



## Конкурс для школьников «Гениальные мысли» Автореферат проекта призеров II степени

**Название работы – Изучение перспективы замены стальной арматуры базальтопластиковой посредством исследования физикохимических свойств композитной арматуры на нано уровне.**

**Авторы – Емельянов Илья Сергеевич, Медведев Вадим Дмитриевич, 10 класс, МБОУ "Лицей № 2" г. Чебоксары.**

**Руководитель – Лаврентьев Анатолий Генрихович, учитель физики, МБОУ "Лицей № 2" г. Чебоксары.**

### **Основная идея работы, цели, задачи**

*Цель:* Экспериментально исследовать возможность замены стальной арматуры базальтопластиковой.

*Задачи:*

- Изучить структуру и состав.
- Ознакомиться со способами производства.
- Изучить физические свойства композита.
- Рассчитать предельную прочность армированной на основе базальтопластика балки и провести эксперимент с пошаговой точечной нагрузкой.

### **Актуальность и новизна работы**

Результаты работы могут быть применены в сфере строительства, благодаря тому, что базальтопластик по гипотезе менее подвержен механическим воздействиям, более устойчив коррозии и воздействиям агрессивной внешней среды, а также имеет высокие диэлектрические показатели и прочность на растяжение, что является преимуществом на фоне стальной арматуры.

### **Основные результаты**

#### ***Знакомство с физическими свойствами базальтопластика***

Свойства базальтопластиков определяются как характеристиками применяемого волокна, так и свойствами связующего. Они являются высококачественными конструкционными материалами с высокими механическими свойствами, термо- и огнестойкостью и особенно хемостойкостью. Поскольку базальтовые волокна более стойки к действию влаги, чем стекловолокнистые материалы, и мало изменяют свои диэлектрические характеристики при увлажнении, они используются также как высокотемпературные конструкционные диэлектрики [1].

#### ***Способы получения базальтопластика***

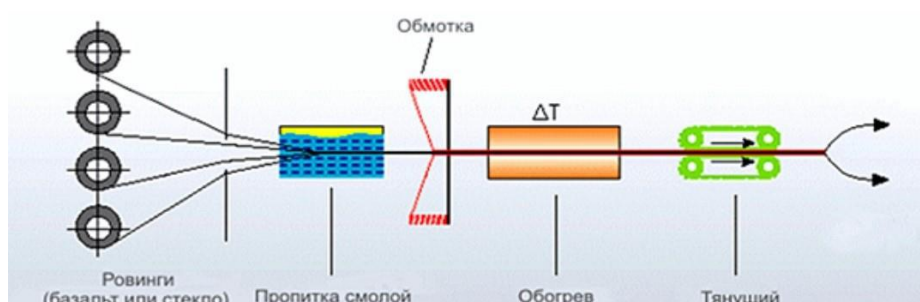
Как же получить такой композитный материал?

Базальт – является горной породой вулканического происхождения, которая обнаружена в горах – Карпатах и Гималаях. Сам материал производится следующим образом:

1. Подсушка волокна
2. Размотка волокна
3. Пропитка связующими компонентами
4. Полимеризация

В качестве наполнителей используются рубленые базальтовые волокна, нити, жгуты, ткани, нетканые материалы, в редких случаях - бумаги. В качестве связующих используются те же виды, что и в производстве стеклопластиков.

Технология переработки базальтопластиков и стеклопластиков в композиты и изделия также во многом похожа. Основной метод переработки - прессование под давлением до 30-50 МПа.



### **Производство базальтопластиковой арматуры [2]**

Для того, чтобы обзавестись информацией о производстве базальтопластиковой арматуры, мы сходили на экскурсию в компанию ООО «Гален».

Данный вид композитной арматуры, изготавливается из базальтовых волокон, которые пропитываются термореактивными или термопластичными связующими полимерами. Благодаря своему составу, прутья АБП обладают высокой стойкостью к агрессивным средам. Сегодня существует несколько методов изготовления прутьев из базальтопластика. От этого зависят свойства готовой продукции. Перечислим наиболее распространенные варианты:

**Pulltrusion** – волокна стержня пропитываются специальным полимером, после чего пропускаются через фильеры, диаметр которых постепенно уменьшается. Это дает возможность формировать и повышать прочность готового материала.

**Needletrusion** – волокнистые нити, связанные в один стержень, пропитываются полимерным связующим, пропускаются по отдельным каналам. А потом соединяются, подвергаясь натягиванию и скручиванию. Готовая арматура отличается высокой стоимостью, зато имеет прекрасные эксплуатационные характеристики.

Наименование дефекта	Норма ограничения
Сколы	Не допускаются
Расслаивание	Не допускаются
Раковины	Не допускаются
Задиры с порывом навивки	Не допускаются
Вмятины от механического воздействия с повреждением волокон	Не допускаются

*Требования к внешнему виду базальтопластиковой арматуры. [3]*

## **Исследование структуры**

Для исследования мы использовали базальтопластиковые стержни, длина которых изначально была 60 см. В зависимости от опыта мы отпиливали от них более мелкие части. По снимкам, сделанным камерой микроскопа, можно сделать вывод о том, что структура базальтопластика состоит из многочисленных маленьких волокон и защитного антикоррозийного покрытия. (Поверхность базальтопластиковой арматуры покрыта песочным напылением. Это сделано для лучшего сцепления прутьев со строительной основой. Песок дает возможность прочнее фиксировать арматуру, не позволяя ей «выскальзывать» из отверстий. Является наиболее распространенной. Основное достоинство - высокая коррозионная стойкость к агрессивным средам, в том числе к цементопесчаному раствору).

Для исследования структуры базальтопластика использовали сканирующий зондовый микроскоп «NanoEducator» в полуконтактном режиме. Структура состоит из плотных зерен средним размером 5 мкм, состоящих из более мелких компонентов.

## **Сравнение плотности двух материалов**

*Сталь: 7700-7900 кг/м<sup>3</sup>*

Чтобы найти плотность базальтопластика измеряю его массу и делю на объём. Масса равна 0.013 кг; объём  $4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>

*Базальтопластик: 3045 кг/м<sup>3</sup>*

Далее мы провели эксперимент, связанный с влагопроницаемостью. Чтобы узнать её у базальтопластика мы провели следующий опыт: поставили базальтопластиковый стержень в воду на 24 часа. Масса образца до опыта была  $m=8,2$  г; после  $m=8,52$ г. В процентном соотношении - это 3.9 %. Мы предполагаем, что большую часть из этого вобрало себя абразивное покрытие, а не сам базальтопластик.

Для базальтопластика ещё не выведены табличные данные. А именно, такие значения, как удельная теплоёмкость и коэффициент теплопроводности. Поэтому мы решили провести опыты, чтобы найти эти величины.

## **Удельная теплоёмкость**

Все мы знаем из курса физики 8го класса простое уравнение количества теплоты для твёрдого тела:

$Q=cm\Delta T$ , где

$c$  – удельная теплоёмкость

$m$  – масса тела

$\Delta T$  – разница температур между начальным и конечным положением

Из той же физики нам известно следующее выражение:

$Q=\eta Pt$ , где

$P$  – это мощность,

$t$  – это время

$\eta$  – Коэффициент полезного действия

$\eta Q(\text{плитки})=Q(\text{воды})+Q(\text{базальтопластика})$

При помощи незамысловатых математических преобразований получаем:

$$C(\text{базальтопластика}) = \eta P t - c(\text{воды}) m(\text{воды}) dT / m(\text{базальтопластика}) dT$$

Итак, сам опыт заключается в следующем:

- 1) Измеряем массу стержня.  $m(\text{базальтопластика}) = 0.013 \text{ кг}$ .
- 2) Вычисляем КПД. Смотрим, во сколько раз отличается количество теплоты, которое выделяет плитка (количество теплоты затратное), и сравниваем с тем, сколько идёт именно на нагрев воды (количество теплоты полезное); количество теплоты полезное делим на количество теплоты затраченное.  $\eta = Q(\text{воды}) / Q(\text{плитки}) = 0.4$
- 3) Наливаем в сосуд воду и опускаем в неё стержень.  $m(\text{воды}) = 0.13 \text{ кг}$  ( $c(\text{воды}) = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ). Включаем и максимально нагреваем плитку.  $P = 350 \text{ Вт}$
- 4) Ставим сосуд с водой и стержнем на плитку. Засекаем время.
- 5) Потом измеряем получившуюся разницу температур стержня (учитываю, что разница температур стержня равна разнице температур воды).
- 6) Подставляем все измеренные величины в формулу, и находим, чему равна удельная теплоёмкость базальтопластика.
- 7) Повторяем опыт снова, с другой температурой стержня (воды) и временем нагрева. Разница температур стержня (воды), K Время стержня в воде, c Значение удельной теплоёмкости, Дж/(кг•K).

Разница температур стержня (воды), K	Время стержня в воде, c	Значение удельной теплоёмкости, Дж/(кг•K)
41,4	296,3	1937,6
44,9	305,8	2007,5
41,8	284,2	1932,3
43,1	309	2017,5

Удельная теплоёмкость стали:  $460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

Средняя удельная теплоёмкость базальтопластика:  $1973,7 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

Это означает, что базальтопластик наиболее теплоустойчив.

### **Расчет коэффициента теплопроводности (X)**

Для определения этой константы мы обратилась в Чувашский Государственный Университет, который оказал нам любезность в предоставлении нужного оборудования.

Коэффициент теплопроводности можно найти по следующей формуле:

$$X = \eta I^2 R L / S dT, \text{ где}$$

N – Коэффициент полезного действия,

I – сила тока,

R – сопротивление резистора,

L – длина стержня,

S – площадь поперечного сечения,

dT – разница температур между конечным и начальным положением.

- 1) Измеряем длину и, при помощи штангенциркуля, площадь поперечного сечения стержня.
- 2) Помещаем стержень в пенопластовый термоизолятор (2) для предотвращения потери тепла с боковой поверхности.
- 3) Резистором, подключённым к автотрансформатору (3), нагреваем стержень с одного конца. Резистор изготовлен в виде спирали, охватывающий конец стержня, также

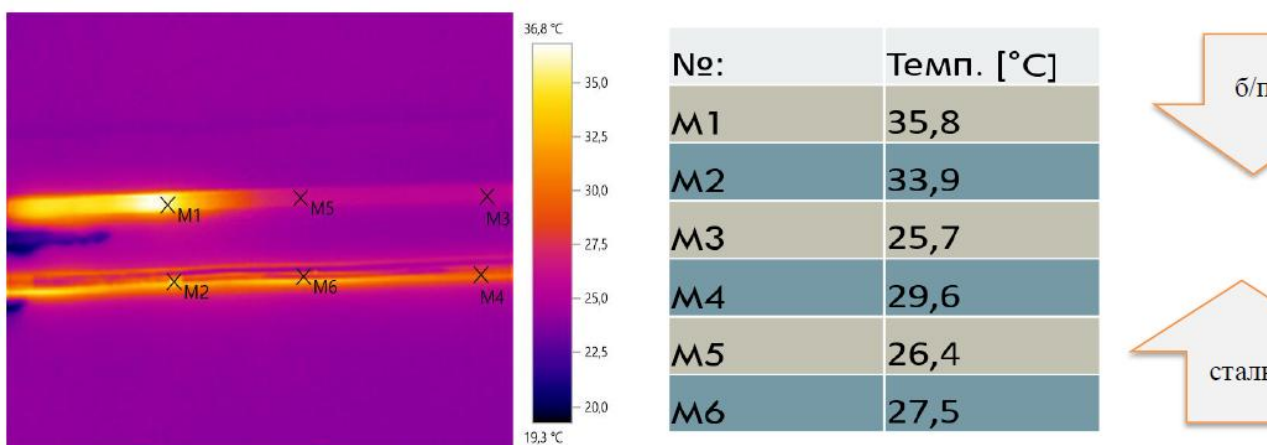
заключённый в пенопласт.

- 4) С другого конца стержень охлаждается радиатором (4) и установленным рядом вентилятором.
- 5) Находим КПД.
- 6) Измеряем термометром (6) температуру нагретого конца, которая при этом остаётся постоянной за счёт поддержания температуры холодного конца.
- 7) Подставляем все измеренные величины в формулу, и находим, чему равен коэффициент теплопроводности базальтопластика.

Коэффициент теплопроводности базальтопластика 0,46 Вт/м\*К. У стали 45,4 Вт/м\*К.

### Опыт с тепловизором

С помощью термографии, можно увидеть, как температура распределяется по базальтопластиковому стержню и по стальному. Это наглядно показывает их разницу в теплопроводности.



### Испытание на изгиб. Модуль Юнга

Испытание на изгиб хрупких материалов проводят с целью определения склонности материалов к хрупкому разрушению. Образцы испытывают на гидравлической машине. Образцы устанавливаются на две опоры и подвергаются действию медленно возрастающей нагрузки. Определяют наибольшую нагрузку в момент разрушения образца (P) и подсчитывают сопротивление изгибу по следующей формуле (для дисковых образцов):

$$E = \frac{4L^3P}{3\pi D^4 \lambda}$$

где L – расстояние между опорами;

D – диаметр образца;

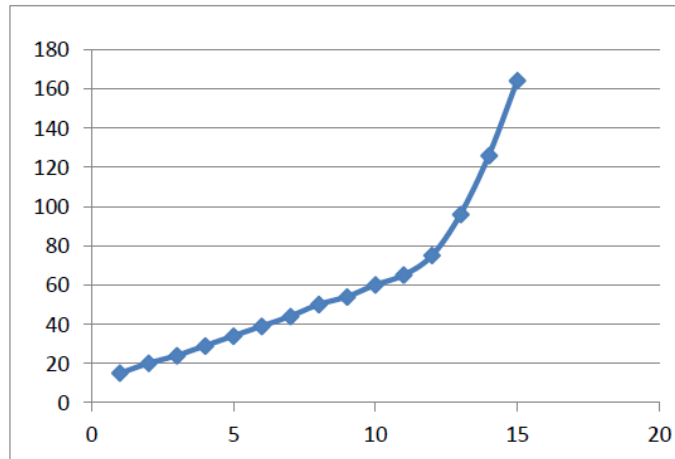
$\lambda$  – стрела прогиба;

E – модуль Юнга.

- 1) На штативы кладем стержень из исследуемого материала так, чтобы середина его совпадала с серединой расстояния между штативами.
- 2) Помещаем в середине стержня стремя с подставкой для грузов.
- 3) Добавляем на подставку последовательно один, два, три и так далее грузы с известным весом, начиная с большего, каждый раз при этом определяя стрелу прогиба.
- 4) Результаты измерений записали в таблицу.

<b>F, Н</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>λ, мм</b>	15	20	24	29	34	39	44	50	54	60	65	75	96	126	164

5) Мы построили график зависимости стрелы прогиба от величины нагрузки и убедились, что имеет место линейная зависимость между ними, то есть деформация остаётся упругой и не переходит в пластическую.



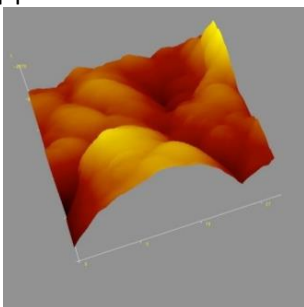
### Коррозия



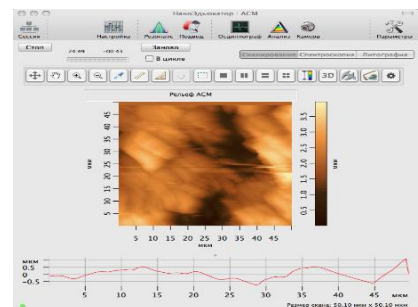
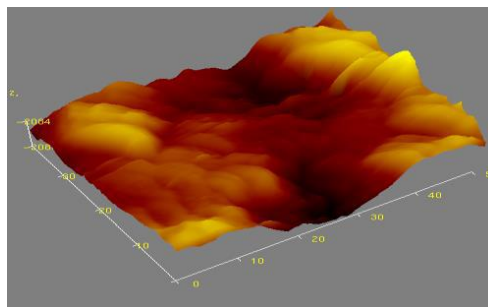
Для исследования коррозионной стойкости мы поместили образец в растворы гидроксида калия (KOH), а также медного купороса ( $\text{CuSO}_4$ ) на 48 часов и рассмотрели его структуру, непосредственно после пребывания образца в растворах.

Структура после 48 часов в растворе  $\text{CuSO}_4$ :

До



После





## **Горение [6]**

Мы провели эксперимент, связанный с горением композита. Нам было очень интересно узнать, что будет происходить с арматурой при воздействии высокой температуры в железобетонной конструкции. После нагревания начали плавиться эпоксидные смолы на той части стержня, которая не находилась в бетоне. После доведения до 105 градусов, горение прекратилось. Разрушив макет железобетонной конструкции, мы убедились, что в самом бетоне эпоксидные смолы не плавятся.



## **Исследование механических характеристик на растяжение**

Замер проводился 4 раза, устройство давало результат в «кгс», позже эти значения были переведены в «Н», затем на основе данных нам значений был высчитан предел прочности по формуле:

$$\sigma = P / F_0 \text{ Па}$$

	d, мм	F <sub>0</sub> , м <sup>2</sup>	P, Н	σ, МПа
1	6	0,00002817	40207,3	1430
2	6	0,00002817	35303,9	1250
3	6	0,00002817	37853,7	1350
4	12	0,0001131	70215,6	620

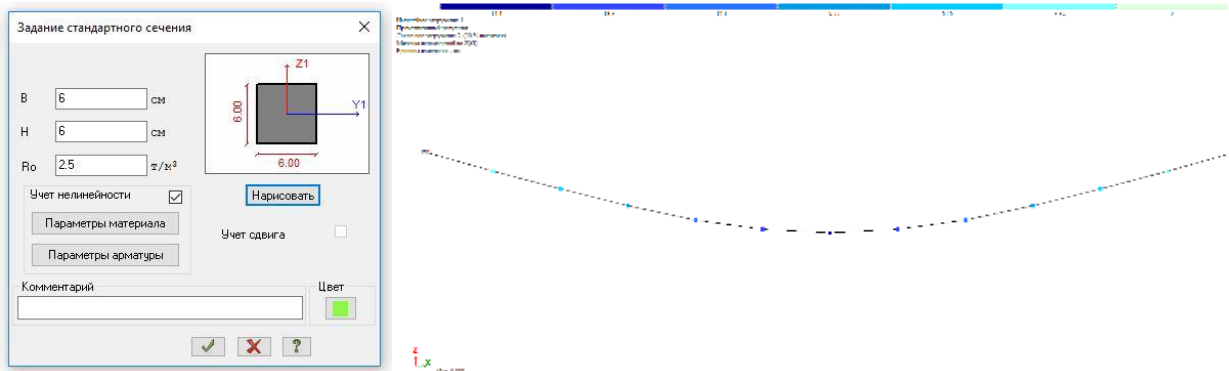
## **Расчет предельной прочности балки**

Суть данного эксперимента заключается в том, чтобы проверить, какую максимальную нагрузку (в кг) может выдержать балка, состоящая из базальтопластикового стержня и бетона. Чтобы провести этот эксперимент, мы воспользовались помощью главного инженера компании «Гален». Расчеты производились в программе «Лира-Сапр».



Использовались следующие характеристики:

Арматура – базальтопластиковая диаметром 10 мм и длиной 1200 мм. По данному скриншоту видно, что размеры самого бруска это 60 на 60 мм, а расположение стержня в бетоне – центральное. Так было сделано с целью провести эксперимент, однако в реальности арматура должна находиться намного ниже, чтобы конструкция была прочнее.



Чтобы проверить достоверность компьютерных расчетов, мы залили балку тех же размеров. Так же расположили арматуру в центре будущей железобетонной балки. Мы использовали бетон прочности М400. После того, как мы залили балку, она застывала на протяжении около 300 часов. Для того, чтобы оказывать точечную нагрузку и пошагово нагружать балку, мы использовали штангу.

Тип армирования	Площадь поперечного сечения стержня, мм <sup>2</sup>	Полезная нагрузка, кг	Напряжение в сжатой зоне балки, σ, МПа	Изгибающий момент М кг*м	Прогиб, мм	Глубина трещины, мм	Ширина трещины, мм	Шаг трещин, мм
Базальтопластик ø10мм	78.5	10	4,3	4,6	0,73	47,8	0,018	23,1
		20	6,1	7,6	3,95	42,9	0.014	23,1
		30	7,4	10,6	7,25	43,5	0.020	23,1
		40	8,2	13,6	10,8	43,5	0.027	23,1
		50	8,5	16,6	14,4	43,5	0.029	23,1
		60	Разрушение	19,6	18,0			

Итак, а теперь перейдем к самому эксперименту. На середину балки действовала точечная нагрузка. Мы пошагово ее увеличивали на 10%. Как можно было заметить, предел прочности бетона примерно 8,5 Мпа, то есть при нагрузке в 60 кг балка должна разрушиться. По факту же, проведя эксперимент, мы выяснили, что предельная масса, которую может выдержать балка, отличается от расчетной. Она составляет 70 кг, а не 50. В этой таблице приведены фактические величины.

Фактически результаты превзошли все ожидания. Балка разрушилась при точечной нагрузке 80 кг. Напомню, что расчетная прочность составляла 60 кг.

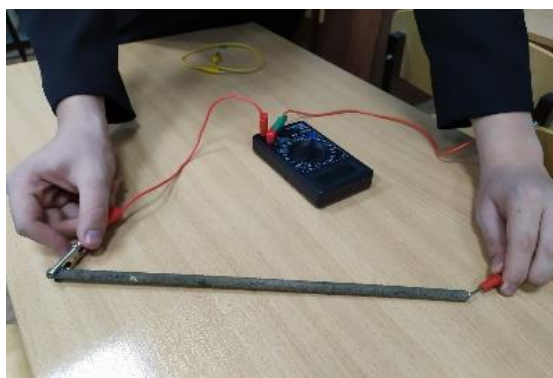


Тип армирования	Площадь поперечного сечения стержня, мм <sup>2</sup>	Полезная нагрузка, кг	Прогиб, мм	Шаг трещин, мм
Базальтопластик Ø10мм	78,5	10	0,6	23,1
	20	3,5	23,1	20
	30	6,3	23,1	30
	40	8,9	23,1	40
	50	10,0	23,1	50
	60	12,0	23,1	60
	70	14,0	23,1	70
	<b>80</b>	<b>РАЗРУШЕНИЕ</b>		



### **Электропроводность**

Эксперименты показали, что базальтопластик является диэлектриком, в следствие того, что его электропроводность равна 0.



## Выводы, заключение, перспективы

Исследуя базальтопластик, его структуру, состав, физические свойства и сравнивая его со сталью, мы сделали следующие выводы:

1. Мы обнаружили, что плотность базальтопластика в 2 раза меньше, чем плотность стали, т.е. он намного легче металлической арматуры.
2. У базальтопластика низкая влагопроницаемость. Это даёт материалу массу плюсов. Долговечность, дополнительная коррозионная, щелче- и кислотостойкость, которая достигается за счет абразивного покрытия - вот следующие чрезвычайно важные свойства базальтопластика.
3. Для базальтопластика мы вывели такие константы, как:  
 Удельная теплоёмкость: 1973,7Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности - 0,46 Вт/м·К, предел прочности на растяжение – 1200МПа.
4. Было установлено, что базальтопластик является диэлектриком.
5. Мы произвели компьютерный расчет предельной прочности железобетонной балки на основе базальтопластика. Затем мы экспериментально вычислили предельную прочность балки. Она составила 70 кг.
6. Было выяснено, что базальтопластик устойчив к тепловым нагрузкам непосредственно в бетоне, а также имеет низкий «мостик холода».
7. Таблица, показывающая разницу технических характеристик металлической и базальтопластиковой арматуры:

Параметр сравнения	БПА	Сталь
Плотность	3045 кг/м <sup>3</sup>	7700-7900 кг/м <sup>3</sup>
Коррозионная стойкость	Устойчива к щелочным и кислым средам	Менее устойчива
Удельная теплоемкость	1973,7Дж/(кг·К)	462 Дж/(кг·К)
Коэффициент теплопроводности	0,46 Вт/м·К	≈ 56 Вт/м·К
Электропроводность	Диэлектрик	Проводник

В перспективе залить железобетонную балку, в основе которой будет лежать стальная арматура того же самого диаметра, что и базальтопластиковая. Таким образом мы сможем наглядно убедиться в превосходстве стальной арматуры или же базальтопластиковой.

## Список цитированных источников

1. <https://helpiks.org/8-90850.html> [1]
2. <https://vseoarmature.ru/vidy/bazaltplastikovaya-armatura#i> [2, 3, 4, 5]
3. <https://galencomposite.ru/> [6]