

МЕТОДОЛОГИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

В настоящее время сэндвичевые конструкции широко применяются в ответственных агрегатах авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) [1]. Уникальный комплекс прочностных, технологических и эксплуатационных характеристик этой конструктивно-силовой схемы (КСС) выявил ее приоритет среди других и предопределил ее широкое применение. Из накопленного отечественного и зарубежного опыта, а также его теоретического обоснования можно с уверенностью ограничить классы эффективно применяемых заполнителей для АРКТ [2 – 5].

Оптимальное проектирование сэндвичевых конструкций АРКТ требует использования приведенных физико-механических характеристик (ФМХ) применяемых заполнителей. Современные средства инженерного анализа позволяют находить рациональные параметры таких КСС непосредственно без замены используемого заполнителя некоторым сплошным ортотропным материалом, т.е. без его «размазывания». Однако трудоемкость такого подхода, по всей видимости, оправдана только в случаях необходимости проведения поверочных расчетов. На практике же конструкторы всегда использовали и продолжают использовать приведенные характеристики, что позволяет построить эффективный процесс конструктивной оптимизации параметров сэндвичевых конструкций при большом числе варьируемых параметров используемых заполнителей [6, 7].

Если такие характеристики, выраженные через геометрические и физико-механические свойства изотропных материалов для сотовых и некоторых других заполнителей получены давно и приводятся в справочниках, например [1, 8], то для ряда других они были получены только недавно [9] или существуют для очень узкой номенклатуры их геометрических параметров, что связано с большим объемом вычислений при расчете простейших из них [10]. Использование в качестве материала заполнителей полимерных композитов создает дополнительные возможности в широком диапазоне регулировать их приведенные ФМХ путем изменения угла укладки армирующих волокон в целях получения оптимального сочетания искомых свойств сэндвичевой конструкции в целом [11]. Поэтому, как показывает опыт, в большинстве случаев в зависимости от степени ответственности композитных сэндвичевых агрегатов заключение об их соответствии предъявляемым требованиям дается только по результатам обработки весьма дорогостоящих натуральных испытаний образцов, что в свою очередь ведет к росту стоимости АРКТ.

Одной из основных тенденций для современной мировой аэрокосмической индустрии является замена реальных испытаний имитацион-

ным моделированием [12]. Такой подход к получению величин ФМХ различных типов заполнителей сэндвичевых конструкций АРКТ или директивной корректировке существующих аналитических зависимостей по их определению зарекомендовал себя в качестве эффективной альтернативы натурным испытаниям реальных опытных образцов, позволяющей существенно снизить материальные и временные затраты [13, 14].

Виртуальный (численный) эксперимент^{*)} по сравнению с натурным на ранней стадии проектирования является практически единственным доступным методом получения информации о возможных величинах ФМХ и несущей способности сэндвичевых структур в различных условиях внешнего воздействия и о влиянии на их уровень конструктивных параметров заполнителя. Имитационное моделирование таких структур позволяет также при надлежащем углубленном анализе схем их армирования существенно повысить их массовую эффективность. Таким образом, на сегодняшний день сформированы предпосылки использования информационных технологий конечно-элементной поддержки не только в качестве расчетно-теоретического сопровождения виртуальных (численных) экспериментов сэндвичевых композитных структур, но и для прогнозирования предельно возможного уровня их ФМХ и несущей способности, а также для проектирования, подбора и оптимизации их параметров по различным критериям эффективности.

Использование информационных технологий конечно-элементной поддержки для прогнозирования уровня ФМХ композитных заполнителей сэндвичевых конструкций предполагает построение соответствующей методологии, воспроизведение которой для разных типов заполнителей позволит оперативно получать сведения об уровне их ФМХ в зависимости от различных параметров и оценивать степень их влияния. На рис. 1 показана принципиальная блок-схема разработанной методологии.

Разработанная методология базируется на системном подходе и включает в себя три аспекта: организационно-подготовительный, прогнозирование уровня ФМХ сэндвичевых структур и возможную директивную корректировку существующих на сегодняшний день аналитических моделей по определению приведенных ФМХ сэндвичевых структур.

К организационно-подготовительному аспекту относится научно-методическое обеспечение имитационного моделирования, включающее в себя анализ требований технического задания на определение конкретных ФМХ рассматриваемого типа сэндвичевой структуры, проведение аналитического поиска в библиотеке нормативной документации конкретных стандартов на проведение испытаний, удовлетворяющих этим требованиям.

^{*)} Такое определение, достаточно широко используемое в ряде работ, например [15], с учетом особенностей исследуемой системы и решаемых задач наиболее полно отвечает смыслу работы.

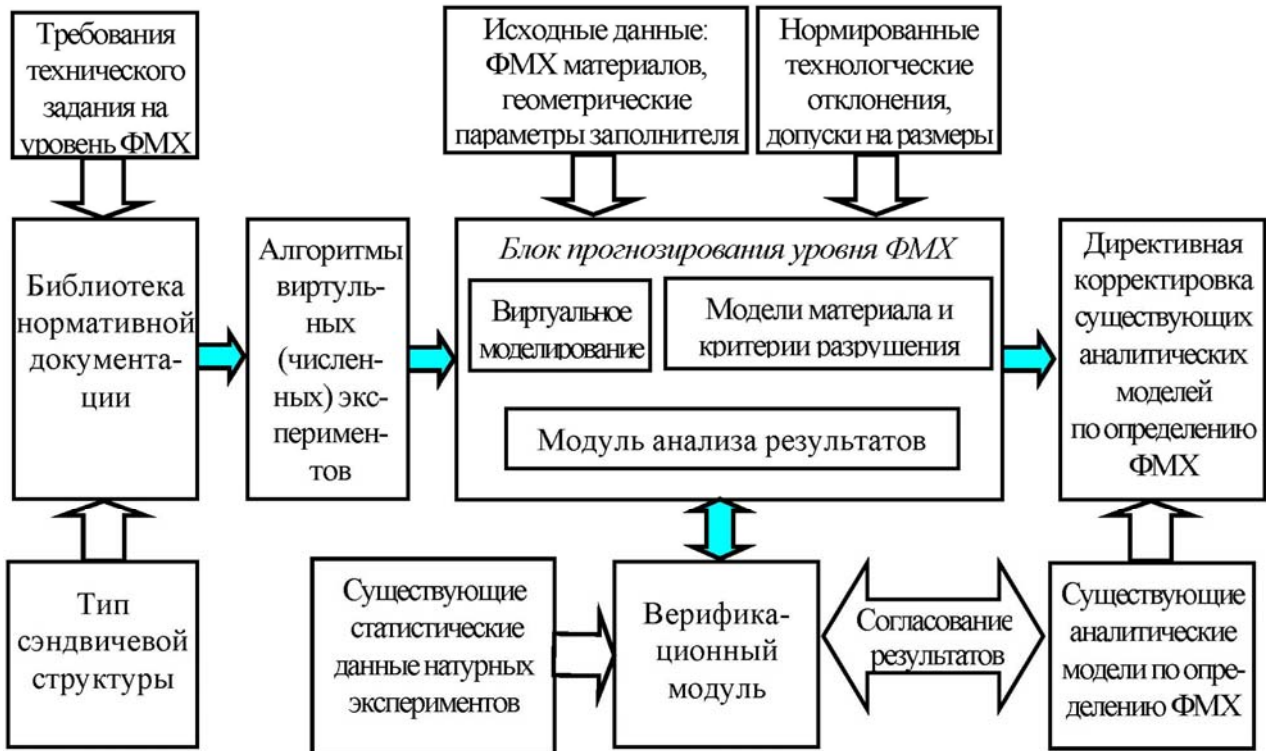


Рисунок 1 – Принципиальная схема методологии информационной поддержки прогнозирования уровня ФМХ заполнителей для сэндвичевых конструкций

Поиск синтезирует в себе анализ наиболее теоретически обоснованных и нашедших практическое подтверждение методов испытаний, регламентированных в различных стандартах. На этом этапе осуществляется синтез принципиальных схем испытаний, которые будут имитироваться, а также разрабатываются алгоритмы виртуальных (численных) экспериментов.

Аспект прогнозирования уровня ФМХ сэндвичевых композитных структур предусматривает разработку виртуальных моделей, выбор соответствующих испытаниям моделей поведения материалов и их критериев разрушения, непосредственное проведение численных экспериментов, а также последующий анализ полученных результатов. При этом модули виртуального (численного) моделирования и выбора моделей материалов и критериев разрушения являются независимыми структурными элементами, определяющими необходимую степень детализации моделей, характер деформирования и возможного разрушения полимерных композитов, что в итоге позволяет спрогнозировать уровень приведенных ФМХ рассматриваемых сэндвичевых структур.

На этом этапе предусмотрена возможность оценить влияние на приведенные ФМХ заполнителя характерных для его производства технологических отклонений в пределах регламентированных допусков на них [16]. Система нормирования полей допусков на возможные отклонения, возникающих в процессе производства сэндвичевой структуры, а также конкретный алгоритм учета их влияния поступают в блок прогнози-

рования уровня ФМХ, где и оценивается их конечное влияние. Выявление взаимодействия технологических факторов и их совместное влияние на конечные характеристики композитных элементов, построение соответствующих алгоритмов выполняется на основе уже существующих, например [17], или разработанных с участием автора методик [2, 6].

Оценка полученных величин приведенных ФМХ сэндвичевых структур осуществляется в верификационном модуле путем их сопоставления с существующими статистическими данными натуральных экспериментов и (или) с общепринятыми аналитическими моделями, позволяющими теоретически рассчитать приведенные ФМХ рассмотренных типов заполнителей. Степень доверия к результатам, полученным при численных экспериментах, зависит, прежде всего, от того, насколько точно разработанная виртуальная модель, выбранные модели материалов и критерии разрушения соответствуют реальному поведению композитной сэндвичевой структуры [15]. Сложность и неоднозначность этой проблемы объясняет наличие различных подходов и, соответственно, многочисленной литературы. Здесь также следует отметить одну из основных тенденций развития современных информационных технологий – процесс тотальной верификации программных комплексов конечно-элементного анализа, вычислительных методов, конечно-элементных моделей и верификация результатов конечно-элементных решений путем их сопоставления с результатами экспериментальных исследований (Verification & Validation – процесс) [12].

Заключительный аспект предложенной методологии предполагает проведение директивной корректировки существующих аналитических моделей по теоретическому определению приведенных ФМХ различных типов заполнителей сэндвичевых конструкций. Известно, что эти модели имеют определенные неточности, которые приводят в ряде случаев к большим погрешностям. Поэтому все основанные на них методы и методики определения приведенных ФМХ заполнителей, как правило, нуждаются в экспериментальной проверке или в директивной корректировке с учетом различных факторов, чему посвящен ряд работ, в том числе и наших [18, 19]. Отсюда и необходимость наличия соответствующего блока, на основе которого могут быть директивно откорректированы аналитические модели определения ФМХ, что, в свою очередь, позволит получить более точные зависимости, не проводя натуральных испытаний образцов, тем самым сократив сроки проектирования, разработки и запуска в производство сэндвичевых конструкций АРКТ.

Изложенная выше методология информационной поддержки прогнозирования уровня ФМХ сэндвичевых структур с различными типами заполнителей из ПКМ достаточно хорошо проявила себя при решении ряда практических задач.

Так, ее реализация позволила дать заключение о степени влияния различных схем армирования углесотопласта на его приведенные ФМХ [20, 21].

Известно [1, 2], что определяющими характеристиками СЗ являются модуль упругости при растяжении вдоль ячеек сотов E_z^{C3} и модули сдвига в плоскостях граней сотов параллельно и перпендикулярно к клеевым полосам соответственно – G_{xz}^{C3} и G_{yz}^{C3} . Величины остальных модулей упругости и сдвига пренебрежимо малы и в расчетах обычно не учитываются. В ходе исследований был рассмотрен углесотопласт, который планируется изготавливать из углеродного наполнителя типа КМУ-4Э. Для определения модулей упругости при сдвиге углесотопласта с правильной шестигранной ячейкой имитировались испытания на сдвиг сдвоенных образцов методом растяжения. Имитация испытаний углесотопласта на поперечное растяжение предусматривала приложение равномерно распределенной нагрузки перпендикулярно к несущим слоям. Моделирование проведено для 162 полных ячеек сотов. При дискретизации были использованы многослойные пластинчатые конечные элементы для пространственного анализа с соответствующим числом слоев и схемой армирования. На рис. 2 показаны примеры сгенерированных конечно-элементных моделей образцов с граничными условиями для определения модулей упругости углесотопласта и полученные в результате численного эксперимента их деформированные состояния.

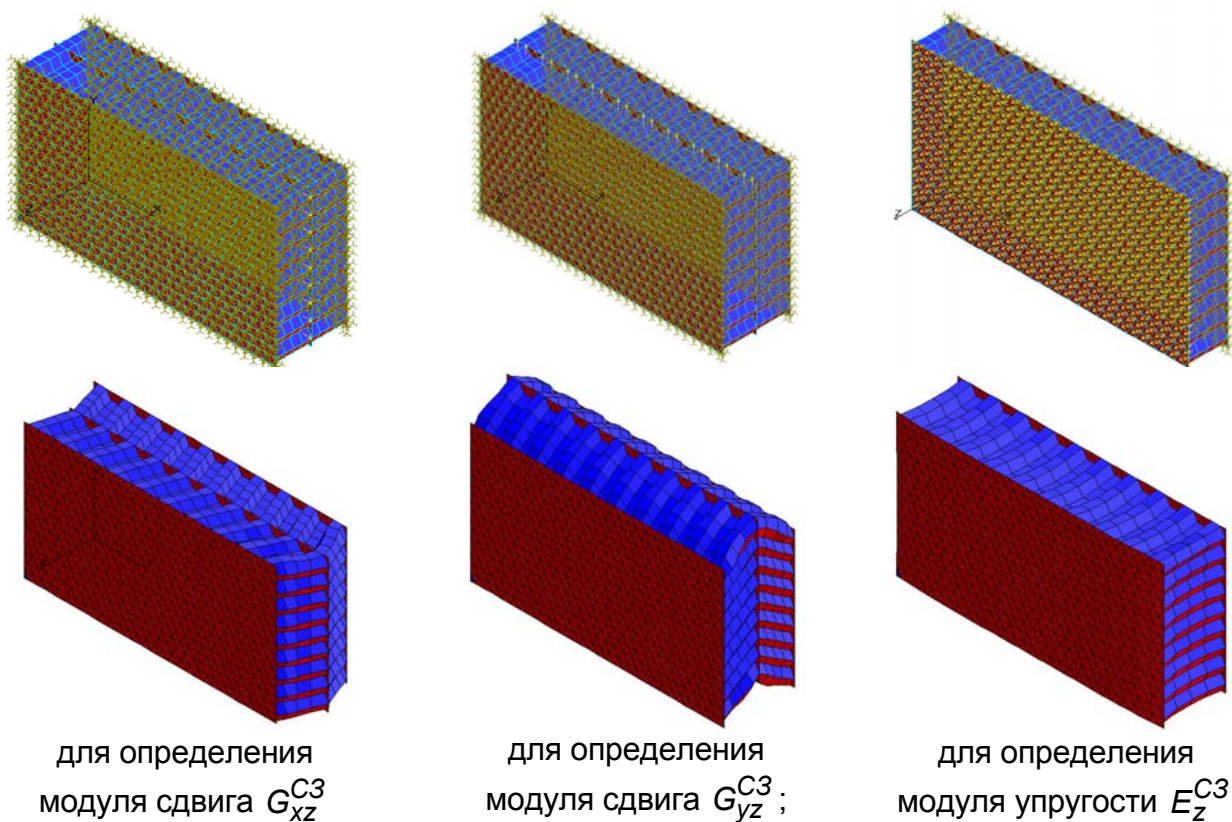


Рисунок 2 – Примеры сгенерированных конечно-элементных моделей образцов углесотопласта высотой 20 мм и полученные в результате численного эксперимента их деформированные состояния

Проведенный сравнительный анализ полученных результатов с общепринятыми аналитическими моделями и реализуемыми ими уровнями ФМХ углесотопласта свидетельствует о хорошей сходимости (рис. 3), а поиск рациональной схемы армирования сотов, обеспечивающей одновременно высокий уровень приведенных ФМХ при растяжении и сдвиге, показал, что она стремится к схеме армирования $[\pm 64^\circ]$ [22].

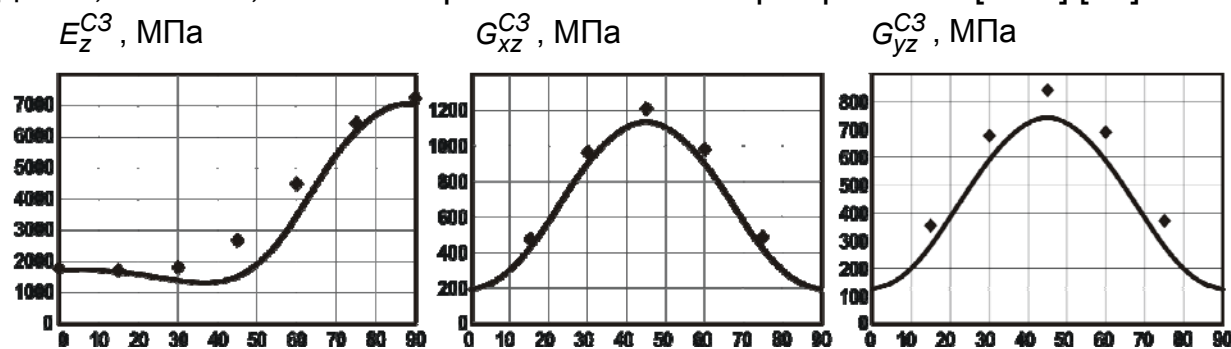


Рисунок 3 – Зависимость модулей упругости сдвига углесотопласта от угла его армирования:

— аналитическое определение; ■■■ полученное на основе численного эксперимента с использованием конечно-элементных моделей

В последнее время все шире применяются композитные конструкции, содержащие сэндвичевые цельнопрессованные панели с наполнителем из трубок прямоугольного, трапециевидного и других сечений [3]. Такие трубчатые наполнители (ТЗ) обладают значительными преимуществами по сравнению с сотовыми или пенопластовыми для ряда видов нагрузений. Однако, если СЗ относится к классу легких наполнителей, у которых ФМХ в плоскости сэндвичевой панели несоизмеримо малы по сравнению с их значениями в направлении, перпендикулярном к несущим слоям [1, 2], то ТЗ относится к классу жестких, обладающих свойствами, близкими по величине в направлениях всех трех осей.

Для возможности поиска рациональных параметров таких конструкций, во всяком случае на ранних стадиях проектирования, нами в [9] были синтезированы приближенные аналитические зависимости для определения модулей упругости и сдвига ТЗ из ПКМ, полученные при довольно грубых допущениях.

Возможности предложенной методологии делает привлекательным ее применение для оценки уровня ФМХ ТЗ [23] и последующей корректировки полученных зависимостей [24] с помощью постоянных коэффициентов, устанавливающих отношение

$$K_i^* = \frac{\Phi M X_i^A}{\Phi M X_i^{КЭ}}. \quad (1)$$

Для наполнителя этого типа необходимо располагать приведенными ФМХ в направлении всех трех осей координат и соответствующих им плоскостях.

Известно, что определение ФМХ проводится только на стандартизированных образцах согласно действующим нормативным документам. Однако в настоящее время отсутствуют какие-либо стандартизированные методики проведения физических либо численных экспериментов над ТЗ [1, 25]. Поэтому для определения величин ФМХ ТЗ были использованы существующие методики испытаний аналогичных сэндвичевых образцов [1, 25]. Например, в ходе определения приведенных модулей упругости ТЗ E_z^{T3} , E_x^{T3} проводились виртуальные (численные) испытания образцов с ТЗ на растяжение силой P вдоль осей Z и X , в результате чего замерялись относительные деформации и определялись соответствующие модули упругости [23, 24].

В качестве примера на рис. 4 показаны схема нагружения, конечно-элементная модель рассматриваемой системы трубок с граничными условиями для определения модуля упругости E_x^{T3} с соответствующей ей картиной распределения линейных перемещений.

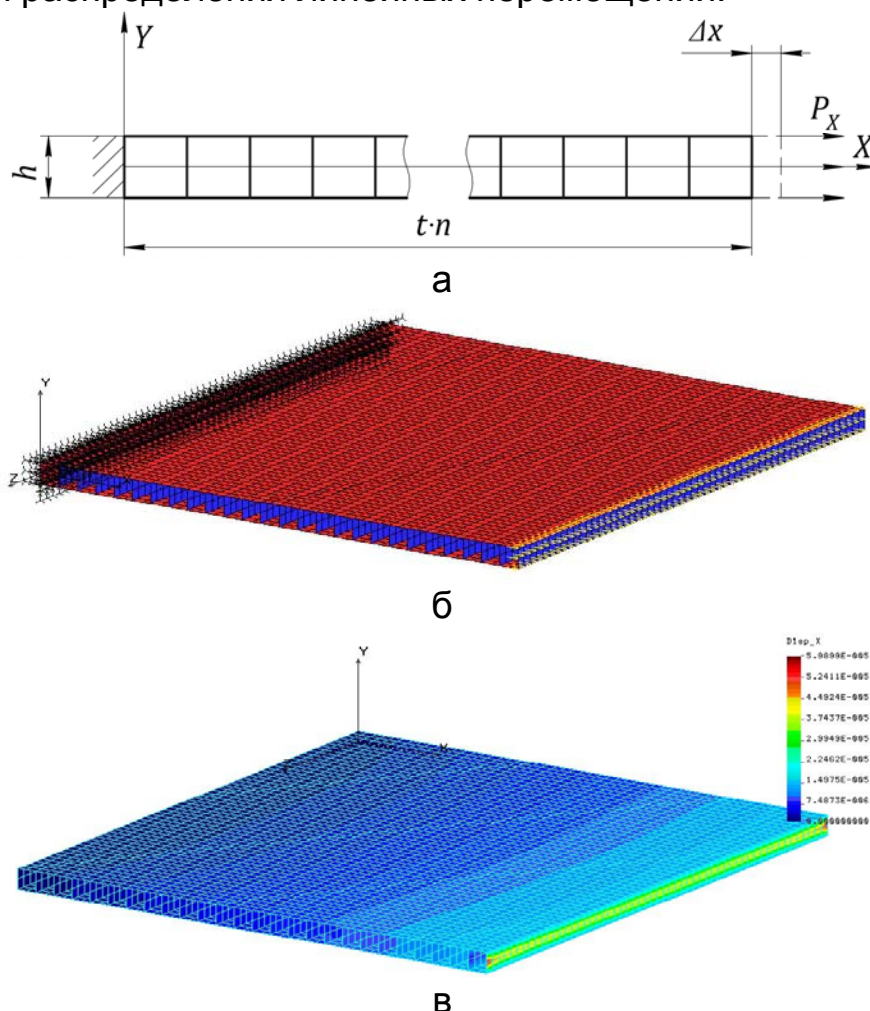


Рисунок 4 – К определению приведенного модуля упругости ТЗ вдоль оси X :

- а – схема нагружения и закрепления системы трубок;
- б – сгенерированная конечно-элементная модель образца;
- в – полученная картина линейных перемещений вдоль оси X

Для определения модуля упругости ТЗ при растяжении в направлении оси Y E_y^{T3} была использована схема испытаний, показанная на рис. 5, где образец квадратной формы в плане растягивается с помощью нагружающих жестких плит [25]. Для определения модуля сдвига G_{xz}^{T3} была использована схема кручения квадратной пластины (рис. 6) [25].

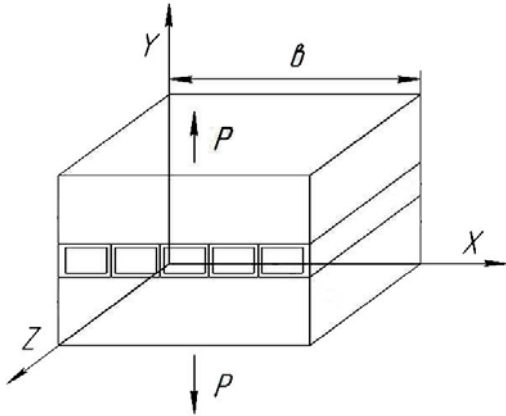


Рисунок 5 – Принятая для имитации схема испытаний на растяжение сэндвичевых образцов с ТЗ в трансверсальном направлении

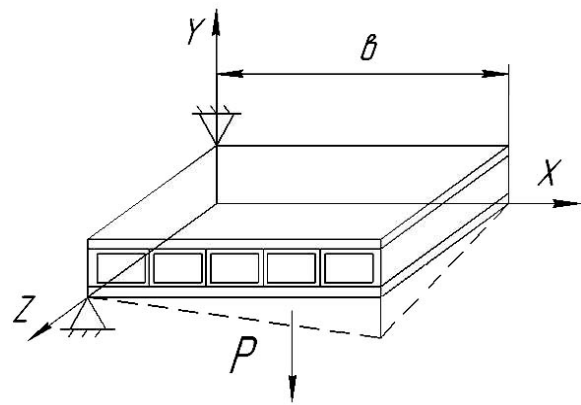
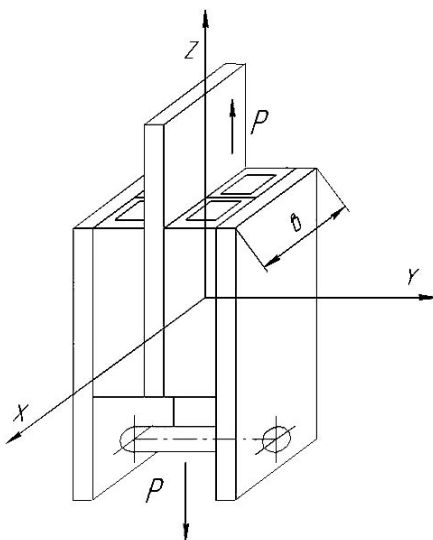
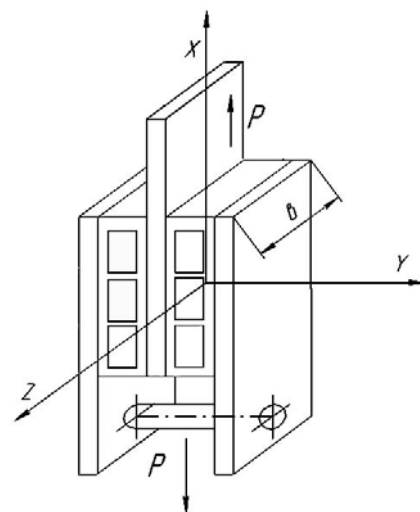


Рисунок 6 – Принятая для имитации схема кручения квадратной пластины для испытания на сдвиг образцов с ТЗ в системе координат XOZ

Для определения модулей сдвига ТЗ G_{zy}^{T3} , G_{xy}^{T3} , как и ранее, была использована двухобразцовая схема испытаний сэндвичевых образцов (рис. 7) [25]. При этом величины модулей упругости определялись по стандартным методикам для рассматриваемых схем испытаний [1].



для определения модуля сдвига G_{zy}^{T3}



для определения модуля сдвига G_{xy}^{T3}

Рисунок 7 – Принятые для имитации двухобразцовые схемы испытаний на сдвиг образцов с ТЗ

На основании полученных в результате серии виртуальных (численных) экспериментов результатов и сравнения их с найденными по предложенным аналитическим моделям представляется оправданным ввести следующие значения корректирующих коэффициентов для соответствующих упругих ФМХ ТЗ, представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые корректирующие коэффициенты для аналитических значений приведенных ФМХ ТЗ, полученные с помощью информационных технологий конечно-элементного анализа

Наименование ФМХ	Величина ФМХ		$\frac{\Phi M X_i^A}{\Phi M X_i^{KЭ}}$	Корректирующий коэффициент K_i^*
	Аналитический результат	Результат численного эксперимента		
Модуль упругости E_x^{T3} , МПа	672	580	1,16	1
Модуль упругости E_y^{T3} , МПа	672	784	0,85	0,85
Модуль упругости E_z^{T3} , МПа	1344	917	1,47	1
Модуль сдвига G_{xy}^{T3} , МПа	0,134	0,212	0,625	0,625
Модуль сдвига G_{zy}^{T3} , МПа	358	576	0,625	0,625
Модуль сдвига G_{xz}^{T3} , МПа	358	128	2,75	1

Учитывая отмеченную приближенность предложенного подхода, в качестве K_i^* были выбраны в запас жесткости те значения, которые меньше единицы, а в случае, когда они превышали единицу, принимались $K_i^* = 1$.

Иллюстрация возможностей предложенной методологии применительно к другим типам композитных заполнителей также показала ее достаточно эффективностью. Были исследованы углепластиковые трапециевидный гофровый заполнитель и складчатый с ячеистой структурой со схемой армирования $[0^\circ, 90^\circ]$ [26]. Для определения модулей упругости и сдвига были использованы описанные выше схемы виртуальных испытаний сэндвичевых образцов. На рис. 8 показаны примеры некоторых сгенерированных конечно-элементных моделей образцов для проведения виртуальных испытаний.

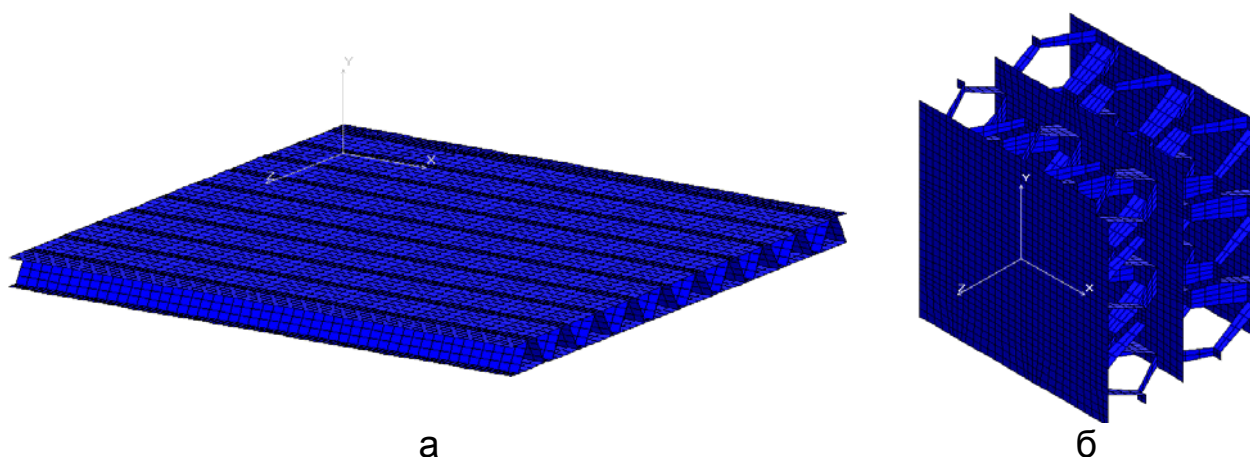


Рисунок 8 – Примеры сгенерированных конечно-элементных моделей сэндвичевых образцов с различными типами заполнителей:
а – гофрированный; б – складчатый с ячеистой структурой

В табл. 2 представлены полученные результаты.

Таблица 2 – Величины ФМХ различных типов композитных заполнителей, полученные с помощью информационных технологий конечно-элементного анализа

Наименование ФМХ	Величина ФМХ	
	гофрированного заполнителя	складчатого заполнителя ячеистой структурой
Модуль упругости вдоль оси X E_x , МПа	684	1,8
Модуль упругости вдоль оси Y E_y , МПа	135	1,3
Модуль упругости вдоль оси Z E_z , МПа	89	0,8
Модуль сдвига в плоскости XY G_{xy} , МПа	208	17,9
Модуль сдвига в плоскости ZY G_{zy} , МПа	0,18	55,9
Модуль сдвига в плоскости XZ G_{xz} , МПа	25,5	41,7

Таким образом, предложен подход к получению величин приведенных ФМХ различных типов композитных заполнителей сэндвичевых конструкций АРКТ, в основе которого лежит методология информационной поддержки, позволяющая выявить предельно возможный уровень их характеристик без проведения дорогостоящих натурных испытаний реальных опытных образцов.

В заключение следует отметить, что используемые процедуры многократной реализации конечно-элементного анализа все-таки достаточно трудоемки и требуют существенных временных затрат, а степень достоверности полученных результатов зависит от ряда факторов, к которым, прежде всего, следует отнести:

- геометрическую форму и размеры образцов;
- выбор и точность реализации схемы закрепления образца при том или ином виде нагружения;
- способ воспроизводства вида нагрузки, соответствующей установлению той или иной ФМХ или показателю прочности;
- размеры и вид конечных элементов, на которые разбивается соответствующий образец.

По этой причине виртуальные (численные) испытания не могут полностью заменить реальные опытные образцы и натурные эксперименты, а позволяют лишь сократить их число, существенно снижая материальные и временные затраты.

Список использованных источников

1. Панин, В.Ф. Конструкции с заполнителем [Текст]: справ. / В.Ф. Панин, Ю.А. Гладков – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
2. Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения: моногр. в 2 т. – Т.1. Технологические несовершенства сотовых заполнителей и конструкций [Текст] / А.В. Гайдачук, О.А. Карпикова, А.В. Кондратьев и др.; под ред. А.В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – 279 с.
3. Двейрин, А.З. Анализ эффективности внедрения интегральных конструкций с трубчатыми элементами из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.З. Двейрин, Е.В. Майорова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (68).– Х., 2011. – С. 65 – 77.
4. Сідоров, Д.Е. Методика визначення довжини шляху формовання гофри [Текст] / Д.Е. Сідоров, С.О. Пристайлов, Ж.О. Дудар // Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 30-й междунар. науч.-практ. конф., Ялта 7–11 июня 2010 г. / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология». – К., 2010. – С. 258 – 260.
5. Перспективы применения складчатых структур как альтернативных материалов заполнителя сэндвичевой панели [Электронный ресурс] / В.И. Халиулин, В.В. Батраков, И.В. Двоеглазов, К. Мудра // Тр. 4-й Московской междунар. конф. «Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» 26 – 29 апреля 2005 г. – Режим доступа: <http://pandia.org/text/77/288/3793.php>
6. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.

7. Гайдачук, В.Е. Методика предэскизного проектирования панельных конструкций летательных аппаратов с трубчатым наполнителем [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (59). – Х., 2009. – С. 73 – 84.

8. Прочность, устойчивость, колебания: справ. в трех томах [Текст] Т. 2. / под общ. ред. И.А Биргера, Я.Г. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – 463 с.

9. Гайдачук, В.Е. Приведенные физико-механические характеристики трубчатого наполнителя для трехслойных конструкций летательных аппаратов [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2009. – Вып. 44. – С. 67 – 78.

10. Хасанов, А.Р. Разработка элементов системы автоматизации инженерных расчетов для синтеза складчатых наполнителей многослойных панелей авиационных конструкций [Текст] / А.Р. Хасанов, К.А. Алексеев // Ползуновский альманах. – 2010. – № 2. – С. 322 – 326.

11. Углесотопласт и сотовые конструкции на его основе для терморазмеростабильных изделий ракетно-космической техники [Текст] / А. И. Алямовский, В. И. Сливинский, А. В. Кондратьев, М. Е. Харченко, Н.И. Копыла // Композитные материалы. – 2013. – Т.7, № 1. – С. 33 – 43.

12. Компьютерный инжиниринг [Текст]: серия докл. / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин и др. – Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»: СПб., 2012. – Вып. 2 – 93 с.

13. МКЭ-поддержка экспериментов по определению полного набора упругих констант ортотропных полимерных композитов [Текст] / В.А. Акопьян, В.Н. Аксенов, Е.В. Рожков и др. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Идентификация и моделирование свойств материалов и технологических процессов: тр. 5-й Московской междунар. конф. 24-27 апреля 2007; под ред. К.В. Фролова, О.С. Сироткина, В.С. Боголюбова. – М.: Знание, 2008. – С. 437 – 442

14. Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ упругих и прочностных свойств стекловолоконного композиционного материала [Текст] / Е.А. Неклюдова, А.С. Семенов, Б.Е. Мельников, С.Г. Семенов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – №3 (47). – С. 25 – 41.

15. Кельтон, В. Имитационное моделирование [Текст] / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб.: Питер; К.: ВЕЛ, 2004. – 847 с.

16. Гайдачук, А.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – Вып. 3(70). – С.11 – 20.

17. Коваленко, В.А. Научные основы технологии производства агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02; защищена 31.10.2014 / Коваленко Виктор Александрович. – Х., 2014. – 414 с.

18. Гайдачук, В.Е. Корректировка существующих аналитических зависимостей физико-механических характеристик сотового заполнителя с учетом его высоты [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2008. – Вып. 40. – С. 5 – 12.

19. Технологические аспекты совершенствования свойств углесотопласта [Текст] / В.И. Сливинский, В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, М.Е. Харченко, А.И. Алямовский, Л.Н. Волконский, В.В. Гаврилко // Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 32-й междунар. науч.-практ. конф., Ялта 4–8 июня 2012 г. / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология». – К., 2012. – С. 95 – 97.

20. Сливинский, В.И. Влияние схемы армирования наполнителя на свойства углесотопласта [Текст] / В.И. Сливинский, А.В. Кондратьев, М.Е. Харченко // Композитные материалы. – междунар. науч.-техн. сб. – 2012. – Т.6, № 1. – С. 33 – 40.

21. Оценка физико-механических характеристик углесотопласта различной схемы армирования при помощи МКЭ-поддержки [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф., Днепрпетровск 01 – 03 июня 2011 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Дп., 2011. – С. 54 – 59.

22. Определение рациональной схемы армирования углесотопласта при помощи МКЭ-поддержки [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский, М.Е. Харченко // Системні технології: регіональний міжвузівський зб. наук. праць. – Вып. 2 (79). – Др., 2012. – С. 3 – 12.

23. Кондратьев, А.В. Численное определение приведенных упругих физико-механических характеристик трубчатого заполнителя [Текст] / А.В. Кондратьев, Е.В. Майорова, А.А. Чумак // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац.

аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (69).– Х., 2012. – С. – 70 – 79.

24. Кондратьев, А.В. Определение физико-механических характеристик композитной трубчатой структуры при помощи МКЭ-поддержки и сравнение их с аналитическими результатами [Текст] / А.В. Кондратьев, Е.В. Майорова, К.Д. Стэнлиэ // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2012. – Вып. 53. – С. 124 – 131.

25. Гайдачук, А.В. Экспериментально-теоретическая методика определения физико-механических характеристик и прочностных свойств сэндвичевой трубчатой структуры из ПКМ [Текст] / А.В. Гайдачук, Е.В. Майорова, А.А. Чумак // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 6(103). – С. 25 – 31.

26. Кондратьев, А.В. Определение физико-механических характеристик ячеистого заполнителя [Текст] / А.В. Кондратьев, В.А. Чижов / Сучасні проблеми ракетно-космічної техніки і технології : тез. доп. ІХ наук.-техн. конф. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». –Х., 2012. – С. 125 – 126.

Поступила в редакцию 01.10.2014.

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский, УкрНИИТМ, г. Днепропетровск.