

Статья поступила в редакцию: 27.07.2026

Статья принята к публикации: 02.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.7+669.2

Изучение влияния наполнителей на переработку полиуретановых отходов

Шодиев Аслиддин Фахриддин угли

и.о. доц., кафедра агрономии, Навоийский государственный университет горного дела
и технологий

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: shodiyevasliddin22@gmail.com

Мухиддинов Баходир Фахриддинович

д-р хим. наук, проф.

кафедры Химическая технология, Навоийский государственный горно-технологический
университет

Республика Узбекистан, г. Навои

Шокиров Равшан Кахрамонович

базовый докторант

кафедры агрономии, Навоийский государственный университет горного дела и технологий

Республика Узбекистан, г. Навои

Study of the influence of fillers on the processing of polyurethane waste

Shodiev Asliddin Fakhriddin ogli

Acting Associate Professor

Department of Agronomy, Navoi State University of Mining and Technology

Republic of Uzbekistan, Navoi

Mukhiddinov Bahadir Fakhriddinovich

professor

of the Department of Chemical Technology, Navoi State University of Mining and Technology

Republic of Uzbekistan, Navoi

Shokirov Ravshan Kakhramonovich

Basic doctoral student

Department of Agronomy, Navoi State University of Mining and Technology

Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В данной статье исследовано влияние минеральных наполнителей различной природы и концентрации на физико-механические свойства термореактивного полиуретанового материала, полученного при переработке отходов полиуретана. Были изготовлены образцы с различным содержанием минеральных наполнителей и изучено их влияние на плотность,

Библиографическое описание: Шодиев А.Ф.У., Мухиддинов Б.Ф., Шокиров Р.К. Изучение влияния наполнителей на переработку полиуретановых отходов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23247>

относительное удлинение, прочность при растяжении и линейную усадку композиционного материала. В процессе подготовки образцов полиуретановые отходы подвергали термическому плавлению при температуре 110–120 °С. Для получения однородного расплава смесь непрерывно перемешивали на протяжении всего процесса. В полученную гомогенную массу вводили 18 % 4,4'-метилendifенилдиизоцианата, после чего композицию гомогенизировали в течение 3 минут при скорости вращения 1800 об/мин. На данной стадии из расплава удаляли растворённые газы и воздушные пузырьки, что обеспечивало получение однородной и дефектно-свободной структуры материала. В качестве минеральных наполнителей использовали тальк ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), оксид алюминия (Al_2O_3), карбонат кальция (CaCO_3), сульфат бария (BaSO_4), диоксид кремния (SiO_2) и углерод (C). Наполнители вводили в расплав в концентрациях 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0 %. После введения наполнителей композиционную суспензию дополнительно перемешивали при температуре 110–120 °С со скоростью 1800 об/мин в течение 2 минут, после чего заливали в подготовленные формы. Для полученных образцов были определены плотность, прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве и линейная усадка, а также проведена сравнительная оценка влияния типа и концентрации минеральных наполнителей на изменение указанных физико-механических характеристик.

Abstract

This study investigates the effect of mineral fillers with different chemical compositions and concentrations on the physicomaterial properties of thermosetting polyurethane materials obtained through the recycling of polyurethane waste. Samples containing various mineral fillers were prepared, and their influence on the density, elongation at break, tensile strength, and linear shrinkage of the composite material was evaluated. During sample preparation, polyurethane waste was thermally melted at 110–120 °C. To obtain a homogeneous melt, the mixture was continuously stirred throughout the entire process. Subsequently, 18 % of 4,4'-methylenediphenyldiisocyanate was introduced into the homogeneous melt, followed by homogenization at a stirring speed of 1800 rpm for 3 min. At this stage, dissolved gases and entrapped air bubbles were removed from the melt, ensuring the formation of a homogeneous, defect-free material structure. Talc ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), aluminum oxide (Al_2O_3), calcium carbonate (CaCO_3), barium sulfate (BaSO_4), silicon dioxide (SiO_2), and carbon (C) were used as mineral fillers. The fillers were incorporated into the melt at concentrations of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1.0 %. After filler addition, the composite suspension was further mixed at 110–120 °C and 1800 rpm for 2 min, after which it was poured into prepared molds. The density, tensile strength, elongation at break, and linear shrinkage of the obtained samples were determined. Furthermore, a comparative evaluation was carried out to assess the influence of the type and concentration of mineral fillers on the variation of these physicomaterial properties.

Ключевые слова: термореактивный полиуретан, отходы полиуретана, карбонат кальция, оксид алюминия, расплав полимера, минеральные наполнители, модификатор, тальк, 4, 4'-метилendifенилдиизоцианат, реологические свойства, вязкость расплава, полимерные композиты, макромолекулярная структура, сульфат бария, диоксид кремния, углерод.

Keywords: Thermosetting polyurethane, polyurethane waste, calcium carbonate, aluminum oxide, polymer melt, mineral filler, modifier, talc, 4, 4'-methyl enediphenyl diisocyanate (MDI), rheological properties, melt viscosity, polymer composites, macromolecular structure, barium sulfate, silicon dioxide, carbon.

Введение

В последние годы в связи с быстрым ростом объемов производства полиуретановых материалов наблюдается значительное увеличение количества полиуретановых отходов. Особое место среди них занимают термореактивные полиуретаны на основе 4,4'-метилен дифенилдиизоцианата, которые благодаря высокой механической прочности, эластичности, износостойкости и химической стабильности широко применяются в машиностроении, горнодобывающей промышленности, транспорте, строительстве и химической промышленности. Однако вследствие наличия трехмерной пространственной сетчатой структуры макромолекул переработка данных материалов после окончания срока эксплуатации является сложной задачей, в результате чего они относятся к числу основных промышленных отходов, создающих экологические проблемы. В настоящее время широко исследуются механические, химические, гликолизные, аминолизные, гидролизные и термохимические методы переработки полиуретановых отходов на основе МДИ. Среди указанных методов термохимическая переработка отличается относительно низким энергопотреблением, технологической простотой и возможностью сохранения эксплуатационных свойств переработанного материала. Вместе с тем в процессе переработки частичное термоокисление макромолекул полиуретана и деструкция полимерных цепей могут приводить к ухудшению реологических, термических и физико-механических свойств материала [10]. В связи с этим исследование взаимодействия полимерной структуры с различными минеральными наполнителями имеет важное научное и практическое значение. В международных исследованиях последних лет такие минеральные наполнители, как тальк ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), оксид алюминия (Al_2O_3), карбонат кальция (CaCO_3), сульфат бария (BaSO_4), диоксид кремния (SiO_2) и углерод (C), широко изучаются в качестве эффективных модифицирующих компонентов, способных улучшать термическую стабильность, модуль упругости, износостойкость и реологические свойства полиуретановых композитов. Тальк, обладающий слоистой силикатной структурой, регулирует подвижность полимерных цепей, способствует снижению внутренних напряжений и повышению устойчивости материала к термической деформации. Оксид алюминия, благодаря высокой твердости и теплопроводности, способствует повышению микротвердости и улучшению триботехнических свойств композитов. Карбонат кальция, в свою очередь, выполняя функцию дисперсной фазы в полимерной структуре, позволяет повысить жесткость, обеспечить объемную стабильность и снизить себестоимость композитного материала [6, 4]. Эффективность минеральных наполнителей определяется не только их механическим армирующим воздействием, но и степенью диспергирования в полимерной матрице, а также характером межфазного взаимодействия. В связи с этим реологические свойства переработанных полиуретановых композиций, включая основные реологические параметры, являются одними из ключевых факторов, определяющих формуемость полимера,

равномерность распределения наполнителя и структурную целостность конечного продукта. Вместе с тем анализ имеющихся научных публикаций показывает, что влияние наполнителей в низких концентрациях (0,1–1,0 %) на реологические свойства термореактивных полиуретановых отходов на основе МДИ, механизм их диспергирования в процессе термохимической переработки, а также их взаимодействие с макромолекулярной структурой изучены недостаточно. Особый интерес представляет также определение влияния концентрации минеральных наполнителей на такие свойства полимерного расплава, как плотность, прочность при разрыве, относительное удлинение и линейная усадка. Полученные результаты могут служить теоретической и практической основой для разработки вторичных полиуретановых композиций с повышенной износостойкостью, термической стабильностью и энергоэффективностью [1].

Объект исследования. В качестве объектов исследования были выбраны 4,4'-метилendifенилдиизоцианат, используемый в качестве связующего компонента, отходы полиуретана, а также минеральные наполнители: тальк ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), оксид алюминия (Al_2O_3), карбонат кальция (CaCO_3), сульфат бария (BaSO_4), диоксид кремния (SiO_2) и углерод (C). Для проведения процесса переработки использовали специальные реакторы с системой плавления и перемешивания.

Методика исследования

Отходы полиуретана измельчали с использованием специальной дробильной установки до размеров 3×5 мм, после чего промывали и очищали от различных пылевых загрязнений, масел и песчано-глинистых примесей с применением растворителя — дихлорэтана. Затем образцы сушили при температуре 80 ± 2 °С в течение 2 часов [8].

После этого подготовленные образцы помещали в реактор и расплавляли при температуре 110–120 °С. С использованием специального смесителя получали однородный полимерный расплав. Для образования активных центров в макромолекулярных цепях в процессе переработки к общей массе расплава добавляли 18 % 4,4'-метилendifенилдиизоцианата. Полученную смесь гомогенизировали в течение 3 минут при скорости вращения 1800 об/мин.

Каждый минеральный наполнитель вводили в полимерную композицию в количестве 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0 % от массы полимера. После этого определяли значения основных физико-механических характеристик полученных композиций, включая плотность, прочность при разрыве, относительное удлинение и линейную усадку [5].

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования были направлены на оценку влияния минеральных наполнителей на структурные и физико-механические свойства композитных материалов в процессе термохимической переработки термореактивных полиуретановых отходов на основе МДИ. Результаты экспериментов показали, что введение в состав полиуретанового расплава минеральных наполнителей, таких как BaSO_4 , Al_2O_3 , SiO_2 , CaCO_3 , тальк и углерод, в концентрациях 0,1–1,0 % приводит к существенному изменению адгезионных свойств композитов. Установлено, что равномерное распределение частиц наполнителя в полимерной

матрице способствует увеличению плотности композитов. Вместе с тем увеличение концентрации наполнителя приводит к ограничению подвижности функциональных групп, формирующих полимерные цепи, что сопровождается снижением относительного удлинения при разрыве и показателей линейной усадки. Прочность при разрыве при низких концентрациях наполнителя увеличивалась и достигала оптимального значения при концентрации 0,5–0,7 %, тогда как при дальнейшем повышении концентрации наблюдалось ее определенное снижение. Полученный эффект может быть объяснен взаимодействием свободных радикалов, содержащихся в функциональных группах, формирующих основную полимерную цепь, с частицами минеральных наполнителей с образованием элементарно-органических связей. Технологические параметры применения наполнителей при переработке полиуретановых отходов представлены в следующей таблице.

Таблица 1.

Технологические параметры минеральных наполнителей при переработке полиуретановых отходов на основе МДИ

№	Наименование наполнителя	Химическая формула	Размер частиц наполнителя, нм	Температура смешения, °С	Скорость смешения, об/мин
1	Тальк	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	2–10	110–120	1500
2	Оксид алюминия	Al_2O_3	0,5–10		1800
3	Карбонат кальция	$CaCO_3$	1–5		1800
4	Сульфат бария	$BaSO_4$	0,5–5		1500
5	Диоксид кремния	SiO_2	0,5–0,8		1800
6	Углерод	C	0,25–0,54		2000

В таблице приведены основные технологические параметры минеральных наполнителей, использованных для получения переработанных полиуретановых композиций на основе МДИ. Размер частиц наполнителей, температура и скорость смешения обеспечивают их равномерное диспергирование в полимерной структуре и способствуют усилению межфазного взаимодействия с макромолекулярными цепями. В результате существенно улучшаются реологические свойства и эксплуатационная прочность композитного материала.

Таблица 2.

Зависимость свойств переработанных полиуретановых композиций на основе МДИ от концентрации наполнителя

№	Наименование наполнителя	Содержание наполнителя, %	Полиуретановые отходы, %	Связующее — МДИ, %
1	Контрольный образец	Отсутствует	82	18
2	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
3	Al_2O_3	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
4	$CaCO_3$	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
5	$BaSO_4$	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18

№	Наименование наполнителя	Содержание наполнителя, %	Полиуретановые отходы, %	Связующее — МДИ, %
6	SiO ₂	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
7	C	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18

В таблице представлены составы переработанных полиуретановых композиций на основе связующего МДИ при поэтапном увеличении содержания минеральных наполнителей в диапазоне от 0,1 до 1,0 %. Установлено, что изменение концентрации наполнителя оказывает влияние на уплотнение полимерной структуры, равномерность диспергирования частиц, а также на формирование оптимальных реологических и эксплуатационных свойств композиций [7].

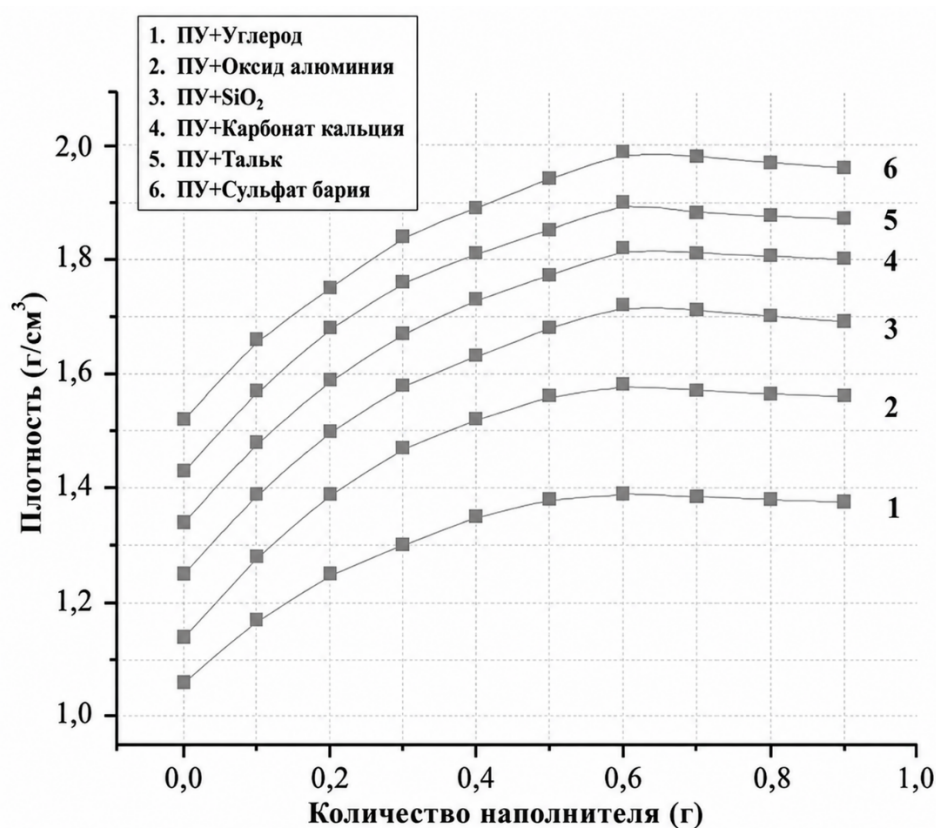


Рисунок 1. Зависимость плотности полиуретана от содержания наполнителя:

На представленном графике показано, что при увеличении содержания таких наполнителей, как углерод (C), диоксид кремния (SiO₂), карбонат кальция (CaCO₃), тальк (Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) и сульфат бария (BaSO₄), в диапазоне 0,1–1,0 % плотность переработанных полиуретановых композиций на основе МДИ последовательно возрастает. Это свидетельствует о равномерном диспергировании минеральных частиц наполнителя в полимерной матрице и усилении межфазной адгезии на границе раздела «полимер–наполнитель» [13]. Установлено, что использование наполнителей в виде сульфата бария и талька позволяет получать композитные материалы с повышенной плотностью.

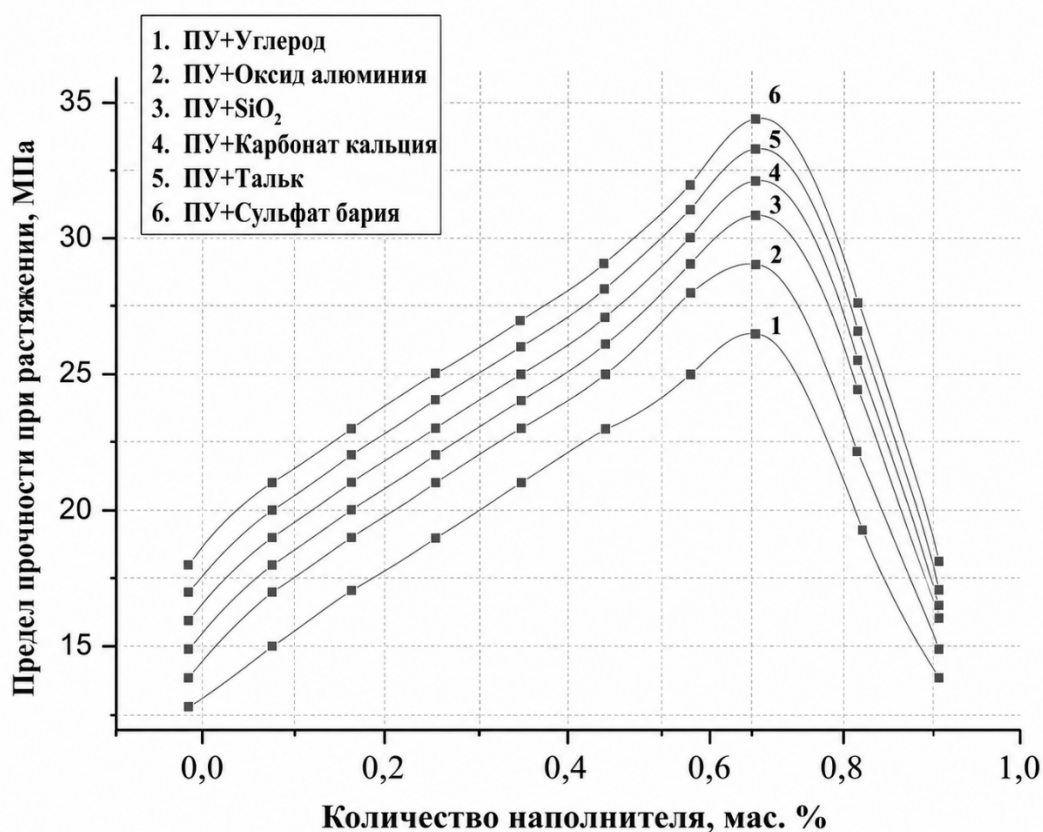


Рисунок 2. Зависимость прочности полиуретана при разрыве от концентрации наполнителя:

На основании полученных результатов установлено, что во всех исследованных образцах с увеличением концентрации наполнителя прочность при разрыве последовательно возрастала и достигала максимального значения при концентрации 0,7 %. При этом образцы, модифицированные BaSO_4 и Al_2O_3 , демонстрировали наиболее высокие показатели прочности. Это может быть обусловлено высокой дисперсностью наполнителей, усилением межфазной адгезии на границе «полимер–наполнитель» и эффективной передачей механических напряжений. Частицы SiO_2 , талька и CaCO_3 , выступая в качестве твердой дисперсной фазы, также способствовали усилению межсегментного взаимодействия и снижению вероятности образования микротрещин [11, 12]. Однако при увеличении концентрации наполнителя в диапазоне от 0,7 до 1,0 % наблюдалось снижение прочности при разрыве. Это, вероятно, связано с чрезмерным уплотнением полимерной структуры, вследствие чего подвижность макромолекул несколько ограничивается.

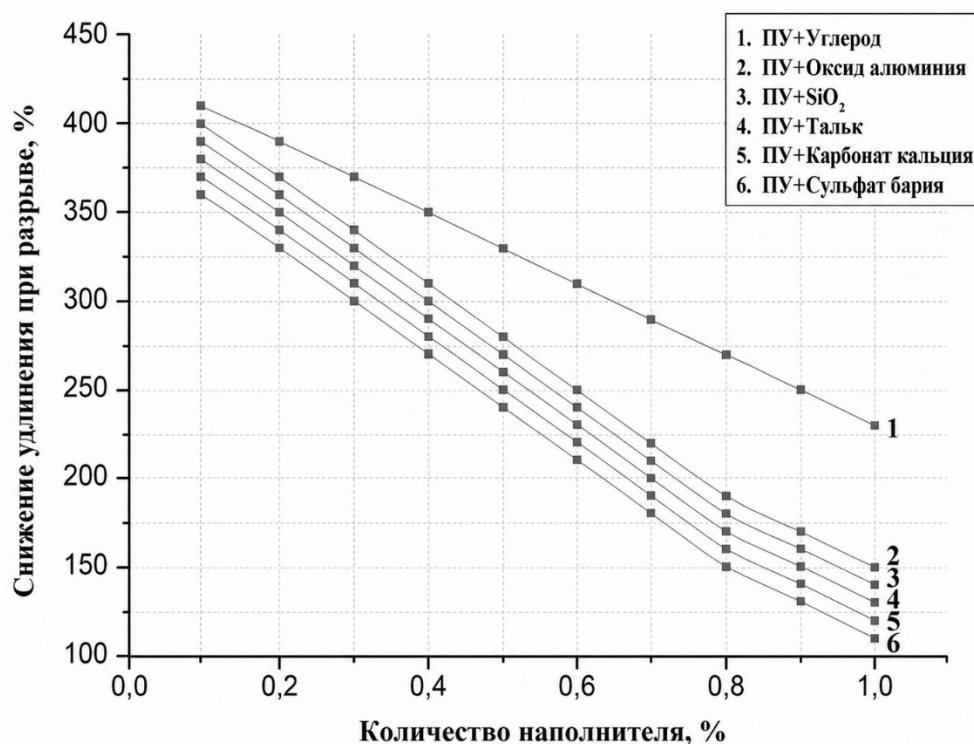


Рисунок 3. Зависимость относительного удлинения полиуретана от содержания наполнителя

При увеличении содержания минеральных наполнителей в диапазоне 0,1–1,0 % наблюдалось последовательное снижение относительного удлинения полиуретановых композиций. Данный эффект может быть объяснен усилением межмолекулярного взаимодействия между частицами наполнителя и полимерными цепями полиуретана, ограничением подвижности макромолекулярных цепей и снижением способности материала к упругой деформации. Неорганические наполнители, такие как BaSO_4 , Al_2O_3 и SiO_2 , за счет повышения жесткости полимерной структуры способствуют более значительному снижению относительного удлинения при разрыве. Вместе с тем установлено, что по сравнению с другими образцами композиции на основе углерода и талька сохраняют относительно более высокую эластичность [3]. При высоких концентрациях наполнителей снижение деформационной способности на межфазных границах приводит к ограничению подвижности полимерных цепей. В результате минеральные наполнители могут способствовать снижению эластических свойств полиуретановых композитов.

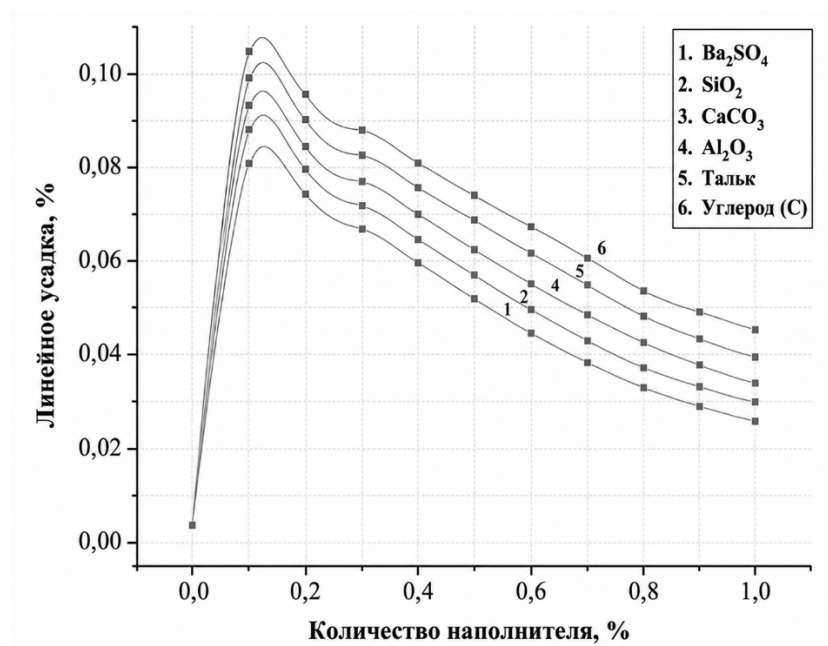


Рисунок 4. Зависимость линейной усадки образцов ПУ от содержания наполнителя

На рисунке представлена зависимость линейной усадки полиуретановых композиций от содержания минерального наполнителя. Линейная усадка рассчитывалась по следующим формулам:

$$S = \frac{L_0 - L_1}{L_1} \times 100$$

где: S — линейная усадка, %; L_0 — первоначальная длина образца, мм; L_1 — длина готового образца после охлаждения, мм.

Из представленных результатов видно, что линейная усадка исследуемых образцов достигает максимального значения при концентрации наполнителя 0,1 %, после чего в диапазоне 0,2–1,0 % постепенно уменьшается. Данный эффект может быть объяснен ограничением подвижности функциональных групп в полимерных цепях под воздействием минеральных частиц и усилением межфазной адгезии. Неорганические наполнители, такие как BaSO₄, SiO₂, CaCO₃ и Al₂O₃, способствуют перераспределению внутренних напряжений в процессе отверждения и снижению объемной деформации. При высоких концентрациях наполнителей в композициях на основе талька и углерода линейная усадка остается относительно низкой, что свидетельствует об их эффективном армирующем воздействии в системе «полимер–наполнитель» [2, 9].

Заключение

В проведенном исследовании в процессе термохимической переработки термореактивных полиуретановых отходов на основе МДИ в качестве минеральных наполнителей были использованы Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂, Al₂O₃, CaCO₃, BaSO₄, SiO₂ и C. Были подготовлены образцы с различным содержанием наполнителей и исследовано влияние их концентрации на физико-механические свойства полученных композитных материалов.

Установлено, что применение выбранных наполнителей в диапазоне концентраций 0,2–1,0 % приводит к увеличению плотности композитного материала с 1,17 до 1,32–1,38 г/см³, снижению линейной усадки с 0,28 до 0,16 мм, а также повышению прочности при разрыве с 18,5 до 31–34 МПа. Повышение прочности при разрыве обусловлено высокой поверхностной энергией и сильным межфазным взаимодействием наполнителей SiO₂ и Al₂O₃ с полимерной матрицей. Установлено, что BaSO₄ обеспечивает наиболее значительное повышение плотности композита — до 1,38 г/см³. Углерод (С), благодаря сохранению относительно высокой подвижности эластичных сегментов, способствует увеличению относительного удлинения с 245 до 305 %. Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ и CaCO₃ регулируют ориентацию полимерных цепей и, наряду с другими минеральными наполнителями, позволяют снизить себестоимость производства композитных материалов. Таким образом, результаты исследования показывают, что использование минеральных наполнителей в процессе термохимической переработки полиуретановых отходов на основе МДИ позволяет целенаправленно регулировать физико-механические свойства вторичных полиуретановых композиций и получать материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Буркин А.Н., Радюк А.Н. Оценка качества подошв обуви, полученных из отходов пенополиуретанов // Союз науки и практики: актуальные проблемы и перспективы развития товароведения. – 2021.
2. Захарян Е.М., Максимов А.Л. Пиролиз полиуретанов. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор) // Журнал прикладной химии, издательство Наука. С.-Петербург. отд-ние (СПб.). – 2022. – Т. 95.
3. Крещик А.А. Использование полиуретановых отходов литейного производства для наполненных противоскользящих напольных покрытий // Инновационная наука. – 2024.
4. Мухиддинов Б.Ф., Шодиев А.Ф. Установки для переработки отходов пластмасс и получение композиции на их основе // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2021.
5. Стородубцева Т.Н., Шакирова О.И. Использование древесных отходов в качестве заполнителя полимерного композита // ББК 35.71+ 35.74 я43 С23. – 2023.
6. Чавуш В., Менгелоглу Ф. Çavuş V., Mengeloğlu F. Effect of the Filler Content on Some Physical and Mechanical Properties of Virgin-and Recycled Thermoplastic Polyurethane Composites // BioResources. – 2024. – Т. 19.
7. Шайдурова Г.И., Васильев И.Л., Шевяков Я.С. Особенности биodeградации промышленных отходов полимеров и перспективы вторичного использования углеродных наполнителей // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. – 2021.
8. Шодиев А.Ф. Изучение влияния количества 4, 4-метилдифенилдиизо цианата при переработке термореактивных полиуретановых отходов // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2023. – Т. 4.

9. Magiera A. Kuźnia M., Jerzak W. Analysis of the Structural, Chemical, and Mechanical Characteristics of Polyurethane Foam Infused with Waste from Thermal Processing // *Materials*. – 2025. – T. 18. – DOI: 10.3390/ma18061327.
10. Ochigüe P.C.D. et al. Upcycling PVC and PET as Volume-Enhancing Functional Fillers for the Development of High-Performance Bio-Based Rigid Polyurethane Foams // *Sustainability*. – 2024. – T. 16, № 19.
11. Polecki K. et al. Polyurethane Recycling: Sustainable Development Perspectives and Innovative Approaches // *Materials*. – 2026. – T. 19.
12. Sapaev I. et al. A Mini-Review on the Studies Done on the Acidification of Carbonate Rock Matrix // *Chemical Methodologies*. – 2025. – T. 9.
13. Selvaraj V.K. et al. Optimized recycling of e-waste and tire rubber into sustainable polyurethane composites with enhanced compressive performance // *Scientific Reports*. – 2026.

References

1. Burkin A.N., Radyuk A.N. [Assessment of the Quality of Shoe Soles Obtained from Polyurethane Foam Waste] // *Soyuz nauki i praktiki: aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya tovarovedeniya*. – 2021. (In Russ.)
2. Zakharyan E.M., Maksimov A.L. [Pyrolysis of Polyurethanes. Process Characteristics and Composition of Reaction Products (Review)] // *Zhurnal prikladnoy khimii, izdatel'stvo Nauka. S.-Peterb. otd-nie (SPb.)*. – 2022. – T. 95. (In Russ.)
3. [Use of Polyurethane Waste from Foundry Production for Filled Non-Slip Floor Coverings] // *Innovatsionnaya nauka*. – 2024. (In Russ.)
4. Mukhiddinov B.F., Shodiev A.F. [Installations for Processing Plastic Waste and Obtaining Compositions Based on Them] // *Journal of Advances in Engineering Technology*. – 2021. (In Russ.)
5. Storodubtseva T.N., Shakirova O.I. [Use of Wood Waste as a Filler for Polymer Composites] // *BBK 35.71+ 35.74 ya43 S23*. – 2023. (In Russ.)
6. Чавуш В., Менгелоглу Ф. Çavuş V., Mengeloğlu F. [Effect of the Filler Content on Some Physical and Mechanical Properties of Virgin-and Recycled Thermoplastic Polyurethane Composites] // *BioResources*. – 2024. – T. 19. (In Russ.)
7. Shajdurova G.I., Vasil'ev I.L., Shevyakov Ya.S. [Characteristics of Biodegradation of Industrial Polymer Waste and Prospects for Secondary Use of Carbon Fillers] // *Materialy i tekhnologii novogo pokoleniya dlya perspektivnykh izdelij aviatsionnoj i kosmicheskoy tekhniki*. – 2021. (In Russ.)
8. [Study of the Effect of 4,4-Methylenediphenyl Diisocyanate Content in the Processing of Thermoset Polyurethane Waste] // *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. – 2023. – T. 4. (In Russ.)
9. Magiera A. Kuźnia M., Jerzak W. Analysis of the Structural, Chemical, and Mechanical Characteristics of Polyurethane Foam Infused with Waste from Thermal Processing // *Materials*. – 2025. – T. 18.

-
10. Ochigüe P.C.D. et al. Upcycling PVC and PET as Volume-Enhancing Functional Fillers for the Development of High-Performance Bio-Based Rigid Polyurethane Foams // Sustainability. – 2024. – Т. 16.
 11. Polecki K. et al. Polyurethane Recycling: Sustainable Development Perspectives and Innovative Approaches // Materials. – 2026. – Т. 19.
 12. Sapaev I. et al. A Mini-Review on the Studies Done on the Acidification of Carbonate Rock Matrix // Chemical Methodologies. – 2025. – Т. 9.
 13. Selvaraj V.K. et al. Optimized recycling of e-waste and tire rubber into sustainable polyurethane composites with enhanced compressive performance // Scientific Reports. – 2026.