

## Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона

*Н.Е. Сиков, А.И. Серёгин, Ю.В. Юркин*

*Вятский государственный университет, Киров*

**Аннотация:** Одним из крупных недостатков отечественной промышленности является ее высокая ресурсоемкость, обусловленная, в том числе, низким уровнем использования вторичного сырья. Проблем, связанных с утилизацией полимерных отходов, достаточно много. Они имеют свою специфику, но их нельзя считать неразрешимыми. Одним из методов переработки является использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона. В статье собраны и проанализированы методики, физические свойства бетона, с пластмассовым заполнителем и физические свойства, связанные с эксплуатацией, долговечностью бетона, содержащего пластмассовые заполнители. По результатам обзора был сделан вывод, что методика использования пластмасс в цементном растворе и приготовлении бетона является эффективной и экономически выгодной. Результаты показывают, что использование переработанных пластиковых волокон и гранул в бетоне может привести к улучшению свойств бетона.

**Ключевые слова:** бетон, заполнитель, пластиковый, прочность, волокна, свойства, отходы, сжатие, смесь, материал, качество.

### Введение

Большинство видов пластмасс не поддаются биологическому разложению и химически неактивны в окружающей среде; следовательно, такие полимерные продукты сохраняются десятилетиями, даже столетиями. Некоторые распространенные типы пластиков, такие, как поливинилхлорид (далее ПВХ) и поликарбонат (далее ПК), при определенных обстоятельствах могут медленно выделять токсичные соединения в воздух, воду и почву. Следовательно, пластиковые отходы во всем мире считаются серьезной экологической проблемой. На данный момент в многих странах рассматривается переработка полимерных отходов, следовательно, одной из приоритетных задач являются анализ и структурирование свойств пластмасс в бетоне, с дальнейшей реализацией переработанных полимеров (в качестве мелких и крупных заполнителей), рационально подобранных уплотненных

смесей, состоящих из вяжущего вещества (например, цемент) и воды, для изготовления искусственного каменного строительного материала – бетон.

В исследовании выполнен анализ, разбор видов рециклинга полимерных отходов. В ходе изучения темы было выявлено, что в России накоплен небольшой опыт применения отходов ПВХ в качестве заполнителя бетонных смесей. В отрасли строительства эта методика не развита. В то же время множество институтов и исследователей описывают возможные перспективы применения ПВХ, при изготовлении бетона, рецептуры и технологии приготовления. Данный анализ в основном исследует влияние включения отходов полиэтилентерефталата (далее ПЭТ) и ПВХ на свойства бетона и цементного раствора [1,2].

Основная цель статьи – показать результаты анализа теоретического и практического использования отходов полимеров, для повторного использования в качестве частичной замены минерального заполнителя для производства облегченных строительных смесей. Использование может внести значительный вклад в создание более экологичной строительной отрасли. Как правило, результаты показали, что гранулы или хлопья измельченных бутылок из бывшего в употреблении ПЭТ и пластмассовых упаковок ПВХ могут использоваться вместо песка для производства бетонных изделий хорошего качества. Было установлено, что плотность и прочность на сжатие бетона находились в пределах  $1000 - 2000 \text{ кг/м}^3$ . 3 и 5 – 60 МПа соответственно в зависимости от процентной доли замены. Однако также сообщалось, что прочность бетона на сжатие снижалась с увеличением количества пластика в бетоне, особенно когда содержание пластичности превышало 0,5% от общего веса бетонной смеси. Введение хлопьев вторичного ПЭТ и ПВХ в бетон может уменьшить усадочные трещины при высыхании в цементном материале, несмотря на то, что некоторые корпорации, применяющие эту методику, также высказались за то, что

---

отходы ПВХ можно обрабатывать для образования вторичных продуктов, используемых в бетоне, а пластиковые отходы могут снизить вес обычного бетона на 2 – 6% [3].

Развивающееся современное строительство, в том числе и индивидуальное, нуждается в таких строительных материалах, использование которых позволит в кратчайшие сроки возводить экономичные, теплые и экологически чистые здания. Ввиду постоянного роста цен на энергоносители особое значение при производстве материалов уделяется вопросам теплоэнергоресурсосбережения. Использование при возведении ограждающих конструкций безобжиговых материалов, изготовленных из местного сырья и отходов полимеров – один из перспективных и экономически выгодных способов решения данной задачи [4-6].

### **Виды пластмасс и цемента**

Композиционный материал, композит – искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с чёткой границей раздела между ними. В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу или связующее, и включённые в неё армирующие элементы или наполнители [1].

Обычно в бетоне используются две формы пластмасс, а именно пластмассовые заполнители (далее ПЗ) и пластмассовые волокна (далее ПВ). Переработанные ПЗ извлекаются из различных видов пластиковых отходов. Методы рециркуляции ПЗ и ПВ в эти методы обычно включают прямую механическую переработку или плавление. Первый — это эффективный и экономичный способ получения, переработанного ПЗ и ПВ, в то время как второй дает материалы с более однородными размерами и свойствами. Технологичность - ключевой параметр бетонной смеси в свежем состоянии.

---

Он определяет легкость и однородность бетона, а также влияет на то, как бетон можно смешивать, укладывать, уплотнять и т. д. Основные материалы, использованные в настоящем исследовании: цемент, мелкий заполнитель, крупный заполнитель, вода и заполнитель ПВХ, ПЭТ и т.д. Для всех смесей в большинстве исследований использовался обычный портландцемент (Тип I), его и рассматривает данная статья. Аналитическое исследование показывает химический состав и физические свойства цемента [7].

Таблица №1

Химический состав цемента, использованного в исследовании [6]

Окись	Сокращенное название	Масса (%)	Предел I.Q.S
Известь	CaO	62,62	-
Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	21,07	-
Глинозем	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,42	-
Оксид железа	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,27	-
Сульфит	SO <sub>3</sub>	2,29	2,85%
Магnezия	MgO	2,75	5%
Потеря зажигания	L.O.I	1,44	4%
Коэффициент насыщения известью	L.S.F	0,91	0,66-1,02
Нерастворимый остаток	I.R	0,77	1,5
Основные соединения (% по весу)			
Силикат трикальция	C <sub>3</sub> S	47,11	-
Силикат дикальция	C <sub>2</sub> S	25,14	-
Трикальций алюминат	C <sub>3</sub> A	8,84	-
Тетра-алюмоферрит кальция	C <sub>4</sub> AF	9,94	-

Таблица № 2

Физические свойства используемого цемента [6]

Физические свойства	Результат	Предел I.Q.S
Утонченность (м <sup>2</sup> /кг)	357	230
Время начального схватывания	165 мин.	45 мин.
Время окончания схватывания	4 ч. 16 мин.	10 ч.
Плотность (%)	0,35	0,8%
Прочность на сжатие (3 дня) –МПА	20,28	15
Прочность на сжатие (7 дня) – МПА	27,45	23

## Физические свойства и свойства, связанные с эксплуатацией и долговечностью бетона, содержащего пластмассовые заполнители и волокна

Поведение обычного бетона и других отходов, содержащих различные отходы, например, труб из ПЭТ и металлолома из ПВХ, может отличаться от поведения бетона с заполнителем из ПВХ. Кроме того, заполнитель ПВХ, полученный в результате измельчения листов ПВХ, по существу, состоит из частиц разного размера, в том числе, очень мелких частиц в форме порошка, в отличие от заполнителя из пластика, используемого другими исследователями. С этой целью здесь был составлен нижеследующий анализ по физическим свойствам и эксплуатации данного материала, а также представлены исследования для изучения фундаментальных свойств заполнителя, частично замененного пластиковым заполнителем, полученным из листов ПВХ, труб и других материалов из ПЭТ и прочих пластиковых отходов[4]. Применяемые порошковые наполнители могут оказывать различное влияние на структуру и свойства получаемого цементного камня в зависимости от их химической активности, энергетического потенциала, дисперсности, форме частиц и других размеров [2].



Рис. 1. – а.) ПВХ, полученный при первичном дроблении. б.) Заполнитель ПВХ, полученный путем вторичного дробления [6]

### Усадка

Бетон, содержащий ПЗ и ПВ, демонстрирует меньшую осадку, чем обычный бетон. При использовании высоких ПЗ, в результате бетон

становится жестким и трудным в обращении. ПЗ с гладкой поверхностью и сферической формой оказывает меньшее отрицательное влияние на удобоукладываемость бетона, чем ПЗ с неоднородной формой. Усадка бетона, содержащего ПЗ, увеличивается с увеличением ПЗ, так как низкая жесткость ПЗ обеспечивает очень низкое сопротивление усадке цементной смеси. С другой стороны, усадка бетона, содержащего ПЗ, уменьшается с увеличением содержания ПВ, примере ПЭТ отходов. Поскольку волокна сдерживают усадку из-за сдвига вдоль границы раздела волокон с матрицей, когда матрица подвергается растягивающим напряжениям, вызванным усадкой [3,8].

### **Прочность на сжатие**

Прочность на сжатие, модуль упругости, прочность на растяжение при раскалывании и прочность на изгиб бетона, содержащего ПЗ, уменьшаются с увеличением ПЗ. Кроме того, эти свойства бетона, содержащего ПЗ неоднородной формы, ухудшаются более значительно, чем свойства бетона, содержащего ПЗ однородной формы. Бетон, содержащий ПВ, имеет более высокую прочность на сжатие, растяжение при расщеплении и изгиб, чем у обычного бетона, когда бетон имеет относительно низкое содержание волокон (т.е. менее 1%); увеличение содержания фибры (переработанных пластиковых волокон) сверх этого уровня приводит к ухудшению механических свойств бетона. Использование переработанных пластиковых волокон с высоким пределом прочности на разрыв (например, полипропиленовых волокон) приводит к более значительному повышению прочности бетона на сжатие, чем при использовании волокон с низким пределом прочности на разрыв (т.е. волокна из ПЭТ) [7,9].

## **Прочность на изгиб**

Включение пластичных заполнителей в бетонные смеси приводит к снижению прочности на сжатие, изгиб и расщепление на разрыв, в частности, к значительному снижению прочности на сжатие раствора бетона. Это можно объяснить плохой адгезией между пластиковыми заполнителями и вяжущими материалами, более низкой прочностью, модулем упругости и жесткости пластичного заполнителя по сравнению с естественным, повышенным содержанием воздуха в смесях и сдержанной реакцией гидратации цемента у поверхности пластичного заполнителя. Тем не менее, несколько исследователей сообщили об улучшении, связанном с гибкими пластиковыми фрагментами. Это улучшение было более заметным для низкого содержания волокна, в то время как более высокое процентное содержание пластиковых волокон приводило к ухудшению механических свойств. Улучшение связано с совокупной прочностью, прочностью цементного теста и адгезионными свойствами между ингредиентами бетона. Прочность на изгиб, ударная вязкость, поглощение энергии и прогиб значительно улучшились с увеличением содержания пластикового волокна. Было обнаружено, что бетон с пластиковыми отходами имеет более пластичное поведение, чем бетонные смеси без пластиковых отходов, что может иметь значительное преимущество в уменьшении образования и распространения трещин [7,10].

## **Модуль упругости**

Модуль упругости бетона, содержащего пластичные заполнители, снижается по мере увеличения содержания пластичности. Это связано с пористой природой бетона, который содержит пластмассовые отходы, чем обычный бетон, более низким модулем упругости пластиковых заполнителей и более высоким соотношением воды к бетону и пластиковым отходам.

---

Бетон, содержащий ПЗ, демонстрирует более высокую пластичность, но меньшее пиковое напряжение по сравнению с обычным бетоном [9,10].

### **Водопоглощение и пористость**

Водопоглощение и пористость бетона, содержащего ПЗ, увеличиваются с увеличением пластичных агрегатов, поскольку пластмасса и природные заполнители недостаточно смешиваются в бетонной матрице, что приводит к пористой матрице. Проникновение хлорид-ионов и глубина карбонизации также увеличиваются с увеличением пластичных агрегатов поскольку более открытая структура приводит к более низкому сопротивлению миграции хлорид-ионов и проникновению диоксида углерода [4].

### **Теплопроводность**

Поскольку теплопроводность связана с количеством пор, а также с плотностью бетона, на теплопроводность бетона в значительной степени влияет замена природных заполнителей пластиковым заполнителем или пластиковыми волокнами. Средние причины этого: отходы пластика имеют примерно в 5 раз более низкую теплопроводность, чем природные заполнители, и включение пластиковых отходов приводит к увеличению воздушных пустот, что снижает теплопроводность [10].

### **Огнестойкость**

Бетон с ПВХ и ПЭТ-заполнителями, после нагрева в печи до  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 40 мин дают результаты, показывающие, что обычный бетон подвергся серьезному растрескиванию и, таким образом, не имел остаточной прочности на сжатие после испытания на огнестойкость. С другой стороны, в образцах бетона, содержащих 0,05–0,1% полипропиленовых волокон, не наблюдалось отслаивания, и бетон сохранял 70% своей остаточной прочности на сжатие после испытания на огнестойкость. Кроме того, по мере увеличения содержания полипропиленовых волокон, остаточная прочность

---

на сжатие также немного увеличилась. Снижение веса образцов бетона после процесса нагрева было менее 10%, в то время как у обычного бетона было до 60% из-за разрушения и скола. Таким образом, волокнистые перемычки могут поддерживать бетонную матрицу и предотвращать растрескивание бетона, вызванное высоким давлением пара, возникающим при высоких температурах [3,7].

### **Вывод**

Большое количество публикаций по теме исследования показывает, что использование переработанных пластиковых заполнителей и волокон в качестве строительного материала привлекает все большее внимание. Результаты станут частью полезной информации по переработке лома пластиковых труб из ПВХ и других пластиковых отходов в легкие бетонные смеси. Гранулы ПВХ и волокна ПЭТ могут быть использованы в качестве заполнителей для замены песка с целью изготовления неструктурного легкого заполнителя бетона. Оптимальный процент замены, указанный в анализируемых публикациях, в среднем должен быть в пределах 15% по объему. Несмотря на то, что было проведено большое количество исследований по включению пластиковых отходов в качестве заполнителей и волокон для изучения определенных свойств бетонных смесей, по-прежнему остается неизвестным много информации, которая требует изучения и открывает окно для будущих исследований.

### **Литература**

1. Кудрявцев П. Г., Фиговский О. Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы. // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: [vdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://vdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).
2. Курочка П. Н., Гаврилов А. В. Соотношение размера частиц в полидисперсных структурах как первый шаг к оптимизации составов

КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ. // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596.

3. Сагдеева Г. С., Патракова Г. Р. Переработка отходов производства и потребления с использованием их ресурсного потенциала // Вестник Казанского технологического университета, 2014, № 6. С. 194-198.

4. Kou S. C., Poon C. S., Lai W. L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. // International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2008. URL: [elsevier.com/locate/wasman](http://elsevier.com/locate/wasman).

5. Martinho G., Pires A., Saraiva L., Ribeiro R. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. // International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2012. URL: [elsevier.com/locate/wasman](http://elsevier.com/locate/wasman).

6. Azad A. M., Ilham I. M., Shuaaib A. M. Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. // An international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and repair, 2019. URL: [elsevier.com/locate/conbuildmat](http://elsevier.com/locate/conbuildmat).

7. Gu L., Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. // International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2016. URL: [elsevier.com/locate/wasman](http://elsevier.com/locate/wasman).

8. Li X, Ling T. C., Mo K. H. Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. // An international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and repair, 2019. URL: [elsevier.com/locate/conbuildmat](http://elsevier.com/locate/conbuildmat).

9. Bui N. K., Satomi T., Takahashi H. Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. // International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2018. URL: [elsevier.com/locate/wasman](http://elsevier.com/locate/wasman).

---

10. Badache A., Benosman A. S., Senhadji Y., Mouli M. Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). // An international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and repair, 2017. URL: [elsevier.com/locate/conbuildmat](http://elsevier.com/locate/conbuildmat).

### References

1. Kudryavcev P. G., Figovskij O. L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: [vdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://vdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).
2. Kurochka P. N., Gavrilov A. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596).
3. Sagdeeva G. S., Patrakova G. R. Vestnik Kazanskogo texnologicheskogo universiteta, 2014, № 6. pp. 194-198.
4. Kou S. C., Poon C. S., Lai W. L. International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2008. URL: [elsevier.com/locate/wasman](http://elsevier.com/locate/wasman).
5. Martinho G., Pires A., Saraiva L., Ribeiro R. International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2012. URL: [elsevier.com/locate/wasman](http://elsevier.com/locate/wasman).
6. Azad A. M., Ilham I. M., Shuaaib A. M. An international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and repair, 2019. URL: [elsevier.com/locate/conbuildmat](http://elsevier.com/locate/conbuildmat).
7. Gu L., Ozbakkaloglu T. International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2016. URL: [elsevier.com/locate/wasman](http://elsevier.com/locate/wasman).
8. Li X, Ling T. C., Mo K. H. An international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and repair, 2019. URL: [elsevier.com/locate/conbuildmat](http://elsevier.com/locate/conbuildmat).



9. Bui N. K., Satomi T., Takahashi H. International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2018. URL: [elsevier.com/locate/wasman](https://elsevier.com/locate/wasman).

10. Badache A., Benosman A. S., Senhadji Y., Mouli M. An international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and repair, 2017. URL: [elsevier.com/locate/conbuildmat](https://elsevier.com/locate/conbuildmat).