

Никичанов В. В.,*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(ул. Сумская. 40, Харьков, 61002; orcid.org/0000-0002-5913-1043)***Чаплянко С. В.***Государственное предприятие «Государственный институт по проектированию предприятий коксохимической промышленности»**(ул. Сумская 60, Харьков, 61002; e-mail: giprokoks@ic.kharkov.ua; orcid.org/0000-0002-0494-141x)*

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНА

Выполнен обзор и анализ зарубежных исследований, направленных на изучение вопроса применения пластиковых отходов в технологии изготовления бетонов различного назначения. Оценка эффективности применения пластиковых отходов в бетоне в части его эксплуатационных характеристик показала следующее: частичная замена цемента облученным пластиком в цементных образцах показала его преимущество, в сравнении с необлученным пластиком; частичная замена тонких фракций пластиком в бетоне марки М25 вызвала увеличение предела прочности при сжатии и при разрыве; полная замена крупного заполнителя пластиком в легковесном бетоне вызвала, с одной стороны – ухудшение предела прочности при сжатии, с другой – меньшую чувствительность к ионам хлорида; частичная замена песка низкоплотным полипропиленом в бетоне марки М25 вызвала увеличение предела прочности при сжатии, при изгибе и при разрыве; частичная замена песка полипропиленом в легковесном бетоне вызвала, с одной стороны – уменьшение предела прочности при сжатии и при изгибе, модуля Юнга, коэффициента сопротивления диффузии пара, с другой – уменьшение кажущейся плотности и значительное уменьшение теплопроводности; частичная замена цемента высокоплотным полиэтиленом в бетоне марки М20 вызвала, с одной стороны – уменьшение предела прочности при сжатии, с другой – улучшение консистенции бетона и увеличение предела прочности при изгибе; введение полиэтилена с ультравысокой молекулярной массой в высокоэффективный конструкционный цементный композит позволило получить композит, обладающий высокой прочностью и эластичностью; частичная замена поливинилового спирта первичным и обработанным рециркулированным полиэтилентерефталатом в высоко-упругом цементном композите вызвала, с одной стороны – уменьшение предела прочности при растяжении, с другой – увеличение предела прочности при сжатии. Установлена экологическая и экономическая целесообразность, технологическая эффективность и перспективность введения пластика в бетон, т.к. даже в случае ухудшения свойств данные бетоны могут найти широкое применение.

Ключевые слова: бетон, вяжущее, заполнитель, пластик, полипропилен, полиэтилен, полиэтилентерефталат, показатели свойств.

Введение. Решение вопроса применения пластиковых отходов в промышленности, особенно тех, которые не подлежат переработке, является актуальным. Применение пластика в технологии изготовления бетонов позволит не только снизить негативное воздействие отходов на окружающую среду, но и разработать бетон более высокого качества меньшей себестоимости.

Целью настоящей работы является обзор зарубежной литературы и анализ некоторых отдельных результатов исследований, направленных на разработку технологии изготовления бетонов различного назначения с применением пластиковых отходов (в том числе полипропиленовых, полиэтиленовых, полиэтилентерефталатных) для выявления влияния добавки на по-

казатели свойств бетона, определения эффективности ее применения и выбора направления дальнейших исследований.

Материалы и методы исследований. Аналитическая обработка научных исследований по данной тематике.

Результаты исследований и их обсуждение. Учитывая особую важность проблемы загрязнения окружающей среды пластиковыми отходами и жесткую необходимость поиска путей ее решения, многими учеными ежегодно проводятся исследования, направленные на изучение вопроса применения пластиковых отходов в промышленности, в том числе – в технологии изготовления бетонов [1–8]. Анализ работ выявил неоднозначность результатов с точки зрения оценки эффективности применения пластиковых отходов в бетоне в части улучшения его эксплуатационных свойств: в одних случаях, наблюдался прирост прочностных свойств, в других – потеря. В большинстве случаев выявлено улучшение рабочих характеристик, коррозионной стойкости, стойкости к растрескиванию, ударной вязкости и упругости, уменьшение веса при введении пластика в бетон.

В работе [9] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния введения пластика (в виде хлопьев, полученных от перерабатывающего завода) в количестве 1,25 % (обычного (далее – RP) и подвергнутого низкому (10 кГр) и высокому (100 кГр) уровню гамма-облучения (далее – LD и HD)) и минеральной добавки в количестве 15 % на прочность цементных образцов. В качестве вяжущего использовали портландцемент, добавок – золу и диоксид кремния. Средний размер частиц цемента, золы и диоксида кремния составлял 12,73 мкм, 38,50 мкм и 12,05 мкм. Время облучения (активный элемент кобальт-60, продуцирующий такие же лучи, какие используют для гамма-стерилизации продуктов и медицинских инструментов) пластика составило 2,9 и 28,7 часов для низкого и высокого уровней, соответственно. После облучения хлопья измельчали, используя высоко-энергетическую шаровую мельницу (2 часа), а

также ступу с пестиком (20 мин). Средний размер частиц пластика составил 170 мкм. Образцы (цилиндры) отливали при водоцементном отношении 0,35. После выдержки в течение 24 часов образцы высвобождали из форм и помещали на 28 дней в емкости с водой. После полного отверждения образцы погружали на 48 часов в ацетон. Исследованиями прочностных характеристик установлено, что предел прочности при сжатии (по ASTM C 39 (ASTM.2016)) образцов, содержащих RP и не содержащих добавку, составляет 28,6 МПа (потеря 38 %, в сравнении с эталонными образцами) и 35,7 МПа (потеря 23 %) для образцов, содержащих LD и HD. Предел прочности при сжатии образцов, содержащих золу и пластик, составляет: 50,4 МПа (потеря 31 %), 49,6 МПа (потеря 32 %), 53,3 МПа (потеря 27 %) для RP, LD и HD, соответственно. Предел прочности при сжатии образцов, содержащих диоксид кремния и пластик, составляет: 41,9 МПа (потеря 22 %), 40,8 МПа (потеря 24 %), 46,1 МПа (потеря 1 %) для RP, LD и HD. Интересно отметить, что значения сегментарной пористости (ϕ , определена по рентгеновской микротомографии) образцов, содержащих пластик и не содержащих добавку, составляют: 0,38, 0,35 и 0,30 для RP, LD и HD против 0,23 для эталонных образцов. Значения сегментарной пористости образцов, содержащих золу и пластик, составляют: 0,21, 0,21 и 0,20 для RP, LD и HD против 0,15 для образцов, содержащих только золу. Значения сегментарной пористости образцов, содержащих диоксид кремния и пластик, составляют: 0,25, 0,26 и 0,23 для RP, LD и HD против 0,20 для образцов, содержащих только диоксид кремния. В целом, исследованиями показано преимущество использования облученного пластика, в сравнении с необлученным, с целью частичной замены цемента для уменьшения его углеродного следа без соответствующих недостатков. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение прочности путем определения оптимального соотношения облученного пластика и минеральной добавки.

Авторами [10] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния введения (взамен тонкой фракции) пластика (отходы) в количестве до 30 % (шаг 10 %) на свойства бетона марки М25. В качестве вяжущего использовали портландцемент, в качестве заполнителя – агрегаты с размером зерна менее 20 мм и более тонкой фракции – песок. Определение рабочих характеристик бетона показало, что размер «отпечатка» (slump test по IS 1199-1959) уменьшился при введении пластика от 75 мм для эталонного бетона до 21, 13 и 8 мм для бетона, содержащего пластик в количестве 10, 20 и 30 %, соответственно. Время начала и окончания схватывания составило 30 и 300 мин. Максимальная величина предела прочности при сжатии бетонных образцов в 7, 14 и 28 суточном возрасте соответствует образцам, содержащим 10 % пластика: 21,7 МПа (прирост 35 %), 26,0 МПа (прирост 35 %), 33,3 МПа (прирост 35 %). При увеличении содержания пластика до 20 и 30 % предел прочности при сжатии уменьшается до 19,3 и 17,2 МПа, 23,2 и 20,7 МПа, 29,8 и 26,5 МПа для образцов в 7, 14 и 28 суточном возрасте. Максимальная величина предела прочности при разрыве бетонных образцов в 7, 14 и 28 суточном возрасте также соответствует образцам, содержащим 10 % пластика: 3,18 МПа (прирост 115 %), 3,81 МПа (прирост 115 %), 4,84 МПа (прирост 114 %). При увеличении содержания пластика до 20 и 30 % предел прочности при разрыве уменьшается до 3,11 и 2,62 МПа, 3,73 и 3,13 МПа, 4,73 и 3,97 МПа для образцов в 7, 14 и 28 суточном возрасте. Следует отметить, что минимальные величины предела прочности при сжатии и предела прочности при разрыве образцов в 28 суточном возрасте, содержащих 30 % пластика, превышают таковые для эталонных образцов: 26,5 МПа против 24,6 МПа и 3,97 МПа против 2,26 МПа. В целом, исследованиями показано, что введение пластика взамен тонких фракций бетона позволяет увеличить прочностные характеристики (предел прочности при сжатии и предел проч-

ности при разрыве) бетона и, следовательно, применение пластика является рациональным, с точки зрения защиты окружающей среды и повышения свойств бетона.

В работе [11] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния полной замены заполнителя легковесного бетона агрегатами переработанного пластика с модулем крупности 6,4. В качестве вяжущего использовали портландцемент, в качестве заполнителя – агрегаты вулканического происхождения с максимальным размером зерна 10 мм (применяли в эталонном бетоне модулем крупности 3,5) и более тонкой фракции – песок (65 % природной зернистости и 35 % измельченный до ASTM C 136). Водоцементное отношение выбрано как 0,5 и 0,6. Отлитые образцы выдерживали в течение 7, 14 и 28 дней. Исследованиями по определению предела прочности при сжатии (ASTM C579–01) образцов (50×50×50 мм) бетона с водоцементным отношением 0,5 установлено, что максимальной прочностью обладают образцы из эталонного бетона в возрасте 28 суток (30 МПа), причем этот показатель на 48 % больше, чем для бетона с пластиком. С увеличением времени выдержки от 7 до 28 дней предел прочности при сжатии образцов ожидаемо увеличился: ~ 22,0, 26,5 и 30,0 МПа для эталонного бетона и ~ 12,0, 13,5 и 15,5 МПа для бетона с пластиком. При увеличении водоцементного отношения до 0,6 предел прочности при сжатии образцов эталонного бетона и бетона с пластиком в возрасте 28 суток ожидаемо уменьшился на 21 % и 17 %. Определением проницаемости ионов хлорида (ASTM C1202–12) образцов бетона в возрасте 28 суток установлено, что независимо от водоцементного отношения бетона с пластиком величина проходящего заряда одинакова и составляет ~ 5530 кулон, против ~ 6520 и 6270 кулон для эталонного бетона с водоцементным отношением 0,5 и 0,6. Несмотря на ухудшение прочностных характеристик, бетон с пластиком показал меньшую чувствительность к ионам хлорида, незави-

симо от водоцементного отношения, и поэтому данный материал авторы рекомендуют к применению в местах, подвергающихся серьезному химическому воздействию (морские структуры, структуры в прибрежной зоне), в дополнение к изоляции в малоэтажных корпусах или в качестве утилизирующей засыпки для траншей, где прочность должна быть в пределах 2–12 МПа.

Авторами [12] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния введения низкоплотного полипропилена (далее – ЕРР) фракции менее 4,75 мм в количестве от 5 до 20 % (шаг 5 %) на показатели свойств бетона марки М25. В качестве вяжущего использовали портландцемент, в качестве заполнителя – агрегаты с максимальным размером зерна 20 мм и более тонкой фракции – песок с размером зерна менее 4,75 мм. ЕРР вводили взамен песка. Исследованиями по определению предела прочности при сжатии, предела прочности при изгибе и предела прочности при разрыве бетона установлено, что максимальной прочностью обладают образцы, содержащие 10 % ЕРР. Изменение прочностных свойств при увеличении содержания ЕРР в бетоне носит нелинейный характер. Так, величина предела прочности при сжатии образцов, содержащих 5, 10, 15 и 20 % ЕРР, составляет 35,8 МПа, 39,0 МПа, 32,4 МПа и 30,7 МПа против 35,0 МПа для эталонных образцов; предела прочности при изгибе – 7,42 МПа, 7,73 МПа, 6,47 МПа и 6,40 МПа против 6,73 МПа для эталонных образцов; предела прочности при разрыве – 3,156 МПа, 3,343 МПа, 2,876 МПа и 2,850 МПа против 3,063 МПа для эталонных образцов. В целом, исследованиями показано, что введение ЕРР в оптимальном количестве взамен песка позволило улучшить прочностные свойства бетона, в сравнении с эталонным: предел прочности при сжатии увеличился на 12 %, предел прочности при изгибе – на 15 %, предел прочности при разрыве – на 9 %. Таким образом, применение пластика является рациональным с точки зрения защиты окружающей среды и повышения свойств бетона.

В работе [13] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния введения ЕРР (отход от производства моделей самолета) фракции менее 8 мм на показатели свойств легковесного бетона. ЕРР вводили для частичной (60 %) замены песка в бетоне. В качестве вяжущего использовали портландцемент, в качестве заполнителя – песок и синтетический коагулированный аморфный SiO₂ (марка Silica VP4: SiO₂ – 98,93 %, Al₂O₃ – 0,11 %, Na₂O – 0,84 %, С и другие элементы – 0,13 %), в качестве суперпластификатора – Dynapom SX. Водоцементное отношение составило 0,5. Образцы отливали в формы, выдерживали в течение суток, после чего извлекали из форм и выдерживали 28 и 90 дней в воде при температуре 23±2 °С. Растекаемость массы (EN 12350–5 (2009)) эталонного и ЕРР бетона составила 150 мм и 140 мм. Микроскопическими исследованиями установлено наличие плотной структуры ЕРР бетона и плотного контакта ЕРР с матрицей (несмотря на чешуйчатую поверхность зерен пластик достаточно плотно прилегает к матрице). Определены основные физико-механические свойства образцов в возрасте 28 и 90 суток: кажущаяся плотность (EN 12390–7 (2009)) составляет 1,984 и 1,998 г/см³ для эталонных образцов против 1,437 и 1,443 г/см³ для ЕРР бетона; открытая пористость (EN 12390–7 (2009)) – 14,0 и 13,9 % против 20,1 и 19,8 %; предел прочности при сжатии (кубы 40×40×40 мм по EN 196–1 (2016)) – 53,6 и 54,3 МПа против 20,8 и 21,4 МПа; предел прочности при изгибе (призмы 40×40×160 мм по EN 196–1 (2016)) – 9,7 и 10,7 МПа против 5,1 и 5,9 МПа; модуль Юнга (призмы 40×40×160 мм в продольном направлении по динамическому принципу с использованием импульсного ультразвукового метода и механизма DIO 562) – 25,7 и 25,8 ГПа против 8,1 и 10,9 ГПа. Частицы ЕРР имеют значительно более низкие параметры теплопереноса, в сравнении с кварцевым песком. Введение ЕРР в бетон позволило значительно снизить теплопроводность (кубы 70×70×70 мм, измерения осуществляли на приборе ISOMET 2114), даже в присутствии влаги, что заметно

улучшило теплоизоляционные свойства (λ составила 1,86 и 1,88 Вт/(м·К) против 0,69 и 0,71 Вт/(м·К) для ЕРР бетона). Гигроскопические параметры ЕРР бетона тесно связаны с его пористостью и с водонепроницаемостью пластика. Поэтому, коэффициент водоадсорбции увеличился незначительно, по сравнению с эталонным бетоном. Что касается параметров переноса водяного пара (EN ISO 12572 (2001)), коэффициент сопротивления диффузии пара ЕРР бетона уменьшился в среднем на 49 % (μ составил 39,4 и 41,9 против 20,0 и 21,5 для ЕРР бетона в возрасте 28 и 90 суток) для измерения *dry-cup* и на 47 % (μ составил 27,2 и 29,5 против 13,8 и 16,0) для *forwet-cup*. Таким образом, несмотря на более низкие прочностные показатели свойств ЕРР бетона, они вполне достаточны для предполагаемого использования такого бетона в неструктурных элементах конструкций для исполнения *subsoil* или в многослойных конструкциях полов, как ядро сэндвич-панелей для сборных корпусов (*prefabricated enclosures*), т.е. разработанный легкий бетон является подходящим материалом для улучшения тепловой стабильности зданий.

Авторами [14] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния введения высокоплотного полиэтилена (далее по тексту РЕ) в количестве от 10 до 25 % (шаг 5 %) на показатели свойств бетона марки М20 (водоцементное отношение 0,48). В качестве вяжущего использовали портландцемент, в качестве заполнителя – агрегаты с максимальным размером зерна 7,57 и более тонкой фракции – 2,48 мм. Тонкоизмельченный РЕ вводили взамен цемента. Исследованием по изучению влияния РЕ на консистенцию бетона установлено, что при его увеличении величина «отпечатка» (*slump test*) увеличивается практически линейно: от 70 мм для эталонного бетона до 72 мм, 73 мм, 76 мм и 78 мм для РЕ бетона с содержанием пластика 10, 15, 20 и 25 %, соответственно. Исследованием по изучению степени уплотнения бетона (отношение уплотнения бетона при обычной укладке к укладке при падении с определенной высоты) установлено, что при увеличении содержания РЕ в

бетоне она также увеличивается практически линейно: от 0,912 для эталонного бетона до 0,918, 0,933, 0,939, 0,943 для РЕ бетона с содержанием пластика 10, 15, 20 и 25 %, соответственно. Исследованиями по определению предела прочности при сжатии образцов (150×150×150 мм) бетона в возрасте 28 суток установлено, что максимальной величиной обладают образцы эталонного бетона (24,4 МПа). При введении РЕ в количестве 10, 15, 20 и 25 % прочность образцов уменьшается до 22,2 МПа (потеря 9 %), 21,1 МПа, 19,5 МПа и 17,5 МПа, соответственно. Исследованиями по определению предела прочности при изгибе образцов бетона в возрасте 28 суток установлено, что максимальной величиной обладают образцы РЕ бетона с содержанием пластика 10 % (53,0 МПа, прирост 10 %). При увеличении содержания РЕ до 15, 20 и 25 % прочность образцов уменьшается до 49,2 МПа, 46,6 МПа, 45,6 МПа. Главным преимуществом разработанного РЕ бетона являются его рабочие характеристики: потеря предела прочности при сжатии скомпенсирована приростом предела прочности при изгибе и улучшением консистенции, что позволяет рекомендовать РЕ бетон к применению. Введение пластика позволит решить вопрос с уменьшением содержания цемента в бетоне, уменьшит себестоимость бетона и уменьшит нагрузку на загрязняющую окружающую среду.

В работе [15] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния введения РЕ волокна с ультравысокой молекулярной массой диаметром 20 мкм и длиной 18 мм в количестве 2 % на свойства высокоэффективного конструкционного цементного композита. В качестве вяжущего применяли портландцемент, заполнителя – гранулированный шлак (содержание SiO₂ – 39,66 %, CaO – 34,20 %, Al₂O₃ – 12,94 %, MgO – 6,94 %), микрокремнезем (размер частиц от 0,1 до 1 мкм) и кварцевый песок (преобладающий размер частиц 135 мкм). Шлак вводили взамен кремнезема. Дисперсант применяли на основе поликарбоксилатов. Приготовление цементного композита осуществляли в планетарном смесителе путем ступенчатого

перемешивания, причем волокно добавляли в два этапа после затворения массы водой. Текучесть (CECS (2009)) композита составила 160 мм (против 220 мм для эталона). Образцы различных форм и размеров формовали при применении механической вибрации, выдерживали в формах при комнатной температуре в течение 24 часов, а после извлечения из форм – 28 дней. Температурную обработку образцов не применяли. Средняя плотность образцов композита составила 2,405 г/см³. Исследованиями прочности при растяжении образцов композита установлены: средний предел прочности при растяжении 17,42 МПа (JSCE 2008); соответствующая деформация при растяжении 8,17 %; прочность образования первой трещины 10,2 МПа; средний модуль упругости при растяжении 41,2 ГПа; удельная энергия трещины более 1500 кДж/м³. Исследованиями прочности при изгибе (четырёх точечная нагрузка) образцов (в виде балки 100×100×500 мм) установлено, что средняя прочность образования первой трещины и средний модуль упругости составляют 20,40 МПа и 27,68 МПа. Наряду с высоким модулем разрыва, балки проявляли чрезвычайно высокую пластичность, так как среднее отклонение сетки достигало около 2,5 % длины пролета. Исследованиями прочности при сжатии установлены: среднее значение предела прочности при сжатии 121 МПа и 111 МПа для кубов 70,7×70,7×70,7 мм и 100×100×100 мм, среднее значение Модуля Юнга (призма 100×100×200 мм) – 44,26 ГПа. Исследованиями микроструктуры композита установлено: прочная связь волокна с матрицей и наличие некоторого количества частично заполненных тоберморитом воздушных пор размером 10-150 мкм, образовавшихся за счет применения большого количества суперпластификатора. Отношение Ca/Si, S/Ca и Al/Ca в этом типе тоберморита составило 1,78, 0,027 и 0,17. В целом, применение PE волокна с ультравысокой молекулярной массой позволило получить высокоэффективный конструкционный цементный композит, сочетающий высокие прочность и пластичность.

Авторами [16] представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния введения волокон первичного рециркулированного (далее UPET) и обработанного рециркулированного (далее TPET) полиэтилентерефталата в количестве до 2 % (шаг 0,5 %) на свойства долговечного высоко-упругого цементного композита. PET вводили взамен волокон поливинилового спирта (PVA). Переработанные гранулы PET были расплавлены и экструдированы для получения моноволокон. Длина волокон составляла 12 мм, диаметр UPET и TPET – 38 мкм, PVA – 39 мкм. В качестве вяжущего применяли портландцемент и сульфоалюминаткальциевый цемент, заполнителя – золу, известняковый порошок, кварцевый песок с размером зерна 120-212 мкм. В состав композита также вводили усадочно-восстановительную добавку, гидроизоляционную смесь на основе силана и суперпластификатор марки Grace™ ADVA 105 на основе поликарбоксилатов. При смешении композита волокна добавляли на втором этапе, после тщательного перемешивания остальных материалов. Образцы формовали способом вибролитья на столе в металлических формах. После сглаживания поверхности их накрывали полиэтиленовыми листами, для предотвращения потери влаги и выдерживали при комнатной температуре в течение суток. После извлечения из форм образцы выдерживали в течение 28 дней при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности 95 ± 5 %. После стандартной выдержки некоторые образцы дополнительно отверждали при температуре 60 °С в течение 5 недель, что эквивалентно по мнению авторов ~ 13,5 годам естественного выветривания. Максимальной величиной предела прочности при сжатии (37,5 МПа, прирост 4,2 %) обладали образцы, содержащие PVA и UPET в количестве 1,5 и 0,5 %, соответственно. При увеличении содержания UPET (и уменьшении PVA) в бетоне изменение предела прочности при сжатии образцов носило нелинейный характер: 34,5 МПа, 37,0 МПа и 32,5 МПа. Нелинейная зависимость изменения предела проч-

ности при сжатии РЕТ композитных образцов отмечена также при увеличении содержания ТРЕТ: 37,0 МПа, 34,5 МПа, 35,5 МПа и 33,5 МПа. Максимальной величиной предела прочности при растяжении (5,17 МПа) обладали эталонные образцы, содержащие 2,0 % PVA. При увеличении содержания UPET в композите величина предела прочности при растяжении образцов уменьшалась практически линейно: 4,44 МПа, 3,59 МПа, 3,13 МПа и 2,56 МПа. Аналогичное уменьшение предела прочности при растяжении отмечено при увеличении содержания ТРЕТ: 4,35 МПа, 3,63 МПа, 3,23 МПа и 2,63 МПа. После ускоренного старения максимальной величиной предела прочности при сжатии (63,5 МПа, прирост 29,6 %) обладали образцы, содержащие PVA и UPET в количестве 1,5 и 0,5 %, соответственно. При увеличении содержания UPET предел прочности при сжатии состаренных образцов уменьшается: 60,5 МПа, 58,5 МПа и 50,0 МПа. Интересно отметить, что минимальная прочность состаренных UPET композитных образцов на 2,0 % превышает прочность эталонного композита. При увеличении содержания ТРЕТ изменение предела прочности при сжатии состаренных образцов носит нелинейный характер: 59,0 МПа, 54,5 МПа, 58,0 МПа и 48,0 МПа. После ускоренного старения максимальной величиной предела прочности при растяжении (6,15 МПа) обладали образцы из эталонного композита. При увеличении содержания UPET в композите величина предела прочности при растяжении состаренных образцов уменьшалась практически линейно: 4,60 МПа, 3,76 МПа, 3,60 МПа и 3,33 МПа. Аналогичное уменьшение предела прочности при растяжении отмечено при увеличении содержания ТРЕТ в состаренных образцах: 4,53 МПа, 3,86 МПа, 3,41 МПа и 2,63 МПа. В целом, прирост предела прочности при сжатии состаренных эталонных образцов (в сравнении со стандартными, в 28 суточном возрасте) составляет 36 %; состаренных UPET образцов – 69 %, 75 %, 58 % и 54 %; состаренных ТРЕТ образцов – 59 %, 58 %, 63 % и 43 %.

Прирост предела прочности при растяжении состаренных эталонных образцов (в сравнении со стандартными, в 28 суточном возрасте) составляет 19 %; состаренных UPET образцов – 4 %, 5 %, 15 % и 30 %; состаренных ТРЕТ образцов – 4 %, 6 %, 6 % и 0 %. Следует также отметить, что при содержании PVA и UPET в количестве 1,5 и 0,5 % в композите эмиссия CO₂ составляет 287 кг/м³, при содержании PVA и UPET в количестве 1,0 % – 282 кг/м³ против 293 кг/м³ для эталонного композита. Стоимость композита (по материалам), содержащего PVA и UPET в количестве 1,5 и 0,5 % составляет 3579 НКД/м³, при содержании PVA и UPET в количестве 1,0 % – 2686 НКД/м³, при содержании PVA и ТРЕТ в количестве 1,0 % – 2727 НКД/м³ против 4472 НКД/м³ для эталонного композита. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что даже в случае 50 % замены PVA на ТРЕТ обеспечиваются высокие прочностные свойства высоко-упругого композита. Введение РЕТ позволяет снизить себестоимость композита и эмиссию CO₂.

Выводы. Выполнен анализ зарубежных исследований, направленных на изучение вопроса применения пластиковых отходов (в том числе полипропиленовых, полиэтиленовых, полиэтилентерефталатных) в технологии изготовления бетонов различного назначения. Приведенными результатами исследований установлена экологическая и экономическая целесообразность, технологическая эффективность и перспективность введения пластика в бетон, т.к. даже в случае ухудшения свойств данные бетоны могут найти широкое применение. Дальнейшие исследования следует направить на изучение влияния введения в бетон пластика в зависимости от его химического состава, количества, размера и вида.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ушеров-Маршак А.В. Бетоны нового поколения: основы получения и перспективы развития [Текст] / А.В. Ушеров-Маршак, В.П. Сопов // Науковий вісник будівництва. — 2009. — № 55. — С. 231—239.
2. Fraternali F. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycling PET fi-ber-

- reinforced concrete [Текст] / F. Fraternali, V. Ciancia, R. Chechile, G. Rizzano, L. Feo, L. Incarnato // *Composite Structures*. — 2011. — Vol. 93. — Issue 9. — p. 2368—2374.
3. Study of waste plastic mix concrete with plasticizer [Электронный ресурс] / Baboo Rai, S. Tabin Rushad, Bhavesh Kr, S. K. Duggal // *International Scholarly Research Notices (ISRN) Civil Engineering*, 2012. — Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/469272/>
 4. Sideris, K. Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures [Текст] / Sideris K.K., Manita P. // *Construction and Building Materials*. — 2013. — Vol. 41. — p. 296—302.
 5. Сопов В.П., Долгий В.П. Проблема совместимости химических добавок с различными видами цементов / *Науковий вісник будівництва*. Харьков: ПФ «Михайлов». — 2013. — № 4 (74). — С. 358—363.
 6. Gonzalo, M-B. Gamma Radiation as a Recycling Tool for Waste Materials Used in Concrete [Текст] / Gonzalo Martínez-Barrera, Liliana Ivette Ávila-Córdoba, Miguel Martínez-López, Eduardo Sadot Herrera-Sosa, Enrique Viguera-Santiago, Carlos Eduardo Barrera-Díaz, Fernando Ureña-Núñez and Nelly González-Rivas // *Evolution of Ionizing Radiation Research*, 2015. Chapter 11 – p. 259-279.
 7. Novak, J. Fibre reinforced concrete exposed to elevated temperature [Текст] / J. Novak, A. Kohoutkova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 246 (2017) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/246/1/012045/pdf>
 8. PET as a novel material in construction industry [Электронный ресурс] / Aneesa Mush-taq // *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 7. – Special issue 04. – p. 666-670. – Режим доступа: <http://www.ijarse.com/currentissue.php?id=160>
 9. Schaefer, C-E. Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint [Текст] / Carolyn E. Schaefer, Kunal Kupwade-Patil, Michael Ortega, Carmen Soriano, Oral Büyüköztürk, Anne E. White, Michael P. Short // *Waste Management*. – 2018. – Vol. 71. – p. 426-439.
 10. A performance study on partial replacement of post-consumer plastic waste (PCPW) as fine aggregate in concrete [Электронный ресурс] / S. Srigeetha, Mithunraj S., Balachandran M.E., Boobalan M., Bharanidharan S. // *International Journal of Science and Engineering Research (IJOSER)*. – 2018. – Vol. 6. – Issue 4. – p. 2218-2222. – Режим доступа: <http://www.ijoser.org/Files/1477.pdf>
 11. Lightweight concrete containing recycled plastic aggregates [Электронный ресурс] / Alqahtani Fahad K., Ghataora Gurmel, Khan M. Iqbal, Dirar Samir, Kioul Azzedine, Al-Otaibi Mansour // *International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2015)*. — 2015. — p. 527—533. — Режим доступа: <https://www.atlantispress.com/proceedings/icectt-15/articles?q=Fahad>
 12. Effect of partial replacement of fine aggregate in concrete with low density polypropylene [Электронный ресурс] / S. Sreenath, S. Harishankar // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. — 2016. — Vol. 7. — Issue 6. — p. 635—640. — Режим доступа: https://www.iaeme.com/MasterAdmin/uploadfolder/IJCIET_07_06_070/IJCIET_07_06_070pdf
 13. Záleská, M. Lightweight concrete made with waste expanded polypropylene-based aggregate and synthetic coagulated amorphous silica [Текст] / Martina Záleská, Milena Pavlíková, Ondřej Jankovský, Jaroslav Pokorný, Zbyšek Pavlík // *Ceramics-Silikáty*. — 2018, № 62. — Issue 3. — p. 221—232.
 14. Use of waste plastic as fine aggregate substitute in concrete [Электронный ресурс] / Amalu R.G, Azeef Ashraf, Muhammad Hashim, Rejith K.U, Vijitha V., Nithya Kurup // *International Journal of Scientific and Engineering Research (IJSER)*. – 2017. – Vol. 7. – Issue 4. – p. 172-177. – Режим доступа: <https://www.ijser.org/researchpaper/USE-OF-WASTE-PLASTIC-AS-FINE-AGGREGATE-SUBSTITUTE-IN-CONCRETE.pdf>
 15. Yu, Ke-Quan. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers [Текст] / Ke-Quan Yu, Jiang-Tao Yu, Jian-Guo Dai, Zhou-Dao Lu, Surendra P. Shah // *Construction and Building Materials*. — 2018. — Vol. 158. — p. 217-227.
 16. Yu, Jing. Tensile performance of sustainable Strain-Hardening Cementitious Composites with hybrid PVA and recycled PET fibers [Текст] / Jing Yu, Jie Yao, Xiuyi Lin, Hedong Li, Jef-fery Y.K. Lam, Christopher K.Y. Leung, Ivan M.L. Sham, Kaimin Shih // *Cement and*

Нікічанов В.В., Чаплянко С.В. ВИКОРИСТАННЯ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БЕТОНУ.

Виконано огляд та аналіз зарубіжних досліджень, спрямованих на вивчення питання використання пластикових відходів різного хімічного складу у технології виготовлення бетонів різного призначення. Оцінка ефективності використання пластикових відходів у бетоні в частині його експлуатаційних характеристик показала наступне: часткова заміна цементу опроміненим пластиком у цементних зразках показала його перевагу, у порівнянні з неопроміненим пластиком; часткова заміна тонких фракцій пластиком у бетоні марки М25 викликала збільшення межі міцності при стисненні і при розриві; повна заміна крупного заповнювача пластиком у легкому бетоні викликала, з одного боку – зменшення межі міцності при стисненні, з іншого – меншу чутливість до іонів хлориду; часткова заміна піску низкощільним поліпропіленом у бетоні марки М25 викликала збільшення межі міцності при стисненні, при згині і при розриві; часткова заміна піску поліпропіленом у легкому бетоні викликала, з одного боку – зменшення межі міцності при стисненні і при згині, модуля Юнга, коефіцієнта опору дифузії пара, з іншого – зменшення уявної щільності та значне зменшення теплопровідності; часткова заміна цементу високощільним поліетиленом у бетоні марки М20 викликала, з одного боку – зменшення межі міцності при стисненні, з іншого – поліпшення консистенції бетону та збільшення межі міцності при згині; введення поліетилену з ультрависокою молекулярною масою у високоефективний конструкційний цементний композит дозволило отримати композит, що характеризується високою міцністю і еластичністю; часткова заміна полівінілового спирту первинним і обробленим рециркульованим поліетилентерефталатом у високо-пружному цементному композиті викликала, з одного боку – зменшення межі міцності при розриві, з іншого – збільшення межі міцності при стисненні. Встановлено екологічну і економічну доцільність, технологічну ефективність і перспективність введення пластика у бетон, тому що навіть у разі погіршення властивостей дані бетони можуть знайти широкое застосування.

Ключові слова: бетон, в'язуче, заповнювач, пластик, поліпропілен, поліетилен, поліетилентерефталат, показники властивостей.

Nikichanov V.V., Chaplianko S.V. APPLICATION OF PLASTIC WASTES IN THE TECHNOLOGY OF CONCRETE MANUFACTURE.

Review and analysis of foreign researches, aimed at studying the issue of the use of plastic waste of different chemical composition in the technology of manufacturing concrete of various purposes have been done. Evaluation of effectiveness of the use of plastic waste in concrete in terms of its operational characteristics has been showed the following: partial replacement of cement with irradiated plastic in cement samples showed its advantage in comparison with non-irradiated plastic; partial replacement of fine aggregate with plastic in M25 concrete caused an increasing of compressive strength and split tensile strength; complete replacement of coarse aggregate with plastic in lightweight concrete caused an, on the one hand – in decreasing of compressive strength, on the other – in decreasing of sensitivity to chloride ions; partial replacement of sand with low density polypropylene in M25 concrete caused an increasing of compressive strength, split tensile strength and flexural strength; partial replacement of sand with polypropylene in lightweight concrete caused an, on the one hand – in decreasing of compressive strength, flexural strength, Young's modulus, vapor diffusion resistance coefficient, on the other – in decreasing of bulk density and thermal conductivity; partial replacement of cement with high density polyethylene in M20 concrete caused an, on the one hand – in decreasing of compressive strength, on the other – in improvement of concrete's consistency and increasing of flexural strength; introduction of ultra-high-molecular-weight polyethylene in ultra-high performance engineered cementitious composites made it possible to obtain a composite with high strength and elasticity; partial replacement of polyvinyl alcohol with virgin recycled and treated recycled polyethylene terephthalate in sustainable strain-hardening cementitious composites caused an, on the one hand – in decreasing of tensile strength, on the other – in increasing of compression strength. The environmental and economic feasibility, technological efficiency and perspectivity of using plastic in concrete have been established, since even in case of properties deterioration, these concretes can find wide application.

Key words: concrete, binder, aggregate, plastic, polypropylene, polyethylene, polyethylene terephthalate, properties indicators.