

ПОЛИМЕРНЫЕ ОТХОДЫ – НОВЫЕ РЕСУРСЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. В. А. Шишкинская^а, О. А. Серенко^{а, *}

^аИнститут элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова

Российской академии наук

119334 Москва, ул. Вавилова, 28, Россия

*e-mail: oserenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.05.2024 г.

После доработки 28.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

Обзор посвящен анализу областей практического применения полимерных отходов в составе строительных материалов, в частности в полимернаполненных бетонах, полимербетонах, в дорожных покрытиях, в древесно-полимерных композитах. Выбор этих материалов обусловлен многотоннажностью их производства, востребованностью и длительным периодом эксплуатации.

DOI: 10.31857/S2308112024020071, EDN: MYQPIR

Постоянный рост спроса на изделия из полимерных материалов, широко используемых во всех отраслях народного хозяйства, является причиной появления и большого количества полимерных отходов. Исходя из данных отчета Greenpeace, в России на февраль 2020 года площадь легальных объектов захоронения отходов, свалок и полигонов превышает 4 млн гектаров и с каждым годом становится все больше [1]. В связи с этим вопрос охраны окружающей среды, а именно борьбы с полимерным мусором, встает достаточно остро.

Существует три основных метода утилизации полимерных отходов: захоронение на полигонах, сжигание, вторичная переработка для возвращения пластика в производство. Сжигание позволяет избавиться от полимерного мусора “раз и навсегда” [2]. Однако при постоянном росте объема производства полимеров и, как следствие, увеличения их отходов ограниченные возможности мусоросжигательных заводов не способны решить проблему уничтожения отходов.

Вторичная переработка полимерных отходов дает возможность реализовать экономику замкнутого цикла. Ее принципы основываются на циклическом использовании ресурсов (т.е. повторное использование и переработка материалов) с целью безотходного производства выпускаемой продукции (материалы, изделия,

конструкции), в частности применения вторичных полимеров для производства новых материалов [3] (см. схему 1).

Отходы собираются на полигонах, далее происходит их грубая сортировка (обычно вручную) и предварительная очистка (от этикеток, остатков клея и прочего мусора). После измельчения, отмывки и сушки происходит их сепарация и грануляция. Гранулированные отходы, являющиеся товарной продукцией, используются в производстве различных изделий неотчетственного назначения. Чаще всего это товары краткосрочного применения, например изделия бытового назначения. После эксплуатации они снова возвращаются в цикл на стадию сбора. В то же время использование измельченных отходов в составе материалов долгосрочного потребления (например, в строительных материалах, в составе дорожной одежды) позволит уменьшить скорость их поступления на свалку, тем самым сократить поток полимерного мусора, поступаемого на пункты его сбора.

Различные технологии вторичной переработки полимеров (деполимеризация, апсайдинг) и сопутствующие ей вспомогательные стадии (сортировка, дробление, очистка, разделение по типам полимеров и т.д.) и используемое при этом оборудование описаны в обзорах и монографиях [3–6]. По сути, эти способы

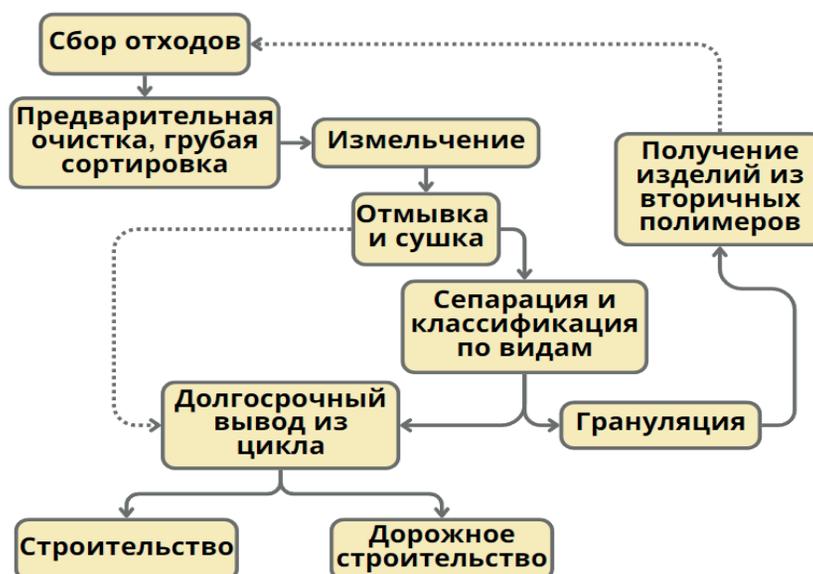


Схема 1.

рециклинга вторичных полимеров направлены на реанимацию или “клонирование” бывших в употреблении полимеров. В большинстве случаев производственное воплощение лабораторных технологических решений экономически маловыгодно и имеет длительный срок окупаемости.

Другой, не менее важной актуальной проблемой является сбережение природных ресурсов и охраны природы. Экстенсивная добыча природных ископаемых, минералов как традиционных наполнителей для различных материалов, приводит к утрате растительности, потере водоудерживающих слоев, понижению уровня грунтовых вод и нарушению существующей экосистемы в целом.

При объединении этих двух взаимосвязанных проблем, неизбежно возникает вопрос: Что делать при избытке одного (полимерные отходы) и при необходимости экономии другого (“природных ресурсов”)? Цитируя К. Юнга, “правильно сформулированный вопрос – половина решения проблемы”. Если рассматривать полимерные отходы не как мусор, с которым необходимо бороться, а как еще неосвоенные и постоянно пополняемые ресурсы (не природные, а искусственно созданные ископаемые) для производства новых материалов и изделий с длительным сроком эксплуатации, то проблема утилизации полимерных отходов может найти свое рациональное, экономически выгодное и бизнес-привлекательное решение. Безусловно, это непростая задача, учитывая многокомпонентность состава полимерных отходов, присутствие

в них разных наполнителей, добавок и т.д. Тем не менее природные материалы тоже имеют далеко не простой состав, но в этом есть их достоинство.

В настоящем обзоре проведен анализ работ, посвященных исследованию строительных материалов, в составе которых или присутствуют полимерные отходы, или они получены из вторичных полимеров. Выбор этого класса материалов определен многотоннажностью их производства, востребованностью и длительным периодом эксплуатации.

Бетон – широко распространенный, пользующийся большим спросом строительный материал с длительным сроком службы. Использование полимерных отходов в составе бетона является не только рациональным методом их использования, но и позволяет вывести часть отходов из общего потока их накопления на долгое время. Но это не единственная цель, преследуемая разработчиками. Полимеры и полимерные отходы в составе бетона способны выполнить полезную функцию и улучшить свойства этого строительного материала (например, влагостойкость, химическая стойкость, усадка при высыхании, ползучесть и т.д.) [7].

Бетон – искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердевания смеси, которая состоит из цемента (минеральное вяжущее вещество), воды, наполнителей, в роли которых в классическом варианте выступают частицы песка (наполнитель – частицы размером до 5 мм), заполнителей (размеры частиц до 50 мм), чаще всего это гравий, щебень [8]. В состав бетона

могут входить специальные добавки, способные изменить его свойства или придать новые [9–13]. Исходя из определения, бетон можно отнести к дисперсно-наполненным композитным материалам на основе неорганической матрицы [8].

Несложный, на первый взгляд, состав этого распространенного строительного материала послужил началом многочисленных исследований, направленных на определение возможности замены одного или нескольких его компонентов, на другие с целью получения новых “бетонов”. К перспективным “заменителям” относятся полимеры и, в частности измельченные или дробленые полимерные отходы [7, 14–20].

Согласно принятой классификации [21, 22], материалы на основе минеральных вяжущих и полимеров, подразделяются на следующие классы (типы):

– полимернаполненные бетоны – композиции на основе минеральных вяжущих и смеси минеральных и полимерных наполнителей и заполнителей;

– модифицированные бетоны – бетоны с малыми добавками полимеров;

– полимерцементные бетоны – цементные бетоны, при приготовлении которых используются водорастворимые олигомеры или полимеры, водные эмульсии полимеров;

– полимербетоны – высоконаполненные композиции на основе синтетических смол, полимерных наполнителей и заполнителей или смеси полимерных частиц с минеральными наполнителями разного размера.

Из перечисленных выше видов полимерных бетонов как объектов, в составе которых используются полимерные отходы, наиболее распространены полимернаполненные бетоны и полимербетоны. Именно они будут рассмотрены в настоящем обзоре как потенциальные строительные материалы.

ПОЛИМЕРНАПОЛНЕННЫЕ БЕТОНЫ

Наиболее распространенным вариантом решения задачи полезного использования полимерных отходов в бетоне является замена части минеральных заполнителей и наполнителей на измельченные (дробленые, гранулированные) полимерные частицы. Очевидно, что частицы полимера не могут равняться по своим механическим характеристикам к минеральным (щебню, песку и т.д.).

Следовательно, вероятность получения полимернаполненных бетонов с теми же прочностными свойствами, как у традиционного бетона, мала. В многочисленных работах отмечается, что замена минеральных заполнителей и наполнителей сопровождается снижением уровня механических характеристик бетонов [23–31]. Так, авторы работы отмечают: “Использование полипропиленовых частиц в качестве частичной замены мелкого заполнителя при содержании 4% и ниже может быть предложено для легких бетонов и элементов конструкций, не подвергающихся чрезмерным нагрузкам” [31].

Однако присутствие в составе минерального вяжущего полимерных частиц способно придать новому материалу другие полезные свойства, присущие вводимым полимерам, а именно низкий удельный вес, долговечность, стойкость к агрессивным средам, водонепроницаемость, тепло- и звукоизоляционные характеристики. Например, при замене песка на частицы переработанных отходов ПВХ новые композиции при снижении прочностных показателей и плотности характеризовались устойчивостью к минеральным кислотам (авторы использовали 5%-ные растворы серной, соляной и азотной кислот), повышенными теплоизоляционными свойствами [32].

Согласно работе [33], включение до 45% по объему мелких заполнителей ПВХ в легкий бетон улучшает его пластичность и стойкость к хлорид-ионам, а также снижает усадку при высыхании. Авторы работы [34], изучавшие свойства бетонной композиции, в состав которой входило до 25% крупного заполнителя ПВХ, пришли к выводу, что величина осадки бетона увеличивается с ПВХ-заполнителями, при этом значения прочности на сжатие образцов бетона уменьшаются. Аналогичный результат был получен и авторами работы [35]. К положительному эффекту отходов ПВХ в бетоне можно отнести то, что агрегаты ПВХ повышают кислотостойкость бетона, в частности препятствуют диффузии Cl-ионов в объем образца.

Введение в состав бетона в качестве заполнителей измельченных отходов ПЭТФ повышает его стойкость к воздействию серной кислоты [36]. рядом исследователей отмечено, что использование ПЭТ-заполнителей в составе бетона позволяет получить материалы с повышенными теплоизоляционными свойствами [37–40].

Использование измельченных ПЭ- или ПП-отходов в составе цемента повышает влагостойкость бетонов [24, 41]. Кроме того, блоки из бетона с содержанием ПЭ-отходов 25–30% обладают хорошей обрабатываемостью, нехрупкие,

что важно при использовании их как строительных материалов. Авторы особо отмечают, что в полученных блоках можно проделывать отверстия без растрескивания и нарушения целостности образца [24].

Несмотря на перечисленные улучшенные свойства бетонов, основной их характеристикой все-таки является прочность на сжатие, изгиб. Для уменьшения отрицательного влияния полимерных частиц на механические свойства бетонов предлагается введение армирующих волокон (полимерных, стеклянных, металлических), препятствующих росту трещин при приложении нагрузки [42–48], или использование дробленых отходов армированных полимерных композитов [49]. Возможно, для решения задачи сохранения механических свойств полимернаполненных бетонов необходимо учитывать специфику физико-химических процессов гидратационного твердения цементных систем, которые многомаршрутны и длительны [8, 50–52]. На сегодняшний день уже очевидно, что при инертности поверхности введенных в бетон полимерных частиц и ее неучастии в химических процессах формирования цементного камня вероятности решения очерченной выше проблемы сохранения прочности полимернаполненного бетона маловероятна. Как один из вариантов, полимерные частицы перед смешением с цементом должны подвергаться дополнительной обработке, модификации.

Другой подход основан на разделении процессов твердения бетона и введения полимеров [53, 54]. Сначала отверждают бетон, а потом пропитывают его жидким (низковязким) полимером или олигомером. На последующей стадии осуществляют отверждение импрегнированного полимера (олигомера). В таком варианте получения полимерно-бетонных материалов полимер заполняет образовавшиеся при формировании цементного камня пустоты, поры, уменьшая дефектность конечной структуры материала. Образцы, полученные по этой технике, характеризуются повышенными значениями механических свойств по сравнению с образцами, не пропитанными полимером. Стоит заметить, что эта процедура не только многостадийна, но и длительна и пока не вышла за рамки лабораторных исследований.

Отходы полимеров могут не только использоваться в составе бетона, но и полностью заменить бетонные конструкции, изделия. Ярким примером являются железнодорожные шпалы, полностью изготовленные из отходов полимеров [55–59]. Их преимуществами являются низкая себестоимость, более высокая износостойкость

и трещиностойкость по сравнению с деревянными или бетонными шпалами. Полимерные шпалы влагостойки, не проводят электрический ток, что позволяет отказаться от изоляторов и обеспечивать нормальную работу рельсовых цепей [59]. При устройстве полимерных шпал применяются стандартные промежуточные рельсовые скрепления и путевой инструмент. Немаловажным фактом является то, что пластмассовые шпалы за счет собственной упругости не требуют укладки подрельсовых амортизирующих прокладок, поэтому создаются более благоприятные условия для работы промежуточных рельсовых скреплений, и продлевается срок службы балласта. После выработки своего срока службы полимерные шпалы могут быть переработаны и вновь уложены в путь.

Разработка полимерных шпал и брусев является в настоящее время бурно развивающимся направлением в области железнодорожных материалов. По мнению М.Ю. Хвостика [60], шпалы из полимеров могут заменить деревянные шпалы на участках, где укладка железобетонных шпал нецелесообразна. В Московском и Санкт-Петербургском метрополитенах уже уложены опытные участки с композитными полимерными шпалами, изготовленными из полимерных отходов.

ПОЛИМЕРБЕТОНЫ

В материалах этого вида связующим выступают различные смолы, такие как полиэфирные, эпоксидные [40, 61, 62], фенолформальдегидные, ацетонформальдегидные, мочевиноформальдегидные смолы [21, 63, 64]. Выбор наполнителей, заполнителей для получения полимербетонов ограничивается только фантазией исследователей, начиная от измельченных отходов резины, пластика, древесных опилок, измельченных вторичных бетонов, техногенных отходов, различных волокон, заканчивая наноразмерными частицами (глины, кремнеземы, углеродные наночастицы) [65–70]. Результаты работ обобщены в многочисленных обзорах, например [22, 71–73].

Несмотря на многообразие предлагаемых составов полимербетоны остаются подобными друг другу, так как относятся к классу дисперсно-наполненных композитных материалов на основе реактопластов и характеризуются действием общих закономерностей и схожей получаемой структурой материала. К ним применимы установленные ранее основные факторы, определяющие характеристики полимерных композиционных материалов. В частности, дисперсность

и содержание наполнителя, адгезионное взаимодействие на границе полимер–наполнитель, способы предотвращения перехода микротрещин в магистральную и т.д. [71–76].

БИТУМЫ, АСФАЛЬТОБЕТОНЫ

Во избежание каких-либо разночтений, мы дадим общепринятые определения описываемым ниже материалам [77]. Битум (от лат. *bitumen*, что означает “горная смола” и “асфальтовый”) – твердое или смолистое вещество из углеводородов и их производных в виде азотистых, сернистых, кислородо- и серосодержащих соединений. Асфальтобетон – битумно-минеральный материал, состоящий из асфальто-вяжущего вещества (битум с минеральными частицами), наполнителя (щебень, гравий), наполнителя (песка) и различных добавок. При отсутствии в асфальтобетонной смеси щебня или гравия битумно-минеральный материал называется песчаным асфальтобетоном.

Битум – широко используемый недорогой термопластичный вяжущий материал, нашедший применение в автодорожных покрытиях, гидроизоляции, кровельных работах и т.д. Перспективным направлением повышения качества битумов и долговечности покрытий на его основе (в частности в составе дорожной одежды, классическая конструкция которой приведена на рис. 1) является введение полимеров, полимерных отходов.

Использование вторичных полимеров имеет и дополнительные преимущества – снижение себестоимости продукции, решение проблемы утилизации

полимерных отходов и ресурсосбережения вследствие экономии первичного сырья при изготовлении асфальтовых дорожных покрытий (нефть, минеральные природные наполнители) [78–85].

Экспериментальные результаты разных исследователей показали, что переработанные полимеры, как и первичные, положительно влияют на свойства битумных вяжущих. Традиционно способы введения полимерных отходов в битум подразделяют на мокрый и сухой. Первый заключается в смешении горячего битума с измельченными вторичными полимерами (флексы, частицы). Температура разогретого битума должна быть такой, чтобы обеспечить переход добавляемых полимерных частиц в расплав, а сама процедура мокрого введения по сути является смешением расплавов. Далее в подготовленный модифицированный битум добавляют наполнители [86]. Ограничением широкого использования этого способа является необходимость применения специализированных установок не только для разогрева битума, но и для смешения компонентов, которое обеспечивало бы хорошее качество смешения. Так, по мнению авторов работ [86–88], смешивание гранул (флексов) вторичного полимера с битумом должно осуществляться в высокоскоростном смесителе при высокой температуре для получения высокоэффективного асфальтового вяжущего с желаемыми свойствами. Это значительно увеличивает производственные затраты и делает нерентабельным технологический процесс производства асфальтового покрытия. Кроме этого, термо-окислительная деструкция расплава битума при повышенных температурах накладывает ограничения на тип полимеров, пригодных для смешения с ним [89]. Например, во избежание деструктивных процессов в битуме для его модификации этим способом его разогревают до 150–160°C и используют отходы полиэтилена (HDPE, MDPE, LDPE и LLDPE), смеси полиэтилена с резиновой крошкой [90, 91].

Введение полимеров в битум мокрым способом осложняется нестабильностью получаемой смеси и фазовым ее разделением. Для преодоления этих проблем необходимо повысить уровень совместимости компонентов смеси битум-полимер путем введения реакционноспособных compatibilizаторов, сшивающих добавок [92], модификации поверхности частиц отходов ПЭНП, ПЭВП путем облучения [93, 94], прививки maleinového ангидрида [95] или глицидилметакрилата [96]. Несмотря на разнообразие предлагаемых вариантов, максимальное количество вторичного пластика, которое можно добавить в смесь

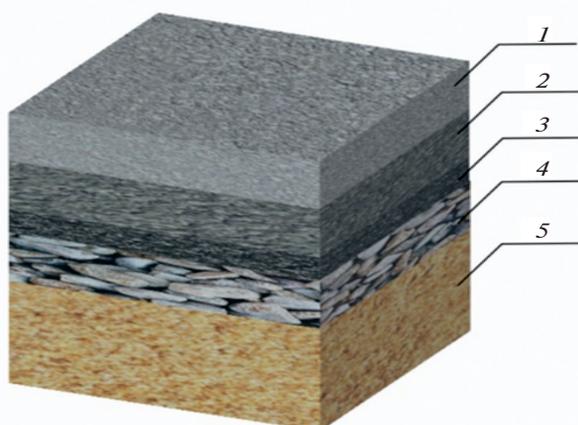


Рис. 1. Схема конструкции дорожной одежды: 1 – мелкозернистый асфальтобетон, 2 – крупнозернистый асфальтобетон, 3 – битумная пропитка, 4 – щебень, 5 – песок. Цветной рисунок можно посмотреть в электронной версии.

полимер–битум без ущерба свойств готового покрытия, не превышает 8%.

Сухой способ введения предполагает добавление дробленых (измельченных) полимерных отходов в битум при одновременной загрузке в смеситель всех компонентов композиции [86, 97–100]. В отличие от мокрого способа он не предусматривает отдельной технологической стадии смешения полимера с битумом, т.е. его применение не изменяет технологию получения материалов асфальтобетонных смесей, он менее энергозатратен. Более того, этот метод снимает ряд требований, предъявляемых к полимерным отходам, а именно температура плавления или их размягчения, следовательно, нет требований и к составу полимерных отходов, а также к дисперсности частиц, которые в составе битума выполняют функцию наполнителей и заполнителей. Так, использование флексов размером 0.425–1.18 мм из измельченных ПЭТФ бутылок в составе асфальтовой смеси, введенных сухим методом, позволило улучшить усталостные характеристики и жесткость асфальтового композита [87]. При замене заполнителя размером 3.36–4.75 мм гранулами отходов ПЭТФ (~3 мм) получаемая асфальтовая смесь более стабильна по Маршаллу и имеет более низкую текучесть по Маршаллу по сравнению с контрольной смесью (без частиц ПЭТФ) [88, 101, 102].

Авторы других работ [103–105] также отмечали положительные эффекты при использовании полимерных отходов ПЭТФ, ПЭ, ПВХ, ПП в асфальтовых дорожных покрытиях а именно, устойчивость к колееобразованию, повышение влагостойкости, жесткости, усталостной прочности, стойкости к растрескиванию и уменьшение деформации при повышенных температурах. Немаловажным результатом является и улучшение удобоукладываемости, уплотняемости, устойчивости к воздействию климатических факторов и несущей способности дорожного покрытия [105, 106].

Авторами работы рекомендовано в качестве модифицирующей добавки использовать сшитый полиэтилен [107, 108]. Модификация асфальтобетонной смеси 3–5% частиц сшитого полиэтилена привела к повышению водостойкости, температуры размягчения и эластичности получаемой смеси.

В обзорах [81, 109] представлена сводная информация о влиянии разных полимерных отходов на характеристики асфальтового вяжущего и асфальтовых смесей в отношении жесткости и вязкости асфальтового вяжущего, а также таких эксплуатационных свойств, как содержание воздушных пустот, прочность, устойчивость

к колееобразованию, к усталости, термическому растрескиванию и влагостойкости.

Несмотря на “смягчение” требований к составу полимерных отходов при сухом методе смешения, проблема адгезионного взаимодействия на границе битум–поверхность частицы или смачивания поверхности частиц битумом остается актуальной. В противном случае введенные частицы выкрашиваются, образуя на поверхности дорожных покрытий дефекты, способствующие раннему разрушению дорожного полотна. Как и в случае дисперсно-наполненных композитов, проблема решается путем введения поверхностно-активных веществ в битум или поверхностной обработкой частиц аппретами (функциональные добавки, содержащие метоксисилановые и силанольные группы, гидроксильные группы) [108, 110–116].

В заключение этого раздела стоит отметить, что вывод о целесообразности введения полимерных отходов в состав дорожных покрытий могут дать только результаты натурных испытаний и мониторинг эксплуатационных характеристик экспериментальных дорог. В ряде публикаций отмечается, что введение полимерных отходов в асфальтобитумные покрытия приводит к удорожанию материала и стоимости работ при устройстве покрытий, но экономический плюс, который перекрывает эти затраты, находится в увеличении срока эксплуатации и сокращении затрат на ремонт и замену дорожных покрытий. Напомним, что в 70-х годах XX столетия вопрос о целесообразности применения в составе битума измельченных отходов резины широко обсуждался в научно-технической литературе. Сейчас это общепринятая практика при устройстве дорожных покрытий [77, 117]. Будем надеяться, что в случае пластиковых отходов понадобится меньше время для их внедрения в технологию строительства автодорог.

Стоит отметить и тот факт, что сегодня пластиковое дорожное полотно, которое практически полностью состоит из вторичных полимеров, это реальность. Технология пластиковых дорог была предложена еще в 2015 г. компаниями “VolkerWessels” и “Wavin” [118]. В 2018 г. в Нидерландах такой тип дорожного покрытия впервые использовался для построения велосипедной дорожки. Это покрытие было изготовлено в виде полых модулей, состоящих на 70% из переработанного пластика и на 30% из первичного полипропилена. Конструкция сборного покрытия из полимерных плит, по сути, является аналогом железобетонной конструкции, предложенной А.В. Яковлевым [77].

Безусловно, разработка модульного дорожного покрытия, на 100% состоящего из переработанных полимерных отходов, более привлекательна. Предполагается, что такие сборные дороги будут служить в 2–3 раза дольше стандартных и иметь более низкую стоимость из-за более коротких сроков строительства.

Дробленые полимерные отходы используются не только в верхних слоях дорожной одежды (рис. 1). Их добавляют в щебеночный слой для уменьшения истираемости [77], а также для укрепления грунтового основания [119].

Применение полимерных отходов в строительстве дорог и тем более пластиковых дорог – это примеры того, что полимерные отходы – действительно недооцененный неприродный ресурс для производства новых материалов и модификации существующих.

Другим примером рационального использования полимерных отходов является строительство мостов, в конструкции которых используются блоки из полимерных отходов. В 1998 г. в США был построен первый мост с использованием армированного композита на основе вторичных ПС и ПЭВП [120]. Такой материал благодаря своей полимерной природе обладает высокой устойчивостью к влаге и гниению, а также характеризуется не меньшей прочностью, чем пиломатериалы на основе древесины. Использование армирующих агентов (стекловолокна) позволило разработчикам получить композит с более высоким модулем упругости и сопротивлением к ползучести. Конструкционная особенность этого типа мостов заключается в использовании термопластичных плит, поддерживающихся стальными балками. Мост выполняет свои функции и практически не требует обслуживания, чем подтверждается эффективность применения полимерного композиционного материала из вторичных полимеров.

Интересной практикой является переход к использованию вторичных полимеров во всех конструктивных элементах мостов: в опорах, сваях, перилах, плитах проезжей части и даже балках. Первые мосты такого типа (полностью состоящие из вторичного сырья) были возведены в 2009 г. в Северной Каролине (США) [121]. Уникальность этих мостов основывалась на использовании комбинации вторичного ПЭВП и обрезков автомобильных бамперов, представляющих собой композит из полипропилена и стекловолокна. Установлено, что полученный материал обладает высокой стойкостью к ультрафиолетовому излучению и плотностью в 8 раз меньше плотности стали

при более высокой удельной прочности. Такие мосты способны выдерживать высокие нагрузки и использоваться для передвижения тяжелой военной техники [121].

Компанией “Vertech” в рамках проекта The Bottles To Bridges (От бутылки к мосту) был осуществлен принципиально новый подход к мостостроению. В 2011 г., переработав 50 тонн полимерного мусора, компания возвела в Шотландии первый пешеходный мост, состоящий из вторичного пластика на 100%. Главным преимуществом этой разработки является возможность полной реконструкции моста и повторной переработки полимерного сырья, из которого он сконструирован. Наряду с этим он обладает всеми преимуществами, характерными для пластиковых изделий: он не подвержен коррозии, имеет небольшой вес, практически не требует обслуживания, не подвержен действию влаги.

В области гидротехнического строительства интересным направлением исследований является получение понтонных блоков, полностью состоящих из отходов термопластов. Например, авторами работы [122] разработана конструкция понтонного моста из вторичного пластика. В качестве строительного материала исследователи рекомендуют выбор ПЭВП, поскольку он позволит обеспечить мосту такие характеристики, как высокая грузоподъемность, износостойкость, длительный период бесперебойной работы, легкость ремонта и обслуживания, а также экологичность, которая в данном случае обуславливается применением вторичного сырья. В работе [123] подробно описан процесс получения понтонного блока из смеси вторичного и первичного полиэтилена и приведена технологическая схема производственной линии, по которой может быть осуществлена данная технология.

Таким образом, применение вторичных полимеров в мостостроении позволяет не только добиться высоких свойств получаемых конструкций, но и открывает новые варианты полезного и длительного применения полимерных отходов, и как следствие, сокращения их количества на свалках.

ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ ПЛАСТИКОВ

Древесно-полимерные композиты на основе вторичных пластиков (ДПК) занимают важную роль в строительной отрасли. Они могут использоваться для получения облицовочных панелей, напольного покрытия, кровельных материалов,

элементов звукоизоляции и даже в качестве несущих элементов при возведении легких сооружений. Обычно под ДПК подразумеваются композиты на основе древесины и термореактивных смол (карбамидо-, меламино-, фенолформальдегидных и т.д.), но в настоящее время все большее распространение получают ДПК, в которых в качестве полимерного связующего используются термопласты (полиэтилен, полистирол, полипропилен, ПВХ и т.д.), так как они более безопасны для здоровья человека.

В связи с непрерывным ростом экологических требований к строительным материалам перспективным в производстве ДПК является использование отходов полимерной промышленности [124, 125].

Например, Г.К. Абиловой и Г.Б. Жаумитовой [126] описаны влагопрочностные свойства ДПК, полученного на основе сосновой муки и вторичных ПЭНП и полипропилена с соотношением компонентов 1 : 1. Полученные результаты указывают на то, что поглощение воды ДПК на основе вторичного ПП (2.8%) практически в 3 раза ниже, чем ДПК на основе вторичного ПЭНП (8.6%), и в 12 раз ниже, чем у исходной древесины (33%). Отмечено, что при увеличении содержания полимера в композите влагопоглощение уменьшается, однако снижаются и механические свойства композита. В связи с этим выбор соотношения древесной и полимерной частей ДПК происходит в зависимости от требований к производимому изделию.

Результаты исследования влагопоглощения образцов, полученных на основе вторичных термопластов (ПЭ высокой и низкой плотности, ПП) и хвойной целлюлозы различных фракций в постоянном соотношении полимера к наполнителю 1 : 1, приведены и в работе [127]. Полученные данные сопоставимы с представленными в работе [126] и указывают на то, что наименьшие значения влагопоглощения наблюдаются у образцов ДПК на основе ПП – от 4.1 до 6% при разных размерах частиц целлюлозы, а наибольшие – у ДПК на основе ПЭВП – от 8.7 до 10%. Определено, что влажность образцов снижается с увеличением фракции древесных опилок вне зависимости от вида полимера в составе образца.

Совместное применение древесных опилок и вторичных термопластов также описано в работе [128]. Предварительно обработанный древесный наполнитель выбранной фракции при нагревании смешивали со вторичным ПЭ, после чего смесь вальцевали и далее перерабатывали методом горячего прессования при температуре 130–140°C. Исследователи установили оптимальный состав

композиций из ПЭ, древесных частиц и этиленпропиленового каучука: ПЭ – 41–48%, древесные частицы – 49–55%, СКЭПТ – 3–4%. При этом соотношении компонентов авторам работы удалось достичь наибольшего значения предела прочности при растяжении (~6 МПа), наименьшего значения влагопоглощения и набухания (не более 4%).

Обширное исследование в данной области проведено сотрудниками исследовательского центра Университета Катара и Института полимеров Словацкой академии наук [129]. Авторы изучили влияние соотношения вторичного линейного ПЭНП к древесному наполнителю на такие свойства, как относительное удлинение при разрыве и при растяжении, напряжение при разрыве и при изгибе, предел текучести, модуль упругости при сжатии и т.д. Установлено, что при повышении содержания наполнителя (до максимального значения 70%) модуль упругости увеличился до 1989 МПа, напряжение при разрыве резко снизилось, возросло значение прочности при изгибе. Что касается влагопоглощения, оно увеличивается с повышением содержания наполнителя вплоть до 28%. Тем не менее, при содержании древесных опилок ~50% был достигнут компромисс между механическими свойствами и влагопоглощением материала.

В работе [130] описан более перспективный подход к разработке ДПК на основе вторичных термопластов. Методика, предложенная авторами, заключается в предварительной подготовке (измельчении) термопласта, в результате чего содержание его в композиции может составлять 15–20%. В таком ДПК полимер является склеивающим агентом, удерживающим частицы древесины вместе. Описанная методика позволяет использовать отходы полимеров без необходимости предварительной их сортировки и мойки.

При всех преимуществах рассмотренных выше результатов исследований разных авторов необходимо учитывать, что при прессовании композитов на основе термопластичного связующего необходимы более высокие температуры прессования, нежели при использовании традиционного термореактивного связующего (в среднем более 140°C). В связи с этим для исключения интенсивного парообразования при прессовании допустимые значения исходной влажности композиции с термопластичными полимерами, включая полимерные отходы, должны быть ниже, чем для изделий с термореактивными связующими. Данный фактор негативно сказывается на производительности процесса получения ДПК и, как следствие, увеличивает стоимость готовой продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня в разных странах разрабатываются новые полимеры, совершенствуются методы синтеза, создаются новые технологии производства полимерных материалов, строятся заводы по многотоннажному выпуску полимеров, вкладываются огромные денежные ресурсы в развитие полимерной отрасли. И это обоснованно, поскольку полимерные материалы способствуют развитию новой техники, позволяют решить многие проблемы в освоении космоса, приборостроении, медицине, биотехнологии и т.д., улучшают качество жизни человека в целом. Но стоит полимерам выйти “из потребления”, как все их достоинства, преимущества сразу превращаются в проблемы и начинается “бой” с полимерным мусором. Все сначала, только наоборот: не создание, а уничтожение созданного. Настало время перейти от тактики борьбы к стратегии рационального использования полимерных отходов, рассматривая их как дополнительный материальный ресурс, созданный не природой, а человеком. Освоение этого нового ресурса, созданного трудами многих людей, позволит решить главную задачу – сохранить природные ископаемые.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00277-24-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роженцова Е.В., Третьякова Е.А., Шимановский Д.В. // ЭКО. 2023. Т. 53. № 2. С. 123.
2. Ярославов А.А., Аржаков М.С., Хохлов А.Р. // Вестн. РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 15.
3. Rudolph N., Kiesel R., Aumnate C. Understanding Plastics Recycling: Economic, Ecological, and Technical Aspects of Plastic Waste Handling. Munich: Hanser Publ., 2017.
4. Mekhzoum M.E.M., Benzeid H., Rodrigue D., Qaiss A., Bouhfid R. // Curr. Org. Synth. 2017. V. 14. P. 171.
5. Фомина Н.Н., Хозин В.Г. // Строительные материалы. 2021. № 1–2. С. 105.
6. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. // Sci. Adv. 2017. V. 3. № 7. e1700782.
7. Guo Y.-C., Li X.-M., Zhang J., Lin J.-X. // J. Build. Eng. 2023. V. 79. P. 107787.
8. Баженов Ю.М. Бетонovedение. М.: АСВ, 2015.
9. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Модифицированные бетоны двойного структурообразования. М.: АСВ, 2017.
10. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: Технопроект, 1998.
11. Калашников В.И., Тараканов О.В. // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 62.
12. Акулова М.В., Селиверстова О.В. // Строительство и реконструкция. 2013. Т. 48. № 4. С. 69.
13. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4.
14. Sinha A.K., Chittaranja Dr.M., Devayani V.R.S., Gadikota C.R., Kansara J.N., Vadive M. // Corros. Prot. 2023. V. 51. № 2. P. 405.
15. Harihanandh M., Karthik P. // Mater. Today Proc. 2022. V. 52. № 3. P. 1807.
16. Alqahtani F.K., Ghataora G., Dirar S., Khan M.I., Zafa I. // Constr. Build. Mater. 2018. V. 173. P. 350.
17. Bhagat G.V., Savoikar P.P. // J. Build. Eng. 2022. V. 53. P. 104565.
18. Hamada M., Al-Attar A., Abed F., Beddu S., Humada A.M., Majdi A., Yousif S.T., Thomas B.S. // Sustain. Mater. Techno. 2024. V. 40. e00877.
19. Saha S., Sau D., Hazra T. // Waste Manage. 2023. V. 169. P. 289.
20. Gu L., Ozbakkaloglu T. // Waste Manage. 2016. V. 51. P. 19.
21. Памыроев В.В. Полимербетоны. М.: Стройиздат, 1987.
22. Fowler D.W. // Cem. Concr. Compos. 1999. V. 21. P. 449.
23. Timu A., Barbuta M., Dumitrescu L., Baran I. // Procedia Manuf. 2019. V. 32. P. 253.
24. Jassim A.K. // Procedia Manuf. 2017. V. 8. P. 635.
25. Rai B., Rushad S.T., Kr B., Duggal S.K. // ISRN Civ. Eng. 2012. V. 2012. P. 1.
26. Batayneh M., Marie I., Asi I. // Waste Manage. 2007. V. 27. № 12. P. 1870.
27. Choi Y.W., Moon D.J., Chung J.S., Cho S.K. // Cem. Concr. Res. 2005. V. 35. № 4. P. 776.
28. Pezzi L., Luca P.D., Vunono D., Chiappetti F., Nastro A. // Mater. Sci. Forum. 2006. V. 514–516. P. 1753.
29. Aciu C., Ilutiu-Varvara D.-A., Manea D.-L., Orban Y.-A., Babota F. // Procedia Manuf. 2018. V. 22. P. 274.
30. Bejan G., Barbuta M., Vizitiu R.S., Burlacu A. // Procedia Manuf. 2020. V. 46. P. 136.
31. Akinyele J.O., Salim R.W., Oyeti G. // Eng. Struct. Tech. 2014. V. 6. № 5. P. 184.
32. Senhadji Y., Siad H., Escadeillas G., Benosman A.S., Chihaoui R., Mouli M., Lachemi M. // Constr. Build. Mater. 2019. V. 195. P. 198.
33. Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L. // Waste Manage. 2009. V. 29. P. 621.
34. Najjar A.M.K., Basha E.A., Milad M.B. // Int. J. 2013. V. 4. № 6. P. 399.
35. Senhadji Y., Escadeillas G., Benosman A.S., Mouli M., Khelafi H., Kaci S.O., Adhes J. // Sci. Technol. 2015. V. 29. № 7. P. 625.
36. Araghi H.J., Nikbin I.M., Reskati S.R., Rahmani E., Allahyari H. // Constr. Build. Mater. 2015. V. 77. P. 461.

37. Coppola B., Courard L., Michel F., Incarnato L., Scarfato P., Maio L.D. // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 170. № 10. P. 200.
38. Akcaözoglu S., Akcaözoglu K., Atis C.D. // *Compos. B Eng.* 2013. V. 45. № 1. P. 721.
39. Yesilata B., Isiker Y., Turgut P. // *Constr. Build. Mater.* 2009. V. 23. № 5. P. 1878.
40. Sosoi G., Barbuta M., Serbanoiu A.A., Babor D., Burlacu A. // *Procedia Manuf.* 2018. V. 22. P. 347.
41. Akinyele J.O., Toriola I.O. // *AJSTID.* 2018. V. 10. № 6. P. 709.
42. Mastali M., Kinnunen P., Isomoisio H., Karhu M., Illikainen M. // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 187. P. 371.
43. Libre N.A., Shekarchi M., Mahoutian M., Soroushian P. // *Constr. Build. Mater.* 2011. V. 25. P. 2458.
44. Li J., Niu J., Wan C., Liu X., Jin Z. // *Constr. Build. Mater.* 2017. V. 157. P. 729.
45. Li J., Niu J., Wan C., Liu X., Jin Z. // *Constr. Build. Mater.* 2016. V. 118. P. 27.
46. Hassanpour M., Shafiqh P., Mahmud H.B. // *Constr. Build. Mater.* 2012. V. 37. P. 452.
47. Wang H.T., Wang L.C. // *Constr. Build. Mater.* 2013. V. 38. P. 1146.
48. Ahmad W., Khan M., Smarzewski P. // *Mater.* 2021. V. 14. № 7. P. 1745.
49. Tao Y., Hadigheh S.A., Wei Y. // *Struct.* 2023. V. 53. P. 1540.
50. Пшеничный Г.Н. // *Технологии бетонов.* 2017. № 3/4. С. 47.
51. Шульдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Махмудов А.М. // *Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Строительство и архитектура.* 2020. Т. 20. № 2. С. 54.
52. Тараканов О.В., Акчуринов Т.К., Белякова Е.А. // *Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строит. ун-та. Сер. Строительство и архитектура.* 2022. Т. 1. № 86. С. 163.
53. Saeed H.H. // *Case Stud. Constr. Mater.* 2021. V. 15. e00772.
54. Mostofinejad D., Bahmani H., Khorshidifar A., Afsharpour R. // *Dev. Built Environ.* 2024. V. 18. P. 100414.
55. Manalo A., Aravinthan T., Karunasena W., Ticoalu A. // *Compos. Struct.* 2010. V. 92. № 3. P. 603.
56. Ferdous W., Manalo A., Van Erp G., Aravinthan T., Ghabraie K. // *J. Compos. Constr.* 2018. V. 22. № 2. P. 04017050.
57. Khalil A.A. // *J. Polym. Environ.* 2018. V. 26. № 1. P. 263.
58. Esmaeili M.H., Norouzi H., Niazi F. // *Compos. B Eng.* 2023. V. 245. P. 110581.
59. Мироненко Е.В. // *Тр. Ростовского гос. ун-та путей сообщения.* 2016. Т. 3. С. 90.
60. Хвостик М.Ю. // *Вестн. Науч.-исслед. ин-та железнодорожного транспорта.* 2016. Т. 75. № 3. С. 179.
61. Hameed A.M., Hamza M.T. // *Energy Procedia.* 2019. V. 157. P. 43.
62. Asdollah-Tabar M., Heidari-Rarani M., Aliha M.R.M. // *Compos. Commun.* 2021. V. 25. P. 100684.
63. Корнеев А.Д., Потапов Ю.Б., Соломатов В.И. *Эпоксидные полимербетоны.* Липецк: Липецкий гос. техн. ун-т, 2001.
64. Елишин И.М. *Полимербетоны в гидротехническом строительстве.* М.: Стройиздат, 1980.
65. Shokrieh M.M., Kefayati A.R., Chitsazzadeh M. // *Mater. Des.* 2012. V. 40. P. 443.
66. Jafari K., Tabatabaeian M., Joshaghani A., Ozbakkaloglu T. // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 167. P. 185.
67. Mizan M.H., Matsumoto K. // *Constr. Build. Mater.* 2023. V. 409. P. 134046.
68. Mostafaei H., Bahmani H., Mostofinejad D., Wu C. // *J. Build. Eng.* 2023. V. 76. P. 107262.
69. Wu K., Zhu H., Ibrahim Y.E., Jiang W., Haruna S.I., Shao J., Adamu M. // *Case Stud. Constr. Mater.* 2023. V. 18. e02114.
70. Agavrioloaie L., Oprea S., Barbuta M., Luca F. // *Constr. Build. Mater.* 2012. V. 37. P. 190.
71. Uson A.A., Lopez-Sabiron A.M., Ferreira G., Sastresa E.L. // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013. V. 23. P. 242.
72. Sarwar S., Shaibur M.R., Hossain M.S., Hossain M.R., Ahmmed I., Ahmed F.F., Sarker M.A.H., Shamim A.H.M. // *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 2023. V. 7. P. 100291.
73. Ghasemi-Ghalebahman A., Aghdam A.A., Pirmohammad S., Niaki M.H. // *Theor. Appl. Fract. Mec.* 2022. V. 117. P. 103210.
74. Guo C., Pei L., Guan H., Chu X., Wang H., Shi F., An Z., Qin L. // *J. Build. Eng.* 2023. V. 75. P. 106968.
75. Xia Y., Lu B., Wang J., Wu Y., Gao Y., Zhang C., Wang C., Zhao P., Fang H., Zhang J., Li B., Shi M. // *Polymer Testing.* 2024. V. 132. P. 108358.
76. Aliha M.R.M., Kouchaki H.G., Mohammadi M.H., Haghightpour P.J., Choupani N., Asadi P., Akbari M., Darvish M.G., Sadowski T. // *Compos. C: Open Access.* 2024. V. 14. P. 100446.
77. Подольский В.П., Поспелов П.И., Глаголев А.В., Смирнов А.В. *Строительство автомобильных дорог. Дорожные покрытия.* М.: Академия, 2015.
78. Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысянникова Н.Н. // *Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки.* 2017. Т. 7. С. 105.
79. Куис О.В., Грушова Е.И., Пахомчик А.С., Юсевич А.И., Дикуть М.В., Шрубок А.О. // *Тр. Белорусского гос. технол. ун-та.* 2017. Т. 2. № 199. С. 64.
80. Япаев Р.Р., Огнева Т.С., Назаров Р.С., Фасхутдинов И.Р., Осипенко М.В. // *Вестн. молодого ученого Уфимского гос. нефтяного техн. ун-та.* 2023. Т. 1. С. 26.
81. Wu S., Montalvo L. // *J. Clean. Prod.* 2021. V. 280. № 2. P. 124355.

82. Yan C., Yan J., Zhang Z., Yu D., Wang S., Jiang X., Ai C., Leng Z. // J. Clean. Prod. 2024. V. 448. P. 141592.
83. Zhu J., Birgisson B., Kringos N. // Eur. Polym. J. 2014. V. 54. P. 18.
84. Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C.O. // Appl. Sci. 2019. V. 9. P. 742.
85. Rahman M.T., Mohajerani A., Giustozzi F. // Mater. 2020. V. 13. P. 1495.
86. Lastra-González P., Calzada-Pérez M.A., Castro-Fresno D., Vega-Zamanillo Á., Indacochea-Vega I. // Constr. Build. Mater. 2016. V. 112. P. 1133.
87. Modarres A., Hamedi H. // Mater. Des. 2014. V. 61. P. 8.
88. Usman I.U., Kunlin M. // Constr. Build. Mater. 2024. V. 411. P. 134439.
89. Nouali M., Ghorbel E., Derriche Z. // Constr. Build. Mater. 2020. V. 239. P. 117872.
90. Aldagari S., Karam J., Kazemi M., Kaloush K., Fini E.H. // J. Clean. Prod. 2024. V. 437. P. 140540.
91. Xu X., Leng Z., Lan J., Wang W., Yu J., Bai Y., Sreeram A., Hue J. // Eng. J. 2021. V. 7. № 6. P. 857.
92. Padhan R.K., Sreeram A. // Constr. Build. Mater. 2018. V. 188. P. 772.
93. Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T., Grygoryeva O. // Constr. Build. Mater. 2014. V. 69. P. 1.
94. Ahmedzade P., Günay T., Grigoryeva O., Starostenko O. // J. Mater. Civ. Eng. 2017. V. 29. № 3. P. 04016233.
95. Vargas M.A., Vargas M.A., Sánchez-Sólis A., Manero O. // Constr. Build. Mater. 2013. V. 45. P. 243.
96. Jun L., Yuxia Z., Yuzhen Z. // Constr. Build. Mater. 2008. V. 22. № 6. P. 1067.
97. Motlagh A.A., Kiasat A., Mirzaei E., Birgani F.O. // World Appl. Sci. J. 2012. V. 18. P. 605.
98. Vasudevan R., Sekar A.R.C., Sundarakannan B., Velkennedy R. // Constr. Build. Mater. 2012. V. 28. P. 311.
99. Vila-Cortavitarte M., Lastra-González P., Calzada-Pérez M.A., Indacochea-Vega I. // J. Clean. Prod. 2018. V. 170. P. 1279.
100. Vila-Cortavitarte M., Lastra-Gonzalez P., Calzada-Pérez M.A., Indacochea-Vega I. // Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete. 2019. P. 327.
101. Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A. // Waste Manag. Res. 2005. V. 23. № 4. P. 322.
102. Lugeiyamu L., Kunlin M., Mensahn E.S.K., Faraz A. // Constr. Build. Mater. 2021. V. 309. P. 125176.
103. Piao Z., Mikhailenko P., Kakar M.R., Bueno M., Hellweg S., Poulikakos L.D. // J. Clean. Prod. 2021. V. 280. P. 124916.
104. Giustozzi F., Enfrin M., Xuan D.L., Boom Y.J., Masood H., Audy R., Swaney M. // Austroads Research Report AP-R669–22. 2022.
105. Tian G., Chen C., Zhang T., Gao Y., Wang S., Jia Y., Chen Z., Li Y., Zhou Z., Wei Z. // Case Stud. Constr. Mater. 2023. V. 19. e02504.
106. Benson C.Y., Khire M.V., Geotech J. // Eng. 1994. V. 120. № 5. P. 838.
107. Costa L., Peralta J., Oliveira J., Silva H. // Appl. Sci. 2017. V. 7. № 6. P. 603.
108. Sarkari N.M., Ayar P., Oskouei M.H., Khosrowshahi F.K., Mohseni M. // Constr. Build. Mater. 2021. V. 287. P. 122999.
109. Kazemi M., Kabir S.F., Fini E.H. // Resour. Conserv. Recycl. 2021. V. 174. P. 105776.
110. Sarkari N. M., Dogan Ö., Bat E., Mohseni M., Ebrahimi M. // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 497. P. 143751.
111. Sarkari N. M., Dogan Ö., Bat E., Mohseni M., Ebrahimi M. // Appl. Surf. Sci. 2020. V. 513. P. 145846.
112. Sarkari N. M., Darvish F., Mohseni M., Ebrahimi M., Khani M., Eslami E., Shokri B., Alizadeh M., Dee C. F. // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 490. P. 436.
113. Dessouky S., Contreras D., Sanchez J., Papagiannakis A.T., Abbas A. // Constr. Build. Mater. 2013. V. 38. P. 214.
114. Pérez-Martínez M., Moreno-Navarro F., Martín-Marín J., Ríos-Losada C., Rubio-Gámez M.C. // J. Clean. Prod. 2014. V. 65. P. 374.
115. Şahan N., Kumandaş B., Kabaday E., Çavdar E., Oruç Ş. // Constr. Build. Mater. 2023. V. 407. P. 133423.
116. Du X., Liu S., Lin H., Xu X., Zheng Z., Zhang H. // Constr. Build. Mater. 2023. V. 401. P. 132917.
117. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M.T., Kurmus H., Mirzababaei M., Arulrajah A., Horpibulsuk S., Maghool F. // Resour. Conserv. Recycl. 2020. V. 155. P. 104679.
118. PlasticRoad [Электронный ресурс] // URL <https://en.volkerwessels.com/en/projects/detail/plasticroad> (дата обращения: 14.03.2023)
119. Zada U., Haleem K., Abbas A. // NUST J. Eng. Sci. 2021. V. 14. № 2. P. 61.
120. Nosker T.J., Lynch J.K., Lampo R.G. // Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. 2012. P. 193.
121. Chandra V., Kim J.S. // ICSDC. 2011. P. 585.
122. Нуцалова С.Б., Пыхтеев А.Д., Малышева Е.Н. // Юный ученый. 2020. Т. 6. № 36. С. 42.
123. Чернявский В.Ф. Пат. 204971 U1 Россия. 2021.
124. Nukala S.G., Kong I., Kakarla A.B., Kong W., Kong W. // J. Compos. Sci. 2022. V. 6. № 7. P. 194.
125. Gulitah V., Liew C.K., Liew K.C. // Trans. Sci. Technol. 2018. V. 5. P. 184.
126. Абилова Г.К., Жаумитова Г.Б. // Молодой ученый. 2016. Т. 8. № 112. С. 58.
127. Гиреява Х.Я., Шубина Н.И. // Теория и технология металлургического производства. 2012. Т. 12. С. 156.
128. Глазков С.С. Науч. вестн. Воронежского гос. архитектурно-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2009. № 2. С. 38.
129. AlMaadeed M.A., Nógellová Z., Janigová I., Krupa I. // Mater. Des. 2014 V. 58. P. 209.
130. Шевляков А.А., Панферов В.И., Шевляков С.А., Маркин А.П. // Лесной вестн. 2011. Т. 5. С. 79.