двух вариантов исходных данных:

1) в качестве исходных данных взяты минимально возможные экспериментальные значения предельных характеристик для всех структур (использовались значения напряжений нарушения монолитности даже для структур, нелинейность деформирования которых была относительно невелика);

2) в качестве исходных данных взяты максимально возможные экспериментальные значения предельных характеристик для всех структур (напряжения нарушения монолитности использовались только для структур $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$ и для $[0_2^\circ / \pm 70_3^\circ]$ при сжатии).

В табл. 2 приведены некоторые численные результаты идентификации прочности (вариант 2). Здесь жирным шрифтом выделены значения характеристик, которые использованы при определении характеристик прочности слоя. Остальные характеристики, как показал проведенный в процессе идентификации анализ, оказались существенно меньше ожидаемых значений из-за повышенной повреждаемости образцов или из-за повышенной чувствительности структур к концентрации напряжений вблизи свободных кромок.

Таким образом, все приведенные результаты экспериментов и расчетов позволяют сделать вывод: совершенствование техники эксперимента и методики анализа полученных данных позволяет получить максимально достоверные характеристики слоя многослойных композитов. Кроме того, результаты испытаний дают информацию для обобщения моделей деформирования и разрушения. Так, в работе [6] на основе этих данных сделана успешная попытка использования наследственного определяющего соотношения при сдвиге слоя для описания некоторых нелинейных диаграмм деформирования многослой-

Сравнение результатов эксперимента и расчета при идентификации прочности

№ п/п	Схема армирования	Исходные характеристики (эксперимента)				Расчет				Определяемые характеристики слоя (№ нагружения)
		1-е нагружение $[\sigma^+]$, МПа	2-е нагружение $[\sigma^-]$, МПа	Растяжение		Сжатие		Причины разрушения		
				$[\sigma^+]$, МПа	Причины разрушения	$[\sigma^-]$, МПа	Причины разрушения			
1	0	2690	815	2439	F_1^+	960	F_1^-	F_1^+ (1 н.), F_1^- (2 н.)		
2	$\pm 20^\circ$	902	477	917	F_{12}	891	F_1^-	F_{12} (1 н.)		
3	$\pm 40^\circ$	180	–	200	F_{12}	200	F_{12}	F_{12}		
4	$\pm 50^\circ$	85	140	150	F_{12}	150	F_{12}	F_{12} (2 н.)		
5	$\pm 70^\circ$	45,7	194	187	F_2^+	194	F_2^-	F_2^-, F_{12} (2 н.)		
6	90°	33,2	–	153	F_2^+	159	F_2^-	–		
7	$[0_4^+/90_6^]$	873	–	912	F_2^+	427	F_1^-	F_2^+		
8	$[0_6^+/90_4^]$	–	628	1300	F_2^+	604	F_1^-	F_1^- (2 н.)		
9	$[0_2^+/ \pm 70_3^]$	756	330	725	F_2^+	297	F_1^-	F_1^+, F_2^+, F_{12} (1 н.), F_1^- (2 н.)		
10	$[90_2^/ \pm 20_3^]$	754	–	1330	F_2^+	676	F_1^-	–		
11	$[0^/ \pm 60_2^]$	594	403	459	F_{12}	262	F_1^-	F_1^+ (1 н.), F_{12} (1, 2 н.)		
12	$[90^/ \pm 30_2^]$	422	–	640	F_{12}	640	F_{12}	–		

ных композитов. Такой подход позволяет оценить кинетику перераспределения напряжений в слоях пакета и дает возможность учета влияния накопления повреждений на предельное состояние композитной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роуланс Р. Течение и потеря несущей способности композитов в условиях двухосного напряженного состояния: сопоставления расчета и экспериментальных данных // В кн.: Неупругие свойства композиционных материалов. Механика. Вып. 16. – М.: Мир, 1978. – С. 140–179.
2. Soden P. D., Hinton M. J., Kaddour A. S. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates // *Composites Science and Technology*, 1998. – Vol. 58. – P. 1225–1254.
3. Зиновьев П. А., Таирова Л. П. Численный эксперимент как метод оценки точности расчета при идентификации характеристик слоев гибридных многослойных композитов // Сб. докладов 2-й Междунар. конф. “Идентификация динамических систем и обратные задачи”, СПб., 1994.
4. Zinoviev P., Tairova L. Identifying the properties of individual plies constituting hybrid composites // *Inverse Problems in Eng-ng*, 1995. – Vol. 2. – P. 141–154.
5. Таирова Л. П. Идентификация характеристик прочности многослойных композитов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2005. – Спец. выпуск. – С. 10–21.
6. Dumansky A. M., Tairova L. P. A method for the construction of hereditary constitutive equations of laminates based on a hereditary constitutive equation for a layer // In *Current themes in engineering science 2007. Selected presentations at the World Congress on Engineering – 2007*. Ed. A.M. Korsunsky. – AIP conference proceedings. – Vol. 1045. – P. 71–80.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012