ПРИМЕНЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ЯЧЕЕК ШТЕЙНЕРА В НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Драцкая А.И.

г.о. Королёв МО, МБОУ «Гимназия №5», кружок «Юный физик – умелые руки», 5 класс

Руководитель: Скворцова А.А., г. Москва, НИУ МАИ, студентка

Я делаю новый композиционный материал, глядя на мыльные плёнки. Они самые лёгкие и прочные, поэтому такая форма должна быть у арматуры перед заливкой наполнителем. Я показала решение задачи самого лёгкого армирования не только квадрата, как у Штейнера, но и куба – это 13 отрезков [1, 2]. Арматурные ячейки Штейнера по-разному изгибаются в разных направлениях. Я начала изучать анизотропию жёсткости, получила числа. По этим данным я изготовила несколько образцов композиционного материала. Для этого я предложила технологию эпоксидного литья в парафиновые формы. Моими результатами заинтересовались строители (Бронзовая медаль НИУ МГСУ), инноваторы (приз 10000 рублей) и металлурги (приглашение на выставку МеталлЭкспо-2019). Лауреат конкурса им. В.И. Вернадского 2019. Хочу изучить не только плоские, но и объёмные ячейки композиционного материала. Цель работы – создание нового лёгкого и прочного композиционного материала. В этой работе я изучаю арматурный каркас без наполнителя. Моей задачей было сделать каркас как можно легче. Каркас композиционного материала состоит из ячеек. Пока я изучаю только квадратные и кубические ячейки. Математическая задача для квадратной ячейки известна – это задача Штейнера о соединении четырёх вершин квадрата самой короткой линией. Решение – пять отрезков. Я получила это решение совершенно новым способом, глядя сбоку на мыльные плёнки на кубическом каркасе. Задача заключается в соединении множества самых лёгких ячеек Штейнера в одну конструкцию. Сначала нужно было соединить квадратные ячейки. Ячейка Штейнера похожа на жучка, поэтому две ячейки можно соединить двумя способами. Жёсткость и гибкость ячейки Штейнера разная в различных направлениях. Это свойство анизотропии жёсткости. Для достижения цели работы мне нужно было узнать и выразить в числах жёсткость и гибкость ячейки в разных направлениях. После этого надо было проверить правильность расчётов и сделать модель арматуры нового композиционного материала. Всё это я выполнила. Появились новые задачи.

Основная часть

Два года я решала задачу о соединении четырёх вершин квадрата самой короткой линией. Это математическая задача Штейнера. Я предложила новый способ решения этой задачи с помощью мыльных плёнок. Если посмотреть на мыльные плёнки на кубическом каркасе, то сразу видно решение этой задачи из пяти отрезков. Это квадратная ячейка Штейнера. Потом я решила задачу о соединении восьми вершин куба самой короткой линией. Сначала была гипотеза, что такая линия содержит 12 отрезков, потому что это показывали мыльные плёнки на кубическом каркасе. Но потом я поняла, что мыльные плёнки могут натягиваться по поверхностям, но не могут превратиться в тонкие линии, иначе сразу порвутся. Физическая модель не смогла показать правильное математическое решение. До него пришлось догадаться с помощью мыльных плёнок и уже известной квадратной ячейки Штейнера. Получилась линия из 13 отрезков, а не из 12, как показывали мыльные плёнки. Полученное решение я назвала кубической ячейкой Штейнера.

Потом я стала изучать физические свойства ячеек Штейнера. Квадратная ячейка Штейнера – это 5 отрезков, которые соединяют 4 вершины квадрата самой короткой линией, она показана на рис. 1. Полученные короткие линии не полностью симметричны. Это значит, что ячейка Штейнера анизотропна по прочности и жёсткости. В разных направлениях она по-разному будет изгибаться.

Цель моей работы – создание нового легкого и прочного композиционного материала. Несколько моделей нового материала я изготовила, испытала и много раз показывала на разных конференциях. Для следующей работы мне понадобилось изучить прочность и жёсткость ячейки Штейнера в разных направлениях.

Ячейка Штейнера – это силовая арматура или ниточки, которые надо залить эпоксидной смолой. Арматура будет самой лёгкой, потому что ячейка Штейнера самая короткая. Это математическая основа нового лёгкого композиционного материала.

Новая задача – как соединить множество ячеек Штейнера между собой в новом материале. Для кубической ячейки я доказала, что существует три способа соединения двух ячеек. В этой работе я изучаю только квадратную ячейку. Две квадратные ячейки можно соединить двумя способами, прочность и жёсткость материала будет различной.

Для решения этой задачи я зажимала по очереди каждую конструкцию в штатив за один конец цепочки, а другой конец нагружала подвешиванием разного числа гаек на ниточке, измеряла прогиб линейкой. Школьные грузы с весом по 1 Н оказались очень тяжёлыми, потому что от них цепочки очень сильно прогибались. Я стала нагружать цепочки гайками М8. Сначала надо было определить массу одной гайки. Для этого я взвесила 50 гаек, весы показали 227 г. Потом 227 г поделила на 50 и получила массу одной гайки приблизительно 4,5 г. Я нанизывала гайки на ниточку и подвешивала к концу цепочки. На рис. 2 показана схема лабораторной установки с цепочкой, штативом и гайками на ниточке. Прогиб цепочки измеряла школьной линейкой.

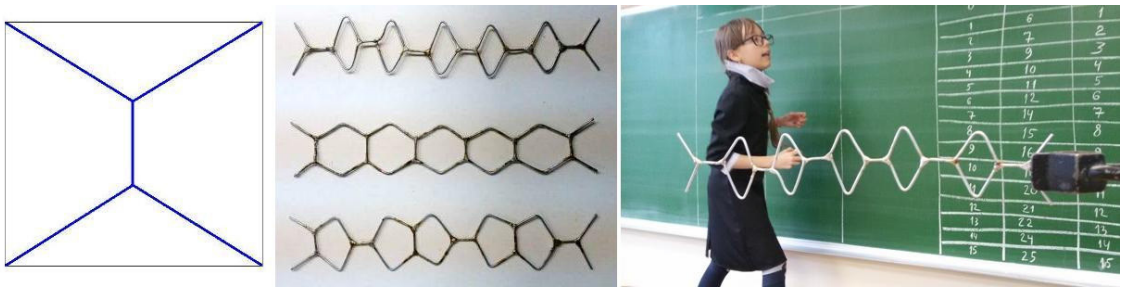


Рис. 1. Соединение ячеек Штейнера в арматуру

На рис. 1 показана одна квадратная ячейка Штейнера. Я спаяла из проволоки много таких ячеек, а потом соединила их по-разному. Я изучила три арматуры композиционного материала. В первой арматуре все перемычки лежат на одной линии, во второй расположены поперечно, в третьей чередуются. Есть много других вариантов, но их я пока не изучала.

Задача: изучить жёсткость и гибкость всех соединений и одной ячейки Штейнера в разных направлениях.

Рис. 2. Лабораторная установка для измерения прогиба цепочек

Я записала результаты в таблицу, перенесла в компьютер, вычислила жёсткость и гибкость в программе EXCEL, там же строила графики, определила ошибки, а потом делала выводы. На рис. 3 показаны графики прогиба каждой из трёх конструкций арматуры в двух направлениях: плашмя и рёбрами вверх.

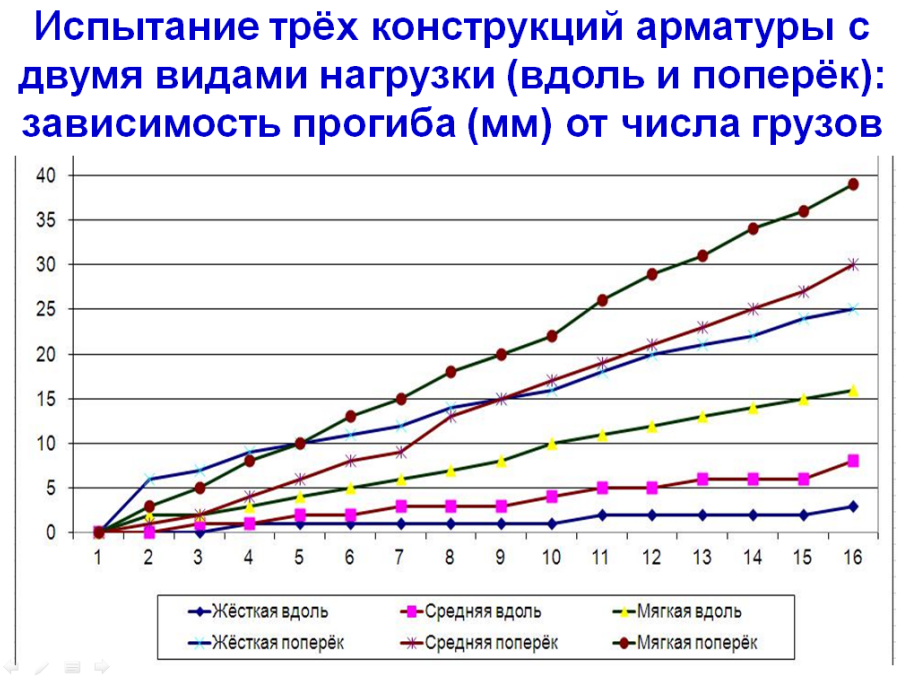


Рис. 3. Испытание трёх цепочек арматуры в двух направлениях нагрузки

Цель моей работы заключается в практическом применении анизотропии гибкости и жёсткости, поэтому я изучила полученные графики. Сначала я выбрала три графики, когда цепочки арматуры были закреплены рёбрами вверх, то есть самым жёстким способом. В таком положении прогиб цепочек был самым маленьким, но зависел от подвешенных грузов. На рис.4. Показаны графики прогиба трёх цепочек арматуры в самом жёстком направлении, когда рёбра направлены вверх. Цепочки арматуры изгибались по-разному в зависимости от положения в них ячеек Штейнера. Самая жёсткая цепочка с перемычками поперёк её линии прогнулась всего на 3 мм, при максимальной нагрузке, когда к её концу я подвесила 15 гаем М8. Самая гибкая цепочка с перемычками вдоль её линии прогнулась на 16 мм от пятнадцати гаек. Большое различие в прогибе цепочек доказало, что ячейки Штейнера в арматуре по-разному изгибаются в разных направлениях. Сразу появилась задача о создании цепочки арматуры с наперёд заданной гибкостью. Если ячейки Штейнера в цепочке чередовать перемычками вдоль-поперёк, то получится арматура со средней гибкостью. Так оно и получилось на практике. Это средний график, на котором цепочка прогнулась на 8 мм от пятнадцати гаек.

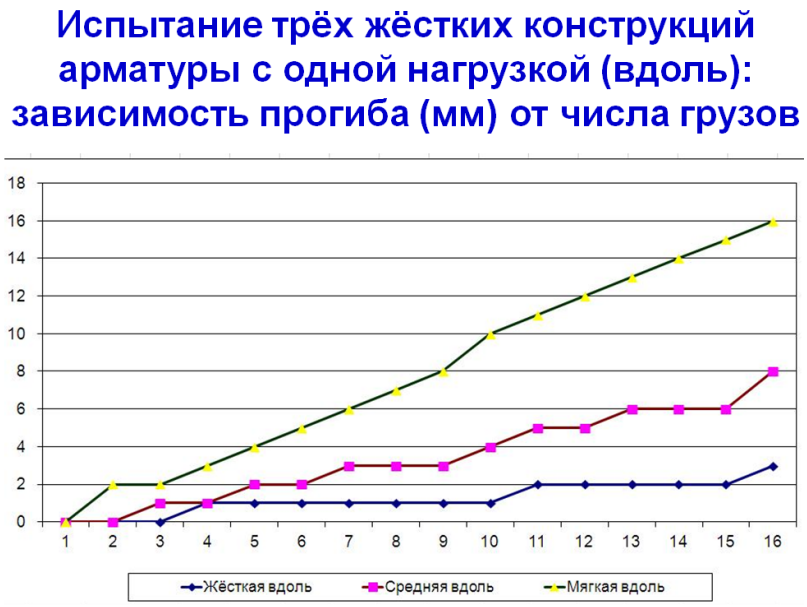


Рис. 4. Большая анизотропия, гибкость различается в 5–7 раз

После этого я повернула каждую из проволочных цепочек на 90 градусов и повторила испытания на гибкость. Графики испытаний показаны на рис.5. Теперь цепочки располагались плашмя, были очень гибкими, поэтому обладали маленькой жёсткостью, прогибались сильнее. Даже самая жёсткая цепочка в положении плашмя прогнулась на 25 мм от пятнадцати гаек М8, а самая гибкая цепочка прогнулась на 38 мм. Это означает, что в направлении плашмя анизотропия гибкости и жёсткости ячеек Штейнера маленькая, потому что различие в прогибе всего в 1,5 раза. Для средней цепочки с чередованием перемычек в ячейках Штейнера вдоль-поперёк гибкость оказалась промежуточной, цепочка арматуры прогнулась на 30 мм от пятнадцати гаек.

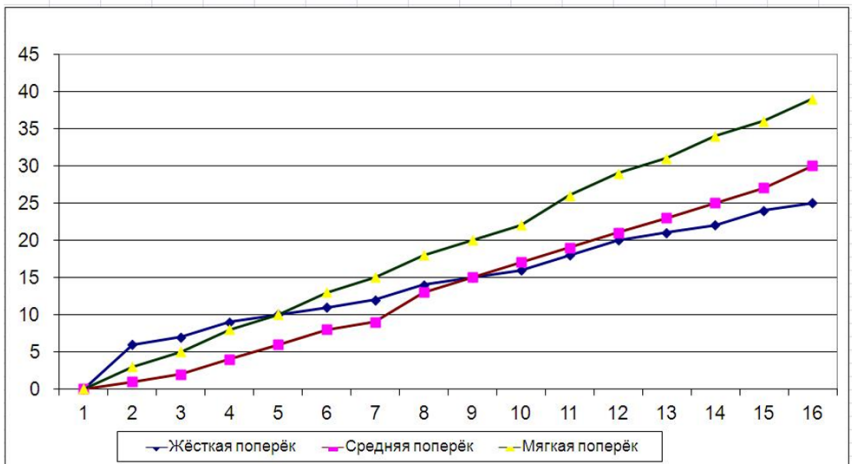


Рис. 5. Малая анизотропия, гибкость различается в 1.5 раза

После доказательства анизотропии гибкости и жёсткости ячеек Штейнера я сравнила в числах прогиб цепочек арматуры в двух направлениях: плашмя – большой прогиб, рёбрами вверх – малый прогиб. На рис.6 графики расположены парами. На каждом графике показаны свойства гибкости одной и той же цепочки арматуры в двух направлениях. Анизотропия гибкости очень большая, на первом графике гибкость различается в 12 раз. Первый график самый важный, потому что показывает, как надо располагать жёсткую цепочку, чтобы прогиб был самый маленький. Рёбрами вверх.

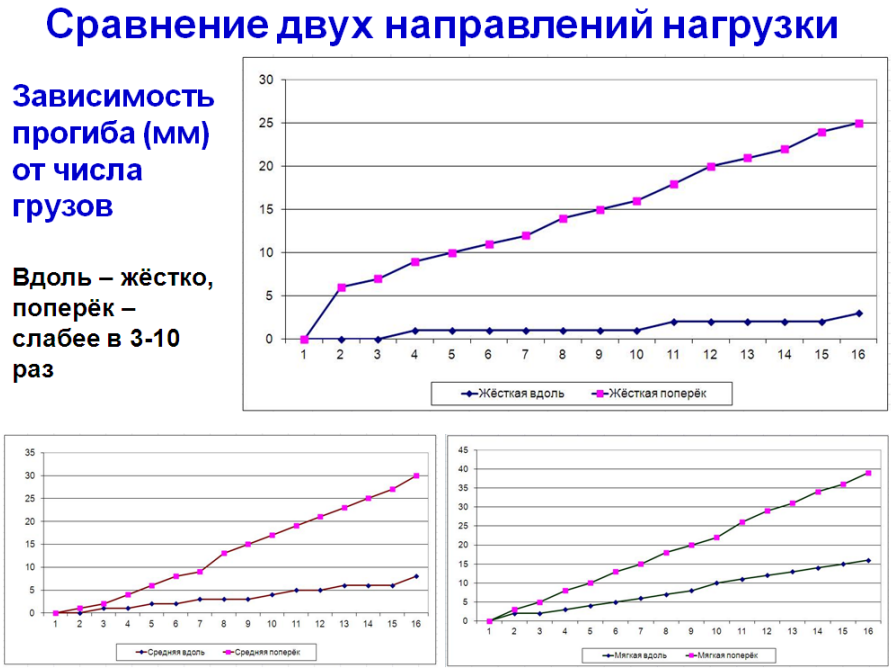


Рис. 6. Гибкость при повороте цепочек на 90 градусов

кой арматурной цепочки (перемычки поперёк) в самом жёстком направлении (рёбрами вверх). В первом столбике показано число гаек, от нуля до пятнадцати. Во втором столбике показан прогиб арматурной цепочки в мм. Это очень жёсткая цепочка и очень жёсткое направление, потому что прогиб был всего 3 мм от пятнадцати гаек. В третьем столбике показан груз в граммах, одна гайка – 4,54 г. В четвёртом столбике показан вес в ньютонах, 1 Н соответствует 102 г, поэтому числа из третьего столбика поделила на 102. В пятом столбике показан вес груза в мН, поэтому числа в четвёртом столбике умножила на 1000. В шестом столбике показана жёсткость, поделила силу на прогиб, Н/м, или, что то же самое, мН/мм. Нашла среднюю величину – всё сложила и поделила на число опытов. На 0 делить нельзя, поэтому первые три строчки пустые. Поделила 1 на жёсткость и получила гибкость в мм/мН, но потом маленькое число удобно умножить на 1000 и работать в мм/Н, потому что от 1 Н цепочка прогнётся в 1000 раз сильнее, чем от 1 мН.

Я провела шесть серий испытаний для трёх арматурных цепочек, для каждой цепочки в двух направлениях. В каждой серии испытаний было по 15 измерений, потому что больше гаек М8 подвешивать было нельзя, цепочки могли распаяться. Числовые данные я записала на классной доске, а потом перенесла на компьютер. Каждую серию измерений я обработала в программе Excel. На рис. 7 для примера показана только одна таблица из шести, в которой записаны прогибы самой жёст-

Программа Excel вычислила жёсткость и гибкость одной ячейки Штейнера в четырёх направлениях

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
19			1 вдоль	Жёсткая							
20											
21		0	0	0	0	0	*				
22		1	0	4,54	0,04451	44,5098	*				
23		2	0	9,08	0,08902	89,0196	*				
24		3	1	13,62	0,13353	133,529	133,529				
25		4	1	18,16	0,17804	178,039	178,039				
26		5	1	22,7	0,22255	222,549	222,549				
27		6	1	27,24	0,26706	267,059	267,059				
28		7	1	31,78	0,31157	311,569	311,569				
29		8	1	36,32	0,35608	356,078	356,078				
30		9	1	40,86	0,40059	400,588	400,588				
31		10	2	45,4	0,4451	445,098	222,549				
32		11	2	49,94	0,48961	489,608	244,804				
33		12	2	54,48	0,53412	534,118	267,059				
34		13	2	59,02	0,57863	578,627	289,314				
35		14	2	63,56	0,62314	623,137	311,569				
36		15	3	68,1	0,66765	667,647	222,549				
37							263,635	жёсткость, Н/м			
38							0,00379	гибкость, м/Н		0,00063	
39		число гае	щение в м	число гра	сила, Н	сила, мН	жёсткость, мН/мм=Н/м			Гибкость одной	
40					1Н=102г						

Пример расчёта гибкости ячейки Штейнера в одном направлении в программе Excel

Рис. 7. Пример компьютерной обработки результатов опыта

После компьютерных вычислений я нарисовала одну арматурную ячейку Штейнера и показала, как она изгибается в различных направлениях. Всего у ячейки Штейнера 4 гибкости, потому что её можно изгибать в четырёх направлениях. Два направления плашмя не очень важные, но могут понадобиться потом. Другие два направления рёбрами вверх очень важные, анизотропию гибкости и жёсткости можно применять сейчас на практике. Я уже изготовила несколько образцов новых композиционных с квадратными ячейками Штейнера. У новых материалов различная гибкость. Я смогла предсказать гибкость новых композиционных материалов. На рис.8 показана одна арматурная ячейка Штейнера и её гибкости в разных направлениях. На этом рисунке ячейка закрепляется жёстко на одной стороне квадрата, а сила прикладывается на другой стороне. В положении плашмя анизотропия гибкости слабая 7,8–9,7 мм/Н. Настолько мм прогнётся одна ячейка от силы 1 Н в положении плашмя. Гибкость различается меньше чем в 1,5 раза. Зато в положении рёбрами вверх анизотропия гибкости очень большая 0,6–4,0 мм/Н. В этом направлении гибкость различается в 7 раз.

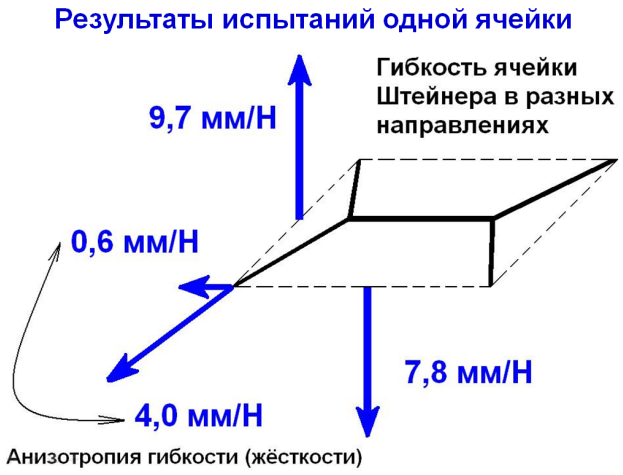


Рис. 8. Анизотропия гибкости квадратной ячейки Штейнера

У меня есть гибкости и жёсткости одной ячейки Штейнера. Теперь я могу создавать арматуру с заранее заданными свойствами. На рис.9 показаны три моих арматурных цепочки в положении рёбрами вверх, нагрузка прикладывалась параллельно рёбрам, как показано на рисунке. Эти цепочки уже были испытаны на прогиб подвешиванием грузов из гаек М8. В каждой цепочке 6 ячеек. В первой цепочке ячейки расположены перемычками вдоль линии цепочки. Прогиб всей цепочки я поделила на 6. То же самое сделала с цепочкой, в которой перемычки расположены поперёк. В третьей цепочке я теоретически вычислила прогиб по этим данным, а потом сравнила с опытными результатами. Ошибка около 30%. Школьная линейка имеет ошибку 4%. Ещё накапливались ошибки от других причин, поэтому результат хороший.

Точно так же я предсказала свойства арматурных цепочек в положении плашмя, показанные на рис.10. Ошибка не превзошла 40%.

Рис. 9. Арматура с заранее заданными свойствами

Рис. 10. Расположение арматуры плашмя

Рис. 11. Технология эпоксидного литья в парафиновую форму

Я практически применила полученные результаты для создания новых композиционных материалов, разработала технологию эпоксидного литься в парафиновую форму, показанную на рис. 11.

1. Расплавила парафиновые свечи в баночке с горячей водой.
2. Вылила расплавленный парафин в форму, коробочку или ящичек.
3. Подождала, пока парафин остынет и затвердеет.
4. Сверлом и отвёрткой проделала канавки в форме ячеек Штейнера.
5. Подготовила эпоксидную смолу с отвердителем в отношении 10:1.
6. Уложила в канавки капроновые нити, можно без них для примера.
7. Залила эпоксидную смолу с отвердителем в канавки.
8. Подождала сутки, пока эпоксидная смола застынет.
9. Опустила лоток с парафином и застывшей смолой в горячую воду.
10. Парафин расплавился, конструкция арматуры готова.

Эпоксидное литьё – это простая технология. Парафин плавила в баночке в горячей воде, выливала в лоточек и остужала. В парафине вырезала канавки в форме ячеек Штейнера, то есть самые лёгкие, положила в канавки капроновые нити и залила их эпоксидной смолой. На следующий день лоточки с парафином и застывшей смолой опустила в кипящую воду, парафин вытек, остался новый композиционный материал с предсказанными мною свойствами анизотропии жёсткости. Образцы моих новых материалов и парафиновая технология показаны на рис.12.

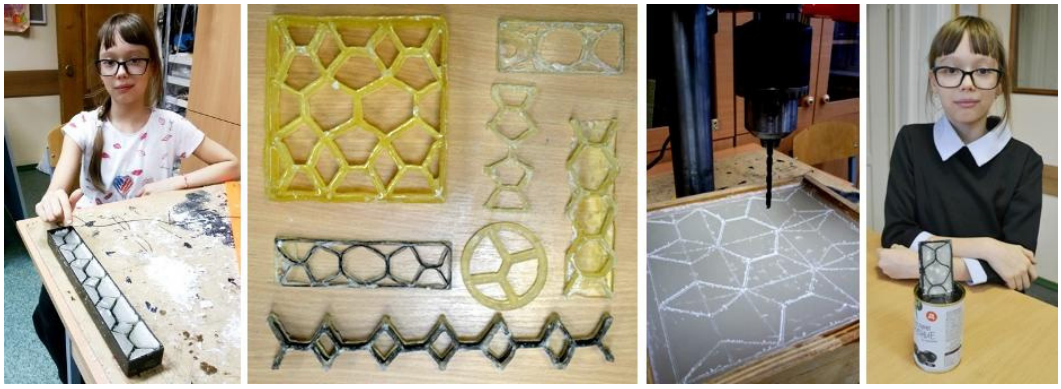


Рис. 12. Эпоксидное литьё в парафиновые формы

Особенно интересна круглая заготовка. Ею заинтересовалась большая фирма-покупатель новых видов металлопроката. Это четыре трубы в одной трубе. Получила предложение участвовать в Международной выставке металлопроката в ноябре 2019 года.

На рис. 13 показан образец эпоксидной арматуры композиционного материала с квадратными ячейками Штейнера. В нём есть ориентация ячеек перемычками вдоль и перемычками поперёк. Это демонстрационный образец. Внешняя квадратная рамка сделана для удобства, чтобы не поломать перемычки.

4. Самая большая гибкость 4 мм/Н одной ячейки Штейнера будет при горизонтальном расположении перемычки, а самая маленькая гибкость 0,6 мм/Н будет при вертикальном расположении перемычки. Гибкость ячейки Штейнера в двух направлениях различается почти в семь раз.

5. Анизотропию жёсткости ячейки Штейнера можно применить практически. Я доказала это изготовлением нескольких образцов не только арматуры, но и нового композиционного материала. Арматура – это капроновые ниточки, наполнитель – это эпоксидная смола.

Рис. 13. Опытный образец эпоксидной арматуры

Заключение

Выводы подтвердили гипотезу об анизотропии жёсткости и прочности ячейки Штейнера. Эта гипотеза видна сразу, потому что три спаянные мною конструкции по-разному изгибаются в разных направлениях.

1. У каждой квадратной ячейки Штейнера есть три главные гибкости, или наоборот, жёсткости. Но я работаю с гибкостью.

2. Если сила поперёк ячейки, то гибкость конструкции почти не зависит от способа соединения ячеек Штейнера и равна 8–9 мм/Н. То есть на столько мм прогибается одна ячейка от силы 1 Н.

3. Если сила вдоль ячейки, как показано на рисунке на фоне доски, то гибкость сильно зависит от способа соединения ячеек. Это означает, что гибкость одной ячейки различна в разных направлениях, то есть анизотропна.

6. Я предлагаю парафиновую технологию отливки нового композиционного материала из эпоксидной смолы.

Работа доложена в Казани, Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Жуковском, МАИ, МФТИ, НИЯУ МИФИ, МГСУ СПбПУ, К(П)ФУ, РКК, «Энергия». Есть публикации, медаль НИУ МГСУ и 3–е место в конкурсе и приз 10000 рублей от Совета молодых учёных и специалистов города Королёва Московской области, Лауреат конкурса им. В.И.Вернадского в апреле 2019 г. Планируется приглашение на Международную выставку МеталлЭкспо-2019 в ноябре 2019 г. Заявлена на «Сахаровские чтения 2019» в Санкт-Петербурге.

Список литературы

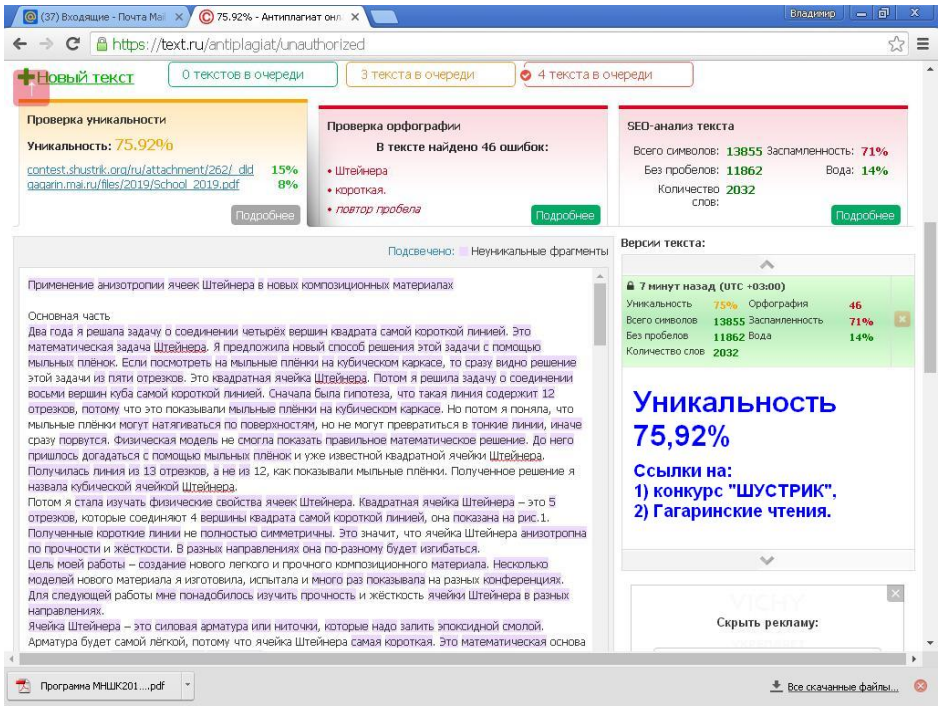
1. Драцкая А.И. Геометрические формы новых композиционных материалов на основе мыльных плёнок / V Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке V», февраль-май

2018 г. – М.: Российская Академия естествознания (РАЕ), 2018. – Электронный ресурс: http://files.school-science.ru/pdf/5/35386.pdf.

2. Драцкая А.И. Прямой метод решения задачи Штейнера о соединении восьми вершин куба самой короткой линией/ VI Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке VI», октябрь-декабрь 2018 г. – М.: Российская Академия естествознания (РАЕ), 2018. – Старт в науке. Научный журнал для школьников ISSN 2542–0186. – 2019. –№ 1 (часть 3) – С. 381–388. – Электронный ресурс: http://files.school-science.ru/pdf/6/5c08dce6bb499.pdf.

Приложение

Проверка текста на уникальность в системе «Антиплагиат» text.ru



Снижение уникальности зафиксировано из-за участия меня как автора в конкурсах «ШУСТРИК-2019» и «Гагаринские чтения 2019» в Московском авиационном институте (НИУ).