

Соловьев И. А., Шитикова М. В.

I. A. Solovyev, M. V. Shitikova

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА
АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ТРЁХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН
С ТЕТРАКИРАЛЬНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

**EXPERIMENTAL SIMULATION OF THE THREE-POINT BENDING OF ADDITIVELY
MANUFACTURED THREE-LAYER COMPOSITE PLATES WITH A TETRACHIRAL CORE**

Соловьев Иван Алексеевич – аспирант Воронежского государственного технического университета (Россия, Воронеж). E-mail: ivansolovev3112@gmail.com.

Ivan A. Solovyev – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (Russia, Voronezh). E-mail: ivansolovev3112@gmail.com.

Шитикова Марина Вячеславовна – доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель Международного научного центра по фундаментальным исследованиям в области естественных и строительных наук им. Заслуженного деятеля науки РФ, профессора Ю. А. Россихина, Воронежский государственный технический университет (Россия, Воронеж); главный научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики РААСН (Россия, Москва). E-mail: mvs@vgasu.vrn.ru.

Marina V. Shitikova – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Leader of the International Scientific Center for Fundamental Research in the Field of Natural and Building Sciences named after Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Yu. A. Rossikhin, Voronezh State Technical University (Russia, Voronezh); Leading Researcher of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Russia, Moscow). E-mail: mvs@vgasu.vrn.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты статических испытаний на трёхточечный изгиб композитных трёхслойных пластин со сплошными внешними слоями и сотовым наполнителем тетракирального типа. Пластины изготавливались с помощью 3D-печати (стереолитографическая печать). Были проведены испытания четырёх серий образцов, отличающихся между собой дискретизацией (количеством элементарных ячеек) наполнителя. Образцы одной серии отличаются толщиной тетракиральных сот, но при этом сохраняется объём их твёрдого тела. В результате испытаний были получены графики зависимости нагрузки от перемещений. Показано, что толщина сотового наполнителя существенно влияет на прочность композитов, несмотря на уменьшение толщины рёбер сотового наполнителя.

Summary. The article presents the results of static tests for the three-point bending of composite three-layer plates with continuous outer layers and a tetrachiral honeycomb core. The plates have been made using 3D printing (stereolithographic printing). Four series of samples have been tested, varying in the discretization (number of elementary cells) of the filler. Samples within the series differ in the thickness of tetrachiral honeycombs, in so doing the volume of their solid body remains the same. As a result of the tests, graphs of the displacement dependence of the load have been obtained. It has been shown that the thickness of the honeycomb core significantly affects the strength of the composites, despite the decrease in the thickness of the ribs of the honeycomb core.

Ключевые слова: стереолитографическая печать, тетракиральный сотовый наполнитель, композитные пластины, статические испытания.

Key words: stereolithographic printing, tetrachiral honeycomb core, composite plates, static testing.

УДК 539.374:620.174

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, проект № 3.1.1.2 «Строительная механика и материаловедение 3D печатных композитов».

Исследования проводились в Центре коллективного пользования имени профессора Ю. М. Борисова на базе Воронежского государственного технического университета, дооснащение которого проводилось при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-662.

Введение. В последние годы учёные во многих областях науки и техники стали уделять большое внимание ауксетикам (материалам с отрицательным коэффициентом Пуассона) [8; 11; 13]. Эти материалы обладают необычным механизмом деформации: они расширяются в направлении, перпендикулярном приложению силы, при растяжении и аналогично сжимаются при сжатии. О существовании натуральных материалов с данными свойствами известно давно [1; 5; 12; 16; 17], но изучение и создание искусственных материалов с ауксетическими свойствами были практически невозможны из-за сложности воспроизведения. В настоящее время, когда широкое развитие получили технологии 3D-печати, создание синтетического ауксетика больше не вызывает сложности.

На сегодняшний день внимание материаловедов привлекают методы повышения эксплуатационных характеристик традиционных материалов путём создания структур, обладающих существенно нелинейными и аномальными деформационными свойствами, вплоть до получения адаптивной механической реакции материалов на внешнее воздействие. К таким материалам и относятся ауксетики. В сравнении с классическими материалами ауксетики обладают рядом преимуществ: повышенное поглощение энергии, усиленное сопротивление к формированию и раскрытию трещин, лучшее сопротивление вдавливанию. Улучшение этих преимущественных свойств в материале постоянно интересует производителей различных конструкций. Зачастую данные механические свойства встречаются в композитах.

В данной работе рассмотрены методы исследований композитных пластин, материалы из которых их изготавливают, технология изготовления и проведения эксперимента по трёхточечному изгибу композитных пластин.

Так, в работе [2] рассматривали влияние толщины и количества слоёв заполнителя на механические свойства многослойной сэндвич-структуры из сотового заполнителя и облицовки при трёхточечном изгибе. По результатам экспериментов, которые согласуются с численными расчётами, был сделан вывод, что механические свойства многослойных пластин (в частности, модуль сдвига) возрастают с увеличением слоёв заполнителя и уменьшаются с увеличением толщины сотового заполнителя.

Низкоскоростное ударное воздействие на композитные сэндвич-панели с различными типами ауксетических и неауксетических призматических структур заполнителя исследовано в работе [15]. Для изготовления ауксетической сердцевины использовались технологии 3D-печати. По результатам испытаний по сбрасыванию бойка на образцы были сделаны выводы о том, что композиты с ауксетическим слоем обладают большей ударопрочностью, чем неауксетические заполнители. Композиты с ауксетиком лучше могут поглощать энергию и сильнее воспрепятствуют вдавливанию. Это означает, что для разрушения материала требуется удар с большей энергией.

В работе [6] проводили сравнительное исследование надёжности композитов с ауксетическими и неауксетическими заполнителями. Рассматриваемый образец состоял из двух внешних сплошных листов и полимерного заполнителя, напечатанного на 3D-принтере. По результатам исследования был сделан вывод о том, что слой с отрицательным коэффициентом Пуассона придаёт композитам большую надёжность и долговечность. Также при повторных воздействиях на композит было выявлено стабильное поведение пластин с ауксетическим заполнителем.

Возможность разработки вариантов устранения недостатков ауксетических конструкций (относительно низкая жёсткость и устойчивость) исследовалась в [18]. Решение данной проблемы предлагается путём заполнения ауксетических каркасов мягкими материалами. Ауксетический каркас кирального типа был изготовлен с применением технологий 3D-печати. Данные образцы испытывали на квазистатическое сжатие. Результаты показали, что наполнительная пена может снизить ауксетичность, при этом значительно увеличить жёсткость материала.

Поведение при изгибе и свободные колебания прямоугольной многослойной пластины с ауксетическим сотовым наполнителем изучались в работе [14]. Пластина представляет собой прямоугольную конструкцию из двух тонких сплошных плит и сотового наполнителя с шестиугольной элементарной ячейкой вида «песочные часы». В данной статье проводились только численные исследования, в которых рассматривались пластинки с различным углом наклона бокового ребра ячейки относительно вертикали. Показано, что угол наклона элементарной ячейки ауксетических сот оказывает существенное влияние на собственную частоту.

В работе [4] представлены результаты разработки простых и недорогих полимерных многослойных пластин с применением домашнего настольного 3D-принтера и дана оценка их свойств при изгибе. Основное внимание было уделено конфигурации из одного материала, в которой как внутреннее сотовое ядро, так и внешняя оболочка изготавливаются из PLA с помощью одного экструдера. Было испытано 5 образцов, 4 из которых показали идентичные результаты, кроме одного, так как в качестве поверхности приложения нагрузки была выбрана нижняя поверхность образца, в отличие от четырёх других, при этом из-за тепла, которое выделяет печатный пол, создавалось предварительное напряжение.

Влияние размера элементарной ячейки сотового наполнителя в виде правильного шестиугольника, а также влияние ширины трёхслойного слоистого композита на жесткостные характеристики композитной пластинки изучались в работе [7]. Сотовая структура изготовлена из кевлара, внешние слои – из углеродного волокна. Были произведены численные расчёты с помощью ANSYS и серии испытаний на трёхточечный изгиб. По результатам было замечено, что размер ячейки сотового наполнителя не оказывает существенного влияния на жесткостные свойства композитной сэндвич-панели. Анализ также показал, что с увеличением ширины панели значительно увеличивается жёсткость композитной панели. Результаты, полученные в данной работе, хорошо согласуются с произведёнными исследованиями в работе [9], в которой были разработаны численные модели композитных пластин с двумя полнотелыми лицевыми пластинами и сотовым наполнителем. Рассматривались сотовые структуры с различной степенью дискретизации (размером элементарной ячейки). Согласно проведённым расчётам, структуры с более низкой дискретностью показывают более высокую прочность по сравнению со структурами с более высокой дискретностью. Также при увеличении относительной плотности сот с 14 до 71 % разница между максимальными напряжениями в сотах с разной дискретностью имеет ярко выраженную область нарастания и последующего спада.

Численный анализ прочности слоистых композитных пластин со сплошными внешними слоями и сотовой прослойкой тетракирального типа в условиях статического изгиба проведён в работе [10]. В качестве материала пластин выбран алюминиевый сплав. У сотовых прослоек варьировались дискретизация (количество элементарных ячеек) и относительная плотность при постоянной толщине. Расчёты проводились при жёстком закреплении с торцов и при трёхточечном изгибе в рамках теории упругости методом конечных элементов. В процессе анализа прочности определялись значения нагрузки, при которых максимальные напряжения приравнивались к условному пределу упругости материала. Результаты численного расчёта показали, что тетракиральные соты с относительной плотностью сотовых наполнителей от 20 до 70 % обладают значительно большей прочностью по отношению к сплошным плитам при равном объёме твёрдого тела. Соты с большим размером элементарной ячейки прочнее по сравнению с сотами с меньшим размером элементарной ячейки при той же относительной плотности.

Исходя из краткого обзора, приведённого выше, можно сделать вывод, что изучение композитных пластин является актуальной темой. Целью данной работы является оценка прочностных характеристик трёхслойных композитных пластин, в которых средний слой, проявляющий ауксетические свойства, является ячеистой структурой тетракирального типа, для чего были изготовлены композитные образцы, разделённые на 4 серии, отличающиеся между собой степенью дискретизации. Внутри каждой серии пластинки отличаются друг от друга толщиной рёбер и ячеистого наполнителя за счёт сохранения постоянного объёма твёрдого тела на каждый элемент.

Производство сэндвичей с помощью LFS-технологии и тестовая установка. Исследования проводились для четырёх серий композитных пластин, в каждой серии по девять образцов. Серии образцов отличаются друг от друга размерами элементарной ячейки. Для анализа были взяты следующие параметры (см. рис. 1): $L_h = 1.6d_a$, где $d_a \in 1.0, 1.3, 1.6$ и 1.9 мм. Внутри серии толщина ячеистого заполнителя t_{cl} варьируется от 0.7 до 3.58 мм. На рис. 1 представлен вид сотовой структуры тетракирального типа.

Для изготовления всех образцов было разработано 36 3D-моделей сотовой структуры (под каждую дискретизацию и толщину стенки) и модель лицевой пластины.

Создание образцов включает в себя следующие этапы:

1. печать сотового заполнителя и лицевых пластин на 3D-принтере;
2. очистку напечатанных элементов в ультразвуковой ванне;
3. предварительное доотверждение в ультрафиолетовой камере;
4. доведение сотового заполнителя до требуемых размеров и ровности поверхности путём шлифования;
5. очистку отшлифованных элементов от пыли;
6. нанесение клеящего состава на лицевые пластинки;
7. склеивание элементов в единый образец в ультрафиолетовой камере.

Рассмотрим этапы более подробно.

1. Для печати элементов применялся 3D-принтер Formlabs Form 3 (см. рис. 2, а) с технологией печати LFS (Low Force Stereolithography). Данный принтер полностью погружает платформу для печати в смолу, после чего при помощи лазера послойно отверждает заданные элементы. Ячеистый заполнитель на платформе располагается так, чтобы в отверстиях не скапливались избытки смолы и была возможность свободной очистки после поднятия платформы из смолы. Лицевые пластины располагались так, чтобы слои были параллельны длинной стороне. Для изготовления данных образцов толщина слоя отверждения составляла 100 мкм.

2. После окончания работы принтера элементы изымаются из смолы. Так как они были погружены полностью, то для избавления от остатков смолы требуется мойка образцов изопропиловым спиртом в ультразвуковой ванне (см. рис. 2, б). Изопропиловый спирт разъедает неотверждённую смолу, а ультразвук способствует ускорению данного процесса и более качественному его выполнению. Для получения чистых образцов требуется в течение 5 минут держать элементы в ванне.

3. После получения чистых элементов их необходимо поместить в ультрафиолетовую камеру (см. рис. 2, в). При печати элементы не добирают прочностных характеристик, и для получения требуемых значений производится доотверждение элементов. Требуемое время под ультрафиолетом составляет десять минут. Данный процесс производится в несколько этапов: вначале, после мойки, для упрощения механической обработки, и в конце при склеивании элементов в единый образец. Для получения требуемых характеристик, помимо самого ультрафиолетового воздействия, также требуется приложение давления на образцы для их выравнивания. Так как испытываемые образцы имеют достаточно малые размеры, то их геометрия может измениться от небольшого нагрева или физического воздействия. Чтобы не потерять определённую требуемую структуру, при отверждении образцы зажимаются между двумя кварцевыми стеклами, и сверху ставится груз массой 1 кг. При этом груз располагается так, чтобы не перекрывать ультрафиолетовое излучение.

4. Для изготовления образцов использовалась прозрачная смола. В связи с этим при печати первых слоёв элементов часть лазерного излучения выходит за границы требуемого элемента и на

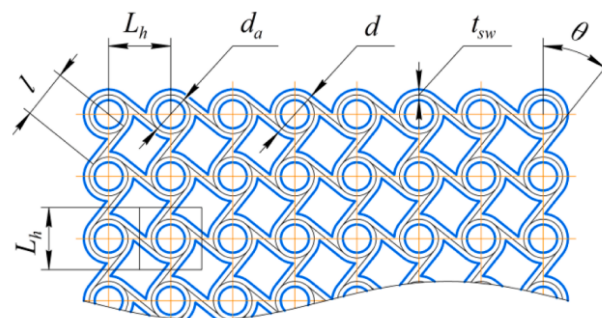


Рис. 1. Сотовая структура тетракирального типа

них образуются наплывы смолы. Из этого следует, что требуется некоторая механическая доработка образцов перед их дальнейшим исследованием. Для этого используется сначала наждачная бумага с фракцией 100 для удаления больших неровностей, а после фракцией 1000 образец полируется до полного выравнивания, чтобы обеспечить максимальную площадь контакта поверхностей при последующей склейке. На рис. 2, з показан процесс доработки элементов.

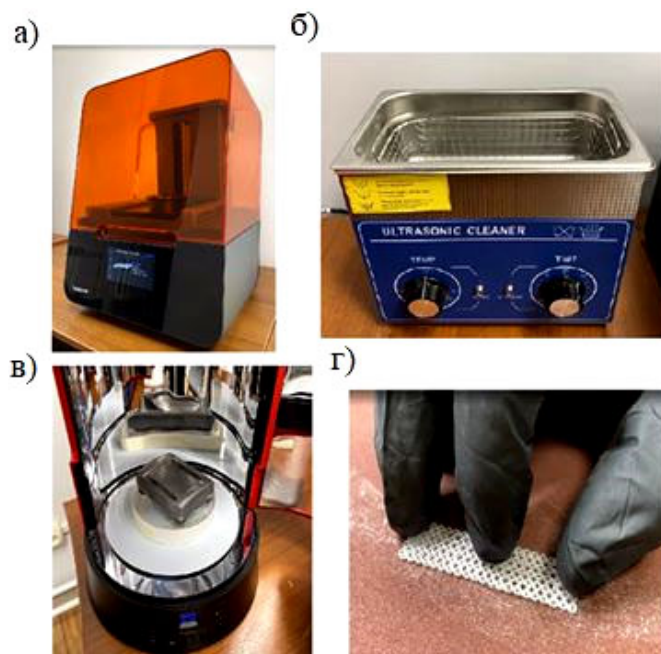


Рис. 2. Этапы изготовления композитов: а – 3D-принтер Formlabs Form 3; б – ультразвуковая ванночка для мойки в изопропиловом спирте; в – ультрафиолетовая камера с образцами; г – процесс механической доработки элементов с помощью наждачной бумаги

5. После того как образцы были отшлифованы, их снова требуется промыть, т. к. пыль и кусочки наждачной бумаги оседают и застревают в узких местах структуры. Данный пункт полностью повторяет все производимые действия пункта 2.

6. По завершении всех подготовительных этапов приступаем к сборке композитов. Для этого при помощи кисточки тонким ровным слоем на лицевые сплошные пластинки наносится смола. После этого собираются все три компонента композита и аккуратно укладываются на кварцевое стекло, при этом не допускается смещение слоёв относительно друг друга.

7. Последний этап создания пластин заключается в отверждении образцов между кварцевых стекол под давлением груза, как в пункте 3. Композиты находятся в камере в течение 5 минут. За это время элементы ещё набирают прочности, а смола, выступающая связующим звеном между элементами, затвердевает до необходимой прочности за счёт тонкости данного слоя. Так как в каждой партии все образцы отличаются друг от друга толщиной сотового наполнителя, то отверждение производится по три образца: по одному образцу с каждой партии с одинаковой толщиной, поскольку они имеют одинаковые размеры. Для отвердевания образцов четвертой партии были изготовлены дополнительные элементы с требуемой толщиной, чтобы процесс отверждения всех образцов происходил в одинаковых условиях. На рис. 3 показаны композиты серии 1.6.

Тестовая установка. Тест проводился в частичном соответствии с процедурой, проиллюстрированной в стандарте ASTM D790 [3]. Были измерены толщина и ширина каждого образца, собранные результаты необходимы для проверки производительности процесса и получения геометрических характеристик для расчёта механических свойств. Также каждый образец был взвешен для контроля количества твёрдого тела. В табл. 1 приведены массы каждого образца.



Рис. 3. Композиты серии 1.6: вид сверху и вид с торца

Таблица 1

Масса образцов, г

Толщина ячеистого заполнителя, мм	Серии образцов			
	1.0	1.3	1.6	1.9
0.7	1.96	1.83	1.60	1.45
0.78	1.55	1.46	1.38	1.32
0.88	1.41	1.34	1.36	1.29
1.01	1.36	1.33	1.35	1.34
1.18	1.36	1.32	1.33	1.27
1.42	1.30	1.35	1.28	1.33
1.77	1.35	1.35	1.30	1.35
2.37	1.32	1.28	1.35	1.27
3.58	1.33	1.36	1.34	1.34

После оценки геометрических характеристик можно было проводить эксперимент. Чтобы смоделировать условия трёхточечного изгиба, каждый образец для испытаний располагался горизонтально на двух опорах, представляющих собой металлические цилиндры с диаметром 10 мм. Нагрузка давалась пуансоном диаметром 4 мм, который симметрично расположен между двумя опорами и действует на верхнюю поверхность композита. Прогиб образца на этапе нагружения измерялся с использованием информации, полученной по положению траверсы. Движение пуансона было настроено с использованием постоянной скорости деформации, равной 8 мм/мин.

Предварительные результаты испытаний и механическое поведение многослойных образцов. На рис. 4 представлены необработанные графики кривых нагрузка-прогиб для всех серий образцов. В результате испытаний были получены прочность на изгиб и данные для определения модуля упругости. Прочность на изгиб определяется как максимальное значение напряжения, которое может выдержать образец. Модуль упругости указывает на устойчивость материала к деформации под нагрузкой. С графической точки зрения он указывает наклон кривой напряжения-деформации при определённом уровне напряжения. Как и ожидалось, все образцы изначально демонстрировали гуковское поведение; в этой части графика тренд кривой напряжения-деформации почти линейный. В табл. 2 приведены пределы прочности при изгибе всех образцов.

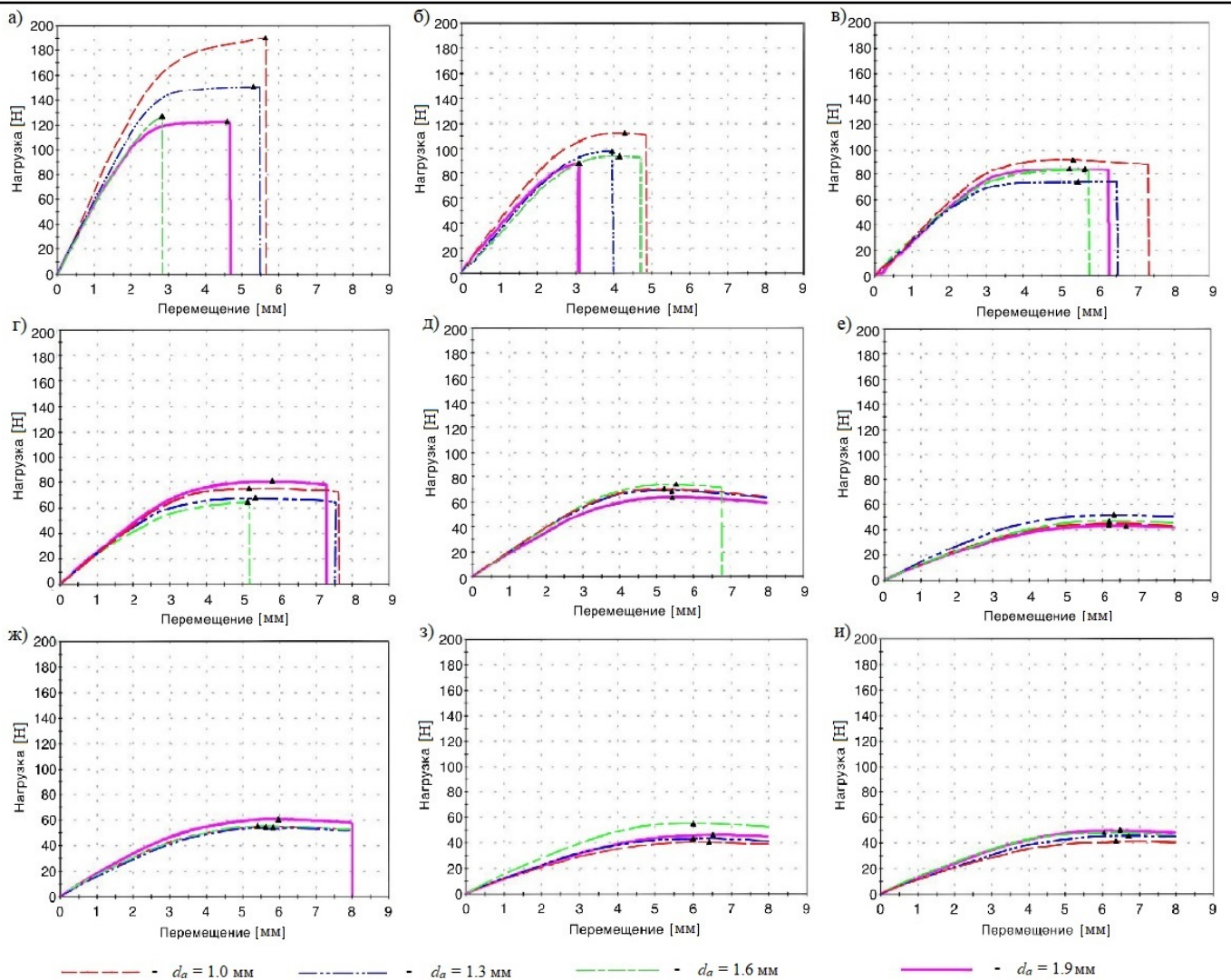


Рис. 4. Необработанные кривые нагрузка-прогиб образцов с толщиной $t_{cl} = 0.7$ мм (а); $t_{cl} = 0.78$ мм (б); $t_{cl} = 0.88$ мм (в); $t_{cl} = 1.01$ мм (г); $t_{cl} = 1.18$ мм (д); $t_{cl} = 1.42$ мм (е); $t_{cl} = 1.77$ мм (ж); $t_{cl} = 2.37$ мм (з); $t_{cl} = 2.58$ мм (и)

Таблица 2

Предел прочности при изгибе, МПа

№ графика	Толщина ячеистого заполнителя, мм	Серии образцов			
		1.0	1.3	1.6	1.9
а	0.7	175.73	140.17	117.01	113.37
б	0.78	103.45	89.76	88.75	81.00
в	0.88	84.99	68.52	79.26	77.97
г	1.01	69.58	62.91	60.88	74.39
д	1.18	64.99	63.83	69.77	59.30
е	1.42	41.31	48.12	43.79	40.13
ж	1.77	50.15	50.28	51.50	56.17
з	2.37	37.30	39.92	51.95	42.86
и	3.58	38.47	42.45	44.85	46.23

Закключение. В данной работе было изготовлено четыре серии композитных пластин с акустическим заполнителем тетракирального типа, которые отличались друг от друга размерами элементарной ячейки, при этом внутри серии варьировалась толщина ячеистого заполнителя. Они

были испытаны на статический трёхточечный изгиб для изучения влияния дискретизации и толщины стенки рёбер сотового заполнителя на прочностные характеристики пластин при постоянном объёме твёрдого тела. Нагрузка на образец прикладывается по всей ширине пластинки посередине пролёта. Перемещения снимались в месте приложения нагрузки с использованием информации, полученной от положения траверсы. Изучив графики испытаний, представленные на рис. 4, можем сделать следующий вывод: чем толще образец, тем большей изгибной прочностью он обладает даже при уменьшении толщины стенки сотового заполнителя. Но также при этом увеличивается хрупкость пластинки. При изменении дискретизации с увеличением размера элементарной ячейки предел прочности пластинки уменьшается. Наблюдая последовательно за графиками на рис. 4, отметим, что с уменьшением выдерживаемой нагрузки заметно возрастают перемещения. Такое поведение нехарактерно для стандартных материалов, например, железобетона. Оно может обуславливаться нестандартной структурой сотового заполнителя. Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением толщины стенки различия в напряжённо-деформируемом состоянии образцов разной дискретизации уменьшаются, т. к. параметры сотового заполнителя приближаются к параметрам сплошной пластинки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляв, А. Математическая теория упругости / А. Ляв. – М.: ОНТИ, 1935. – 674 с.
2. Arbaoui, J.; Schmitt, Y.; Pierrot, J.-L. and Royer, F.-X. Effect of core thickness and intermediate layers on mechanical properties of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich structures. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014, 1. – P. 59.
3. ASTM, I. (2007) Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM D790-07.
4. Brischetto, S.; Ferro, C. G.; Torre, R. and Maggiore, P. 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. *Curved and Layered Structures*, 2018, 5(1). – P. 80-94.
5. Frolich, L. M.; LaBarbera, M. and Stevens, W. P. Poisson's ratio of a crossed fibre sheath: the skin of aquatic salamanders. *Journal of Zoology*, 1994, 232. – P. 231-252.
6. Hou, S.; Li, T.; Jia, Z.; Wang, L. Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact. *Material Design*, 2018, 160. – P. 1305-1321.
7. Kumar, A.; Angra, S.; Chanda, A. K. Analysis of effect of variation of honeycomb core cell size and sandwich panel width on the stiffness of a sandwich structure. *Research Engineering and Structural Materials*, 2021, 8(1). – P. 45-56. DOI: 10.17515/resm2021.308me0606.
8. Mazaev, A. V.; Ajenez, O. and Shitikova, M. V. Auxetics materials: classification, mechanical properties and applications. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2020, Vol. 747, PaperID 012008.
9. Mazaev, A. V. and Shitikova, M. V. Numerical analysis of the stressed state of composite plates with a core layer made of tetrachiral honeycombs under static bending. *Composites Part C: Open Access*, 2021, 6, PaperID 100217.
10. Mazaev, A. V. and Shitikova, M. V. Static bending strength of sandwich composite plates with tetrachiral honeycombs. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2021, 17(3). – P. 102-113.
11. Ren, X.; Das, R.; Tran, P.; Ngo, T. D. and Xie, Y. M. Auxetic metamaterials and structures: a review. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2), PaperID 023001.
12. Rossow, W. B.; Whitehead, J. A.; Covey, C. and Walterscheid, R. L. Elasticity of α -cristobalite: a silicon dioxide with a negative Poisson's ratio. *Science*, 1992, 257. – P. 650-652.
13. Saxena, K. K.; Das, R. and Calius, E. P. Three decades of auxetics research – Materials with negative Poisson's ratio: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 2016, 18. – P. 1847-1870.
14. Thang, N. T.; Van Long, N.; Tu, T.M. and Nam, N. H. Navier solution for static and free vibration analysis of sandwich plate with auxetic honeycomb core resting on Pasternak elastic foundation. *J Sci Tech Civil Eng (STCE)-HUCE 2022*, Retrieved from <https://stce.huce.edu.vn/index.php/en/article/view/2297>
15. Usta, F.; Türkmen, H. S. and Scarpa, F. Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures. *Thin-Walled Structures*, 2021, 163. PaperID 107738.
16. Veronda, D. R. and Westmann, R. A. Mechanical characterization of skin-Finite deformations *Journal of Biomechanics*, 1970, 3. – P. 111-124.
17. Williams, J. L. and Lewis, J. L. Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis *Journal of Biomechanical Engineering*, 1982, 104. – P. 50-56.
18. Zhang, X. G.; Ren, X.; Jiang, W.; Zhang, X. Y.; Luo, C.; Zhang, Y. and Xie, Y. M. A novel auxetic chiral lattice composite: Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 2022, 282, PaperID 115043.