

Научная статья

УДК 678.5.064.2:679.86

DOI 10.18101/2306-2363-2025-3-10-18

Использование экструзионно-прокатно-формовочной технологии для получения новых материалов из вторичного сырья

© **Дабаева Марианна Андреевна**

преподаватель,

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В

Litvinova-marianna@mail.ru

© **Хахинов Вячеслав Викторович**

доктор химических наук, профессор,

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова

Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

khakhinov@mail.ru

© **Мяханова Людмила Владимировна**

преподаватель,

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В

miakhanova@mail.ru

© **Рыжкова Тамара Андреевна**

преподаватель,

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В

ryzhk.t@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрена возможность получения композиционных материалов из отходов полимеров, в качестве которых использован полиэтилен, с добавлением кварц-полевошпатового песка в качестве наполнителя. В процесс получения композитов вовлекается вторичное сырье из производственного цикла, загрязняющее окружающую среду, что является немаловажным фактором для экологии. Для изготовления композитов использована экструзионно-прокатно-формовочная технология (ЭПФТ), позволяющая существенно повысить производительность в сравнении с существующими методами. Данная технология позволила получить материалы более тонкие и стойкие к воздействию агрессивных сред без потери физико-механических и прочностных свойств. Полученные композиты можно в дальнейшем использовать в различных областях в качестве изоляционных пленок, гидроизоляционных материалов и т. п.

Ключевые слова: материаловедение, композиты, полимерные отходы, полиэтилен, экструзионно-прокатно-формовочная технология, утилизация отходов, физико-механические характеристики композитов.

Для цитирования

Использование экструзионно-прокатно-формовочной технологии для получения новых материалов из вторичного сырья / М. А. Дабаева, В. В. Хахинов, Л. В. Мяханова,

Т. А. Рыжкова // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 3. С. 10–18.

Введение

Актуальность проведенного исследования композиционных материалов на основе вторичного сырья обусловлена их потенциальной способностью сохранять ключевые характеристики исходных компонентов. Особую значимость данная проблематика приобретает в контексте экологических вызовов, связанных с загрязнением окружающей среды полимерными отходами. Следует подчеркнуть, что процесс рециклинга полимеров представляет собой комплексную технологическую задачу, что обусловлено широким спектром их разновидностей и физико-химических свойств.

Этот вопрос имеет первостепенное значение для Байкальского региона, где реализуется система природоохранных мероприятий. В настоящее время, как свидетельствуют результаты экологического мониторинга, на один квадратный километр акватории озера приходится от 19 до 75 тысяч микропластиковых частиц (преимущественно продуктов деградации полиэтилена, полипропилена и полистирола). Эти данные, полученные в ходе исследований, указывают на необходимость законодательного регулирования использования одноразовых пластиковых изделий в регионе [5-6].

Полиэтилен (ПЭ), являющийся одним из наиболее экономически доступных полимерных материалов, был избран в качестве примера вторичного сырья для создания композитных материалов. Следует подчеркнуть, что данный полимер, будучи широко представленным в составе бытовых отходов, практически не подвергается целенаправленной утилизации, несмотря на его потенциальную пригодность к переработке и повторному использованию. В результате значительные объемы полиэтиленовых изделий, преимущественно упаковочные материалы и пакеты, оказываются на полигонах твердых бытовых отходов, что существенно нарушает экологический баланс окружающей среды. Процесс утилизации данного материала сопряжен с рядом технологических сложностей, среди которых проблема эффективной сортировки вследствие контаминации вторсырья остаточными пищевыми компонентами, агрессивными жидкостями и химическими веществами. Принимая во внимание крайне низкую скорость естественной деградации полиэтилена, исчисляемой десятилетиями, а также тот факт, что при термическом разложении данный полимер способен выделять ряд токсичных соединений (в частности, формальдегид), загрязняющих атмосферу, становится очевидной необходимость разработки эффективных методов его вторичной переработки.

Так, вторичная переработка полиэтиленовых отходов представляет собой наиболее эффективный метод минимизации негативного воздействия на экологическую обстановку. В настоящее время преимущественное развитие получили две основные технологии рециклинга данного материала. Первая технология — грануляция отходов с их последующим возвратом в производственный цикл, вторая — пиролизическая деструкция. При реализации грануляционного метода исходное сырье подвергается тонкому измельчению до порошкообразного состояния с последующим введением специальных наполнителей в процессе производства изделий. Следует подчеркнуть, что применение наполнителей не толь-

ко способствует повышению плотности материала и обеспечивает существенную экономию полимерного сырья, но и, что особенно важно, практически не оказывает отрицательного влияния на физико-механические характеристики конечного продукта. Проведенный технико-экономический анализ свидетельствует о том, что технология грануляции демонстрирует более высокую экономическую целесообразность по сравнению с пиролизическим методом переработки.

Вторичные гранулы полиэтилена служат сырьевой базой для производства широкого спектра изделий различного функционального назначения. Из данного материала изготавливают как бытовые принадлежности — мусорные мешки и упаковочные материалы, так и промышленные изделия — канистры, емкости для хранения химических веществ, трубопроводную продукцию. Особую категорию составляют сельскохозяйственные пленки и иные изделия для агропромышленного комплекса. Таким образом, вторичный полиэтилен — это универсальный материал, находящий применение в различных отраслях народного хозяйства.

Сегодня, по данным Союза производства и переработки пластика на 2023 г., во всем мире производится примерно 400 млн тонн пластика. Из них только 8,9% — вторсырье. В России больше всего используют вторичный пластик в следующих отраслях: техника — 7,5 тыс. тонн, машиностроение — 0,72 тыс. тонн, трубы инженерных сетей — 0,65 тыс. тонн, тары — 2,98 тыс. тонн.

По данным на 2024 год в разных источниках, в России перерабатывается уже от 7 до 12% всего объема полимерных отходов. При этом переработанный пластик уже широко применяется при производстве изделий технического назначения, например, широко используемый в строительстве геотекстиль часто делают из переработанных пластиковых бутылок.

Современные технологические процессы переработки вторичного сырья базируются преимущественно на методах экструзии и литья под давлением. При этом ключевым этапом производственного цикла выступает предварительная подготовка материала, позволяющая эффективно утилизировать широкий спектр полимерных отходов с целью получения композиционных материалов вторичной переработки [7]. Данный подход, как показывает практика, обеспечивает не только рациональное использование ресурсов, но и формирование замкнутого производственного цикла.

Перспективным направлением исследований в области переработки вторичных полимерных материалов является разработка технологии получения полимер-песчаных композитов с применением экструзионно-прокатно-формовочной установки, совмещающей экструзию, прокат и литье, имеющей технологический стол для формовки изделий без использования пресс-форм. Данная технология, основанная на комплексном подходе к переработке вторичного полимерного сырья, позволяет не только рационально использовать полимерные отходы, но и получать материалы с заданными эксплуатационными характеристиками. Использование комбинированного метода формования открывает широкие возможности для модификации структурно-механических свойств получаемых композиционных материалов. При этом особую значимость приобретает оптимизация технологических параметров процесса, что обеспечивает требуемое качество конечного продукта при переработке вторичных полимеров различного происхождения.

Таким образом, исследования направлены на создание научно-технологических основ получения высококачественных полимер-песчаных композитов из рециклированного сырья посредством интегрированной экструзионно-прокатно-формовочной технологии.

Исходные материалы

Композиты получали с помощью экструзионно-прокатно-формовочной технологии (ЭПФТ), где исходные материалы — это гранулы вторичного ПЭ, характеризующиеся дисперсным составом в диапазоне 0,2–0,5 мм, и кварц-полевошпатовый песок (КПШ) со следующими характеристиками: насыпная плотность в сухом состоянии 1790 кг/м³, зерновой состав на ситах с размером отверстий составляет от 0,16 до 2,5% по массе, пустотность до 29,8 %. Содержание по массе минерального наполнителя в композитах варьировалось в пределах от 10 до 50%.

В рамках экспериментальной части исследования задействована лабораторная установка ЭПФТ, объединяющая преимущества экструзионной технологии и метода литья в специализированные формовочные емкости. Применение данного технологического комплекса, как показали результаты испытаний, обеспечивает значительное повышение производственной эффективности по сравнению с традиционными методиками изготовления полимерных композиционных материалов [8–9].

Экструзионно-прокатно-формовочная технология (ЭПФТ) реализуется посредством установки, основным рабочим элементом которой является цилиндрический шнек, размещенный в нагреваемом корпусе, что позволяет варьировать температуру на всех этапах технологического процесса. Технологический цикл начинается с подачи исходного сырья в загрузочный бункер, где материал подвергается термической обработке. Последующее продвижение расплавленной массы осуществляется посредством червячного вала, оснащенного продольной щелью для экструзии. При этом конструктивные особенности установки обеспечивают равномерное распределение расплава по всей рабочей длине, а интегрированная диафрагма позволяет осуществлять точное дозирование выходящего компонента. Финальная стадия процесса включает нанесение расплавленной массы на подложку с последующим выравниванием поверхности. Далее материал поступает на формующие валы, где происходит окончательное структурирование изделия в соответствии с заданными геометрическими параметрами, например формирование волнистой поверхности или замков.

В ходе испытаний ЭПФ установки стало понятно, что изготовление новых строительных изделий будет гораздо быстрее и эффективнее выполнять на двух подобных установках. На одной установке будет изготавливаться подложка, в состав которой будет входить полимер и песок, а на другой — верхний слой, состоящий только из полимера и красителя. В зависимости от состава скорость вращения шнеков разная, и не потребуется вычищать установку для запуска изготовления верхнего слоя.

ЭПФ технология обеспечивает равномерный прогрев исходного материала по всему сечению рабочей плоскости, что позволяет избежать нежелательных явлений — пригорания и адгезии сырья к стенкам технологического контейнера. При этом применение прокатного метода существенно увеличивает производительность по сравнению с традиционными способами изготовления изделий. Исполни-

зование промышленных отходов в качестве наполнителей дает возможность создавать композиционные материалы, характеризующиеся пониженной плотностью при сохранении высокой твердости, механической прочности и огнестойкости. Следует подчеркнуть, что путем направленного регулирования качественно-количественного состава наполнителей достигается заданная эластичность материала без ущерба для его прочностных показателей.

В исследовательской работе использован гранулированный полиэтилен (ПЭ), характеризующийся дисперсным составом в диапазоне 0,2–0,5 мм. Данный материал демонстрирует исключительно низкую гидрофильность — показатель водопоглощения не превышает 0,02% в течение месячного периода наблюдений. В таблице 1 показаны усредненные характеристики гранул ПЭ.

Таблица 1

Физико-механические свойства гранул

Свойство	Единица измерения	
Предел прочности при натяжении	МПа	8,0–12,0
Предел прочности при изгибе	МПа	12,0–18,0
Удлинение при разрыве	%	600–800
Модуль упругости при натяжении	МПа	150–205
Модуль упругости при изгибе	МПа	140–180
Число твердости по методу Бринелля	МПа	15,0–21,0

В целях оптимизации структурной плотности полимерпесчаной композиции и достижения улучшенных физико-механических характеристик в качестве наполнителя использован кварц-полевошпатовый песок, отличающийся низкими показателями модуля крупности и межзерновой пустотности. Характеристики КППШ песка следующие: насыпная плотность в сухом состоянии 1790 кг/м³, зерновой состав на ситах с размером отверстий, составляет от 0,16 до 2,5% по массе, пустотность — до 29,8%.

Исследование термомеханических характеристик синтезированных материалов осуществлялось с применением динамического механического анализатора DMA 242C (производства компании Netzsch, Германия). Измерения проводились в режиме фиксированной частоты, составляющей 1 Гц. При этом температурный интервал варьировался от 20 до 200 °С, а скорость повышения температуры поддерживалась на уровне 5°/мин.

Определение прочности образцов при разрыве осуществлялось с использованием универсальной испытательной машины Instron 3367 (США) в соответствии со стандартной методикой при заданной скорости перемещения подвижных захватов 200 мм/мин. Данное высокоточное оборудование позволяет получить достоверные результаты механических испытаний исследуемых материалов.

Результаты и обсуждение

Полимер-песчаные композиты (ППК) представляют собой сложно структурированные искусственные материалы, характеризующиеся уникальным комплексом приобретенных свойств, которые существенно отличаются от характеристик исходных компонентов и определяются прежде всего особенностями полимер-

ной составляющей. В ходе исследования была проведена комплексная оптимизация композиционного состава с целью минимизации пористости и достижения оптимальных физико-механических показателей конечного продукта. В качестве модельной системы рассматривались полимер-песчаные композиты, включающие полиэтилен (ПЭ) и песок в следующем массовом соотношении: 10–80 и 20–90% соответственно.

Было определено, что при воздействии механических нагрузок исследуемые композиты с различным содержанием минерального наполнителя сначала деформируются как обычные твердые тела. Деформация обусловлена изменениями валентных углов, длин связей и межмолекулярных расстояний. Область высокоэластичного материала для всех исследуемых образцов мала и при практически постоянной нагрузке наблюдается незначительное удлинение. Деформация материала завершается его разрушением.

Результаты комплексного исследования физико-механических характеристик ППК свидетельствуют о том, что данные композиты демонстрируют значительный уровень прочностных и эксплуатационных показателей, что наглядно отражено в таблице 2. При этом полученные значения физико-механических параметров исследуемых образцов находятся в диапазоне, характерном для высококачественных композиционных материалов данного класса.

Таблица 2

Результаты физико-механических испытаний

Состав ППК, % по массе	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Истираемость, г/см ²
ПЭ/песок (50/50)	1753	10,1	10,3	0,06
ПЭ/песок (75/25)	1764	10,5	12,2	0,07

По данным таблицы видно, что образцы ПЭ/песок (75/25) имеют прочность при изгибе и сжатии выше. Поскольку для удешевления конечного продукта планируется делать изделия достаточно тонкими (0,3–0,5 см), например для формирования волны, то тогда эти пропорции следует изменить. Для определения оптимальных прочностных характеристик, которые удовлетворили бы требования потенциальных потребителей, необходимо варьировать количественное содержание песка в композите ПЭ/песок (60/40, 80/20).

Значения прочности материалов в точке максимальной нагрузки и деформации при растяжении в точке максимальной нагрузки, а также средние значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения прочности материалов

Состав ППК, % по массе	Прочность при растяжении, δ_r , МПа		Деформация при растяжении ϵ , %	
	максимальное значение	среднее значение	максимальное значение	среднее значение
ПЭ/песок (80/20)	14,72	12,82	16,26	14,72
ПЭ/песок (60/40)	12,33	11,34	12,33	11,34

Как следует из данных табл. 4, минимальное значение прочности при растяжении наблюдается у композита состава ПЭ/песок (80/20) и составляет 7,62 МПа. Более высокая температура экструзии ПЭ приводит к частичной термоокислительной деструкции материала и, как следствие, к структурированию макромолекул. Образование межмолекулярных связей повышает прочностные показатели, но приводит к снижению деформации при растяжении.

Эксперименты, проведенные в термокамере при перепаде температур от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$ в течение 8 ч, выявили, что физико-механические и прочностные показатели практически не изменились. Наблюдается значительное падение модуля упругости в температурном интервале от 20 до 150°C . Основываясь на литературных данных [10–11], можно говорить, что релаксационный переход вызван переходом композита состава ПЭ/песок из стеклообразного в высокоэластическое и термопластичное состояние.

Для определения характеристической температуры стеклования изучена температурная зависимость динамического модуля потерь (тангенс угла механических потерь) от модуля упругости $E'(T)$ на примере композита состава ПЭ/песок (80/20). На графике зависимости тангенса угла механических потерь от температуры для композита наблюдается релаксационный максимум, что при $145,6^{\circ}\text{C}$ соответствует стеклованию (сегментальные механические потери).

Анализ температурных зависимостей модуля упругости E' и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ для образцов с различным содержанием минерального наполнителя позволил выявить более высокий уровень исходного модуля упругости (при 20°C более 1300 МПа) для ПНД с 20%-ным содержанием наполнителя.

Повышение количества минерального наполнителя до 40% приводит к снижению модуля упругости ПНД до 1000 МПа. Наиболее низкие значения модуля упругости ($E' = 350$ МПа) наблюдаются у ПВД с 20%-ным содержанием наполнителя. Это объясняется более высоким содержанием кристаллической фазы у ПНД в сравнении с ПВД. С точки зрения морфологии у ПНД твердые и малодеформируемые отдельные кристаллиты пронизаны аморфной фазой, которая придает полимерному материалу определенную эластичность и гибкость, а кристаллическая фаза существенно изменяет эластические свойства окружающей аморфной фазы, придавая полимеру повышенную твердость и упругость.

Эти факты хорошо коррелируют с максимумом тангенса угла механических потерь, определяющим температуру стеклования композитов. Более высокий уровень кристаллической фазы у ПНД повышает температуру стеклования до 145°C (у композита состав — ПНД/песок (80/20)) и $150,3^{\circ}\text{C}$ (у композита состав — ПНД/песок (60/40)). Для композита на основе ПВД с более низкой степенью кристалличности температура стеклования составляет 139°C . Тем не менее температура стеклования всех представленных образцов значительно превышает температурные интервалы, при которых возможна их эксплуатация ($-50 \div +50^{\circ}\text{C}$). В этом случае их деформационно-прочностные свойства не будут зависеть от внешних условий эксплуатации [12].

Внедрение ЭПФТ предоставляет возможность использования отходов полимерной продукции для получения композиционных строительных материалов, что позволит не только сохранить экологию региона за счет уменьшения объемов накопления полимерных отходов в окружающей среде, но и экономить первичное сырьё (прежде всего нефть) и электроэнергию.

Литература

1. Хозин В. Г. Реальные границы и перспективы эффективного применения полимеров в строительстве // Полимеры в строительстве. 2014. № 1(1). С. 9–26. Текст: непосредственный.
2. Weaver A. Composites: World markets and opportunities. *Materials Today*. 1999; 2(1): 3–6.
3. La Mantia F. P. Handbook of Plastics Recycling. Shrewsbury UK: Rapra Technology, 2002. 441 p.
4. Вольфсон В. А. Вторичная переработка полимеров // Высокомолекулярное соединение. 2020. Т. 42, № 11. С. 2000–2014. Текст: непосредственный.
5. Потапова Е. В. Проблема утилизации пластиковых отходов // Известия Байкальского государственного университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 535–544. Текст: непосредственный.
6. Ильина О. В., Колобов М. Ю., Ильинский В. В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 1. С. 42–51. Текст: непосредственный.
7. Белкина И. В. Исследование композитных материалов, полученных с применением вторичных полимеров // Наука и инновационные технологии. 2020. № 1(14). С. 264–277. Текст: непосредственный.
8. Литвинова М. А., Хахинов В. В., Сысуев В. М. Исследование полимерного покрытия, полученного экструзионно-прокатно-формовочным методом // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 4(75). С. 95–100. Текст: непосредственный.
9. Патент РФ 2782067 С2. Способ производства изделий из полимерных отходов экструзионно-прокатно-формовочным методом и установка для его осуществления / В. М. Сысуев, М. А. Литвинова, Г. Б. Итигилов, В. В. Хахинов. Приоритет изобретения 15.02.2021. Текст: непосредственный.
10. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру и характер разрушения в объеме эпоксидных углепластиков в условиях силового воздействия (изгиба и сжатия) / И. С. Деев, Е. В. Куршев, С. Л. Лонский, О. А. Комарова // Вопросы материаловедения. 2018. 4(96). С. 170–184. Текст: непосредственный.
11. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композитных материалов при термовлажном старении / О. В. Старцев, Л. И. Аниховская, А. А. Литвинов, А. С. Кротов // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428, № 1. С. 56–60. Текст: непосредственный.
12. Исследование свойств полимер-песчаных композитов, полученных экструзионно-прокатно-формовочной технологией / М. А. Дабаева, Г. Б. Итигилов, В. М. Сысуев [и др.] // Инженерное дело на Дальнем Востоке России. 2024. С. 469–475. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 17.11.2025.

Use of Extrusion–Rolling–Forming Technology
for Producing New Materials From Secondary Raw Materials

Marianna A. Dabaeva

Lecturer

East Siberia State University of Technology and Management

40v Klyuchevskaya St., 670013 Ulan-Ude, Russia

litvinova-marianna@mail.ru

Vyacheslav V. Khakhinov

Dr. Sci. (Chemistry), Prof.

Dorzhi Banzarov Buryat State University

24a Smolina St., 670000 Ulan-Ude, Russia

khakhinov@mail.ru

Lyudmila V. Myakhanova

Lecturer

East Siberia State University of Technology and Management

40v Klyuchevskaya St., 670013 Ulan-Ude, Russia

miakhanova@mail.ru

Tamara A. Ryzhkova

Lecturer

East Siberia State University of Technology and Management

40v Klyuchevskaya St., 670013 Ulan-Ude, Russia

ryzhk.t@gmail.com

Abstract. The article shows the feasibility of producing composite materials from polymer waste, using polyethylene with the addition of quartz–feldspar sand as a filler. The process involves secondary raw materials from the production cycle that pollute the environment, which is an important factor from an environmental standpoint. An extrusion–rolling–forming (ERF) technology was used to manufacture the composites, significantly increasing productivity compared with existing methods. This technology made it possible to obtain thinner materials that are more resistant to aggressive environments without any loss of physical, mechanical, or strength properties. The resulting composites can subsequently be used in various fields, such as insulating films, waterproofing materials, and similar applications.

Keywords: materials science, composites, polymer waste, polyethylene, extrusion–rolling–forming technology, waste recycling, physical and mechanical properties of composites.

For citation

Dabaeva M. A., Khakhinov. V. V. Miakhanova L. V., Ryzhkova T. A. Use of Extrusion–Rolling–Forming Technology for Producing New Materials from Secondary Raw Materials. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2025; 3: 10–18 (in Russ.).

The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 10.11.2025; accepted for publication 17.11.2025.