

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6923

УДК 691.175

Статья

Биоразлагаемые композиты с полимерной фазой поливинилхлорида и лигноцеллюлозными наполнителями

Шкуро Алексей Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), shkuroae@m.usfeu.ru

Глухих Виктор Владимирович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), gluhihvv@m.usfeu.ru

Кулаженко Юлия Маратовна

аспирантка кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), kulazhenkojuliya@mail.ru

Захаров Павел Сергеевич

аспирант кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), zaharovps@m.usfeu.ru

Получена: 14 марта 2023 / Принята: 11 августа 2023 / Опубликовано: 19 августа 2023

Аннотация: Способом решения проблемы утилизации отходов лесопромышленного и аграрного комплексов, а также пластиковых отходов производства и потребления товарной продукции представляется разработка рецептур новых композиционных материалов и совершенствование технологии их переработки. В связи с этим большой интерес представляют биоразлагаемые композиты с полимерными фазами синтетических и природных полимеров и различными лигноцеллюлозными наполнителями. В настоящей работе были рассмотрены вопросы биоразложения композитов с полимерными фазами

первичного и вторичного поливинилхлорида (ПВХ). В качестве наполнителей были использованы древесная мука, опилки бука, шелуха овса, фитомасса опавших листьев, сено естественных сенокосов. Образцы композитов были получены методами вальцевания и горячего прессования. Степень биоразложения полученных композитов определяли по величине потери массы после выдержки в активном грунте. Максимальное время выдержки образцов в грунте составило 120 суток. В результате исследования установлено, что использование пластификатора (дибутилфталата) позволяет увеличить показатель потери массы за 120 суток выдержки в грунте ненаполненного поливинилхлорида более чем в три раза. Введение в состав ПВХ лигноцеллюлозных наполнителей значительно увеличивает его степень разложения в грунте. Наибольшую степень биоразложения в активированном грунте демонстрируют образцы композитов с наполнителями недревесного происхождения. Для образцов композитов с полимерной фазой первичного ПВХ и шелухой овса потеря массы после выдержки в активированном грунте составляет 10,1 мас. %, с сеном луговых трав — 14,5 мас. %; для образца с полимерной фазой вторичного ПВХ (отходов эксплуатации потолочных панелей) — 24,6 мас. %. Для использованных в работе наполнителей было определено содержание лигнина, целлюлозы, гемицеллюлоз и минеральных веществ. Методом многофакторного регрессионного анализа были установлены закономерности влияния компонентного состава лигноцеллюлозного наполнителя на степень биоразложения компонента в грунте. Показано, что наибольшее влияние на биоразложение композитов с полимерной фазой первичного ПВХ оказывает содержание в наполнителе гемицеллюлоз. При этом увеличение содержания в наполнителе лигнина и целлюлозы приводит к снижению степени биоразложения композита. Влияния минеральных веществ в составе композита на его степень биоразложения не выявлено. Для образцов с полимерной фазой вторичного ПВХ основным фактором, определяющим степень биоразложения в грунте, является содержание в наполнителе гемицеллюлоз. Статистически достоверного влияния содержания лигнина и целлюлозы выявлено не было.

Ключевые слова: биоразложение; лигнин; целлюлоза; отходы; поливинилхлорид; наполнитель; композит

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6923

Article

Biodegradable composites with polyvinyl chloride polymer phase and lignocellulose fillers

Alexey Shkuro

Ph. D. in engineering, associate professor, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), shkuroae@m.usfeu.ru

Viktor Glukhikh

D. Sc. in engineering, professor, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), gluhihvv@m.usfeu.ru

Julia Kulazhenko

Ph. D. student, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), kulazhenkoyuliya@mail.ru

Pavel Zakharov

Ph. D. student, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), zaharovps@m.usfeu.ru

Received: 14 March 2023 / Accepted: 11 August 2023 / Published: 19 August 2023

Abstract: The way to solve the problem of waste disposal from the timber industry and agrarian complexes, as well as plastic waste from the production and consumption of marketable products is to develop compositions of new composite materials and to improve technologies for their processing. Therefore, biodegradable composites with polymer phases of synthetic and natural polymers and various lignocellulosic fillers are of great interest. In the present work, the issues of biodegradation of composites with polymeric phases of primary and recycled polyvinyl chloride (PVC) were considered. Wood flour, beech sawdust, oat husks, biomass of fallen leaves, hay from natural haylands were used as fillers. Samples of composites were obtained by rolling and hot pressing. The degree of the resulting composites biodegradation was determined by the amount of weight loss after seasoning in active (nondormant) soil. The maximum exposure time of the samples in the soil was 120 days. As a result of the study, it was

The authors found that the use of a plasticizer (dibutyl phthalate) allows increasing the mass loss rate of unfilled polyvinyl chloride during its 120-day seasoning in the soil by more than three times. Introduction of lignocellulose fillers into the composition of PVC significantly increased its degree of decomposition in the soil. The highest degree of biodegradation in activated soil was demonstrated by samples of composites with fillers of non-wood origin. For samples of composites with a polymer phase of primary PVC and oat husk, the weight loss after seasoning in activated soil was 10.1 wt. %, with meadow grass hay – 14.5 wt. %; for a sample with a polymer phase of recycled PVC (waste from phased-out ceiling boards) – 24.6 wt. %. For the fillers used in the work, the contents of lignin, cellulose, hemicelluloses, and minerals were determined. Using the method of multivariate regression analysis, regularities were established for the influence of the component composition of lignocellulose filler on the degree of biodegradation of the component in the soil. It is shown that the content of hemicelluloses in the filler had the greatest effect on the biodegradation of composites with a polymer phase of primary PVC. At the same time, an increase in the content of lignin and cellulose in the filler resulted in a decrease in the degree of composite biodegradation. The influence of mineral substances in the composition of the composite on its degree of biodegradation was not revealed. For samples with a polymer phase of recycled PVC, the main factor determining the degree of biodegradation in the soil was the content of hemicelluloses in the filler. No statistically significant effect of lignin and cellulose content was found.

Keywords: biodegradation; lignin; cellulose; waste; polyvinyl chloride; filler; composite

1. Введение

Загрязнение окружающей среды относится к глобальным современным проблемам. Одним из методов решения данного вопроса является рациональное использование природных ресурсов, в т. ч. возобновляемых растительных ресурсов, содержащих целлюлозу и лигнин. Другой метод — использование отходов потребления и производства, в т. ч. лесопромышленного и аграрного, для получения товарной продукции. На сегодняшний день основная доля лигноцеллюлозных отходов используется в качестве топлива. Продукты их сгорания снижают качество атмосферного воздуха. Во многих странах, с целью уменьшения количества образующихся отходов, проводятся научные исследования по получению полимерных композиционных материалов (ПКМ) на их основе.

Согласно данным научных публикаций [1—3], прогнозируется значительный рост коммерческого интереса к производству материалов и изделий из композитов с термопластичными матрицами и лигноцеллюлозными наполнителями. При этом существует и экологический интерес, т. к. для производства композитов с термопластичными матрицами и лигноцеллюлозными наполнителями могут быть использованы отходы термопластичных полимеров (полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида и др.). Кроме того, изделия из них после эксплуатации могут повторно перерабатываться. Промышленность сталкивается с необходимостью переработки различных типов отходов, в т. ч. не только полимерных материалов [4], но и остатков биомассы леса [5] и сельского хозяйства [6]. Использование для производства товарной продукции из таких композитов является одним из наиболее эффективных и экономически целесообразных способов утилизации отходов.

Одним из наиболее перспективных синтетических полимеров с точки зрения использования отходов его эксплуатации для получения полимерных композиционных материалов является поливинилхлорид (ПВХ). По объёмам производства поливинилхлорид занимает третье место среди всех полимерных материалов [7]. Он применяется в электротехнике, упаковке, лёгкой и пищевой промышленности, машино- и судостроении, сельском хозяйстве, медицине и производстве стройматериалов. Широкое распространение во всех областях хозяйства обуславливает большое количество отходов поливинилхлорида, ежегодно накапливающихся на свалках и полигонах. Вторичная переработка поливинилхлорида сопряжена с рядом трудностей, связанных с относительно низкой термической стабильностью материала. При утилизации на свалках или полигонах и, особенно, при сжигании отходы поливинилхлорида могут образовывать токсичные хлорорганические соединения. Поэтому необходим поиск новых методов утилизации отходов ПВХ. Таким способом может стать использование отходов поливинилхлорида для получения композитов с лигноцеллюлозными наполнителями.

Для эффективной переработки отходов необходимо знание закономерностей влияния состава композита и технологических параметров получения изделий из композитов

с полимерной фазой первичного и вторичного ПВХ и лигноцеллюлозными наполнителями на их физико-механические свойства и степень биоразложения в грунте.

Целью настоящего исследования являлось установление закономерностей влияния компонентного состава лигноцеллюлозных наполнителей на физико-механические свойства и степень биоразложения в грунте композитов с полимерной фазой поливинилхлорида.

2. Материалы и методы

В качестве полимерной фазы при получении композитов в работе использованы суспензионный поливинилхлорид марки СИ-67 (ОАО «Саянхимпласт», ГОСТ 14332-78) и отходы эксплуатации потолочных панелей на основе поливинилхлорида, предоставленные ООО «ЭкоПласт-Урал» (г. Екатеринбург). В качестве пластификаторов использован дибутиловый эфир фталевой кислоты (дибутилфталат, ДБФ, ГОСТ 8728-77). Массовое соотношение между поливинилхлоридом и дибутилфталатом во всех опытах составляло 100 : 11 мас. ч.

В качестве наполнителей применялись:

- древесная мука хвойных пород марки 180 (ГОСТ 16361-87);
- мука шелухи овса марки 180 (ТУ 01.11.33-001-04058968-2017);
- фитомасса опавших листьев (представляет смесь листвы различных пород тополя и берёзы, собранную на территории студенческого городка Уральского государственного лесотехнического университета);
- сено трав естественных сенокосов (ООО «Идеал», ОСТ 10243-2000);
- опилки бука (УПМ УГЛТУ, г. Екатеринбург).

Образцы композитов получены смешением компонентов методом вальцевания при температуре 150—160 °С. Стандартные образцы для испытаний изготавливали методом горячего прессования при температуре 160—170 °С и давлении 5 МПа. Рецептуры композитов представлены в таблице 1.

Биодеградация образцов композитов оценивалась по величине потери их массы после экспонирования в активном грунте. Предварительно взвешенные образцы помещались в активный грунт на глубину 2—3 см в горизонтальном положении. После окончания срока выдержки образцы вынимались из грунта, очищались этиловым спиртом и сушились в течение суток при температуре 105 °С. Использовали активный грунт следующего состава: грунт садовый (ГОСТ Р 53381-2009) — 89 об. %, вода дистиллированная — 10 об. %, микробиологический препарат «Тамир» (ТУ 9291-002-70213832-2007) — 1 об. %. В состав препарата «Тамир» входят бактерии *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*, *Saccaromyces cerevisiae*, а также сапрофитные микроорганизмы, ферменты и другие биологически активные вещества, способствующие разложению органических соединений. Микроорганизмы, входящие в состав препарата, не вирулентны, не токсичны и не являются патогенами. Препарат «Тамир» относится к IV классу опасности (малоопасные вещества).

Содержание химических веществ в исследуемых лигноцеллюлозных наполнителях определяли по методикам, приведённым в работе А. В. Вураско и соавт. [8].

Таблица 1. Рецептуры исследованных композитов

Table 1. Compositions of the studied composites

| № опыта | Полимерная матрица | Наполнитель | Содержание компонента, мас. ч. | | |
|---------|--|-------------------|--------------------------------|------|-------------|
| | | | Полимер | ДБФ | Наполнитель |
| 1 | ПВХ СИ-67 | Без наполнителя | 100,0 | 11,0 | 0,0 |
| 2 | | Без наполнителя | 100,0 | 11,0 | 0,0 |
| 3 | | ДМ-180 | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 4 | | Мука шелухи овса | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 5 | | Опилки бука | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 6 | | Опавшие листья | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 7 | | Сено луговых трав | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 8 | Отходы эксплуатации потолочных панелей | Без наполнителя | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 9 | | ДМ-180 | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 10 | | Мука шелухи овса | 100,0 | 11,0 | 111,0 |
| 11 | | Опилки бука | 100,0 | 11,0 | 111,0 |

Экспериментальные данные, полученные в результате проведённых исследований, были обработаны методом многофакторного регрессионного анализа. Для этого использовалась программа «STATISTICA 10.0».

3. Результаты

Результаты определения динамики потери массы образцами композитов после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток для образцов с полимерной фазой поливинилхлорида марки СИ-67 представлены на рисунке 1, для образцов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида (отходов эксплуатации потолочных панелей) — на рисунке 2. Микрофотографии образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида и 50 мас. % измельчённой шелухи до и после выдержки в активированном грунте отражены на фото 1.

Установленный химический состав некоторых использованных в работе лигноцеллюлозных наполнителей приведён в таблице 2.

Для установления закономерностей влияния химического состава наполнителя на степень биоразложения в грунте композитов с полимерными фазами первичного и вторичного ПВХ был проведён регрессионный анализ экспериментальных данных. По результатам регрессионного анализа для доверительной вероятности не менее 0,95 была разработана

экспериментально-статистическая модель влияния компонентного состава наполнителя на потерю массы образцами композита с полимерной фазой поливинилхлорида со степенью наполнения 50 мас. %:

$$Y_1 = 1,91 \cdot Z_1 - 0,14 \cdot Z_2 + 0,35 \cdot Z_3 \quad (R^2=0,99), \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,50 \cdot Z_3 \quad (R^2=0,91), \quad (2)$$

где Y_1 — потеря массы после 120 суток выдержки в активированном грунте образцами композита с полимерной фазой первичного ПВХ СИ-67, %; Y_2 — потеря массы после 120 суток выдержки в активированном грунте образцами композита с полимерной фазой вторичного ПВХ (отходами потолочных панелей), %; Z_1 — содержание целлюлозы в наполнителе, мас. %; Z_2 — содержание лигнина в наполнителе, мас. %; Z_3 — содержание гемицеллюлоз в наполнителе, мас. %.

Графическая интерпретация данных зависимостей представлена на рисунках 3—4.

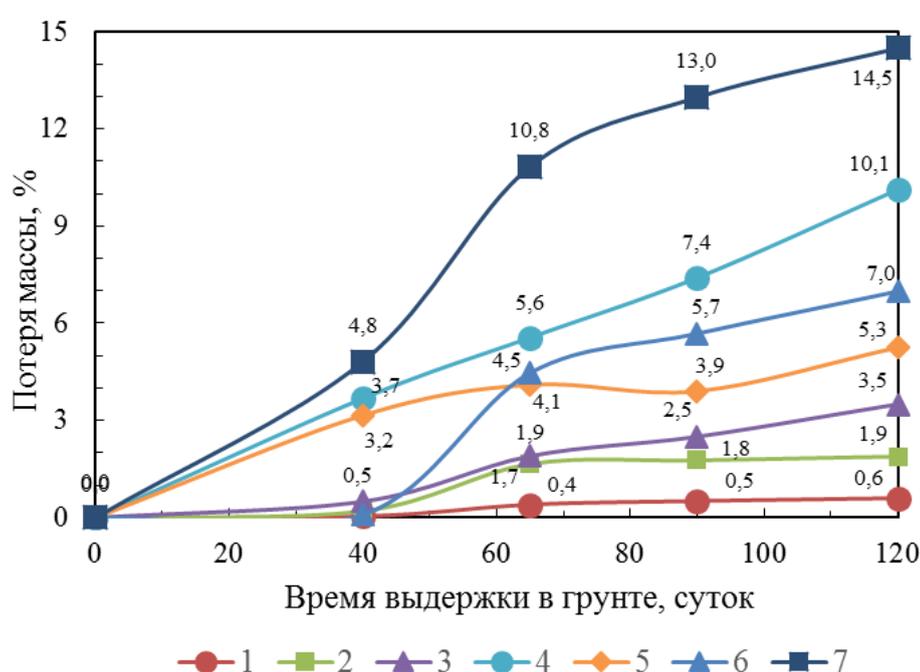


Рисунок 1. Динамика биоразложения образцов композитов с полимерной фазой пластифицированного поливинилхлорида СИ-67

Figure 1. Dynamics of biodegradation of composites samples with a polymer phase of plasticized polyvinyl chloride SI-67

Таблица 2. Химический состав использованных в работе наполнителей

Table 2. Chemical composition of the fillers used in the study

| Наполнитель | Содержание компонента, мас. % | | | |
|---------------------------|-------------------------------|--------|---------------|----------------------|
| | Целлюлоза | Лигнин | Гемицеллюлозы | Минеральные вещества |
| Древесная мука марки 300 | 44,8 | 25,5 | 23,2 | 1,6 |
| Опилки бука | 44,2 | 23,3 | 28,4 | 1,5 |
| Мука шелухи овса (ОМ-180) | 28,2 | 20,2 | 38,8 | 8,9 |
| Фитомасса опавших листьев | 11,2 | 35,2 | 30,8 | 10,5 |
| Сено луговых трав | 27,5 | 14,2 | 46,8 | 4,9 |

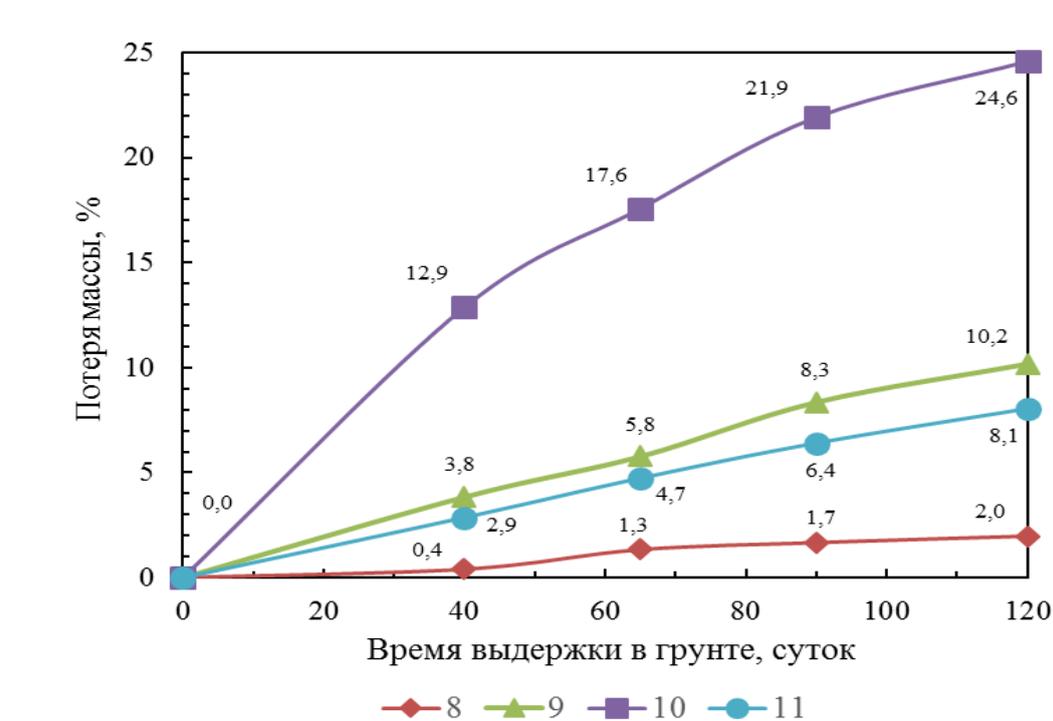


Рисунок 2. Динамика биоразложения образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида

Figure 2. Dynamics of biodegradation of composites samples with a polymer phase of secondary polyvinyl chloride

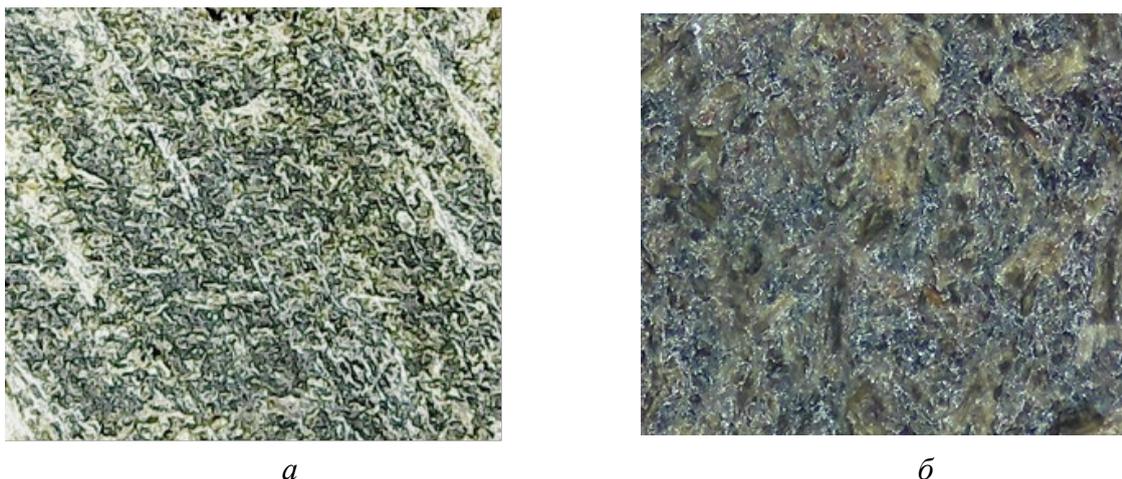


Фото 1. Микрофотографии образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида и 50 мас. % измельчённой шелухи овса при увеличении 100×: *a* — до выдержки в активированном грунте; *б* — после 120 суток выдержки

Photo 1. Micrographs of composites samples with a polymer phase of recycled polyvinyl chloride and 50 wt. % crushed oat husk at 100× magnification: **(a)** before seasoning in activated soil; **(b)** after 120 days of seasoning

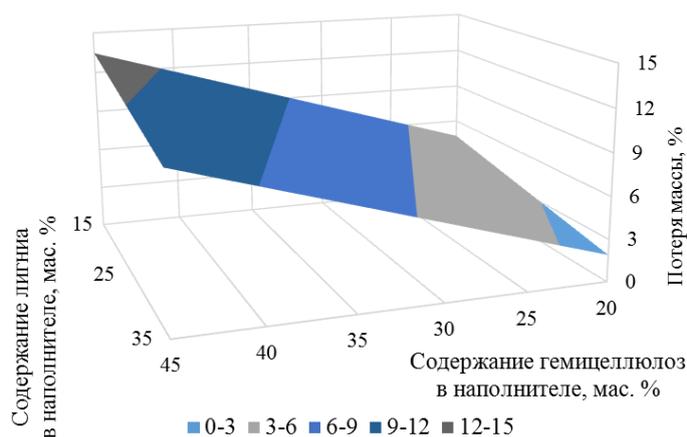


Рисунок 3. Зависимость показателя потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток образцов композитов с полимерной фазой первичного поливинилхлорида от содержания в наполнителе лигнина и гемицеллюлоз при содержании целлюлозы 30 мас. %

Figure 3. Dependence of the weight loss index after seasoning in activated soil for 120 days of composites samples with a polymer phase of primary polyvinyl chloride on the content of lignin and hemicelluloses in the filler at a constant cellulose content of 30 wt. %

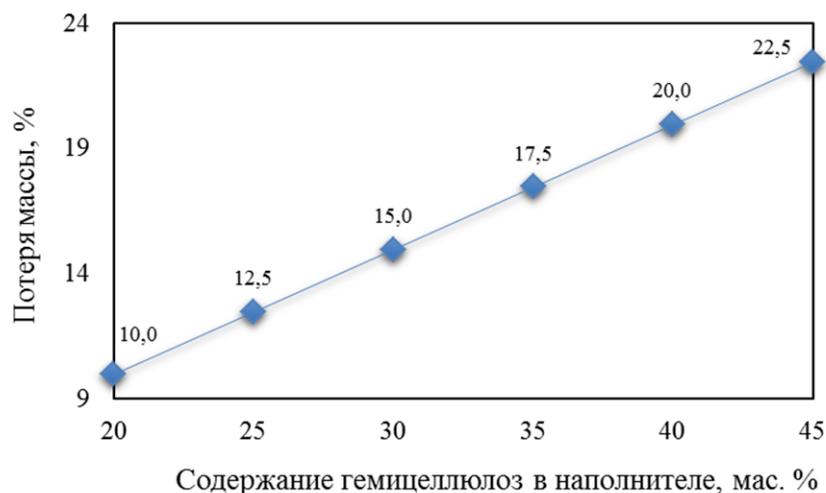


Рисунок 4. Зависимость показателя потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида от содержания гемицеллюлоз в наполнителе

Figure 4. Dependence of the weight loss index after seasoning in activated soil for 120 days of composites samples with a polymer phase of recycled polyvinyl chloride on the content of hemicelluloses in the filler

4. Обсуждение и заключение

Известно, что по сравнению с полиолефинами поливинилхлорид является значительно менее стойким полимером. Он более подвержен термической, окислительной, фото- и биодеструкции. Иллюстрацией последнего утверждения может являться сравнение показателей потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток полиэтилена высокой плотности, первичного поливинилхлорида (см. опыт № 1, рисунок 1) и вторичного поливинилхлорида (см. опыт № 8, рисунок 2), которые соответственно составляют 0,1, 0,6 и 2,0 мас. %.

Пластификация первичного поливинилхлорида с помощью дибутилфталата при массовом соотношении полимер:пластификатор 100:11 (см. опыт № 2, рисунок 1) позволяет увеличить показатель потери массы за 120 суток выдержки более чем в три раза.

Для поливинилхлорида также, как и для полиолефинов, характерен резкий рост показателя потери массы после выдержки в активном грунте, связанный с введением лигноцеллюлозного наполнителя. Наибольшая степень биоразложения в активированном грунте характерна для композитов с наполнителями недревесного происхождения — шелухой овса и измельчённым сеном луговых трав; потеря массы образцами при выдержке в течение 120 суток с этими наполнителями составляет соответственно 10,1 и 14,5 мас. %.

Причинами высокой степени биоразложения данных материалов являются очень высокое содержание гемицеллюлоз (более 40 мас. % в шелухе пшеницы), относительно высокое содержание целлюлозы и относительно низкое содержание лигнина (14,3 мас. % в сене луговых трав). Примечательно, что композиционный материал с полимерной фазой поливинилхлорида и измельчённой фитомассой опавших листьев характеризуется значительно меньшими значениями показателя потери массы, что вызвано, по-видимому, более высоким содержанием лигнина в наполнителе (35,2 мас. %).

Высокие темпы разложения образцов ПКМ с наполнителями недревесного происхождения подтверждаются микрофотографиями их поверхностей до и после выдержки в активированном грунте (см. фото 1). Наименьшую потерю массы после выдержки в активном грунте демонстрируют образцы композитов с наполнителями древесного происхождения — древесной мукой марки 180 (см. опыт № 2, рисунок 1) и опилками бука (см. опыт № 3, рисунок 1).

Для композиционных материалов с полимерной фазой вторичного ПВХ в целом характерны сходные тенденции. Однако вследствие использования в качестве полимерной матрицы предварительно подвергавшегося эксплуатации поливинилхлорида, процессы старения и деструкции композитов идут значительно легче и быстрее. Так, показатель потери массы после 120 суток выдержки для композита с полимерной фазой вторичного ПВХ и 50 мас. % измельчённого сена луговых трав достигает 24,6 мас. %, что является абсолютным максимумом среди всех рассмотренных в работе композитов.

Применение вторичного поливинилхлорида в качестве полимерной фазы для получения биоразлагаемых полимерных композиционных материалов представляется перспективным способом утилизации отходов поливинилхлорида. Применение лигноцеллюлозных наполнителей недревесного происхождения с высоким содержанием целлюлозы и гемицеллюлоз позволяет значительно ускорить процесс биодеструкции таких композитов. В то же время целесообразной представляется оценка фитотоксичности продуктов разложения композитов с полимерной фазой вторичного ПВХ и лигноцеллюлозными наполнителями.

Чтобы установить закономерности влияния химического состава лигноцеллюлозных наполнителей на физико-механические свойства композитов с полимерными фазами ПВХ, была получена серия образцов с наполнителями растительного происхождения, различающимися по содержанию лигнина, целлюлозы, гемицеллюлоз и минеральных веществ (древесная мука, опилки бука, шелуха овса, фитомасса опавших листьев, сено естественных сенокосов).

Установлено, что содержание минеральных веществ в наполнителе не оказывает значимого влияния на показатель потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток. В то же время увеличение содержания целлюлозы и лигнина негативно сказывается на способности материала к биоразложению (см. рисунок 3). В случае лигнина найденная закономерность является подтверждением его известных бактерицидных свойств

[9]. В случае целлюлозы эта зависимость противоречит ранее найденной зависимости для композитов с полимерной фазой ПВХ и наполнителями, полученными смешением крафт-лигнина и микроцеллюлозы [10]. Очевидно, что в биоразложение композитов с полимерной фазой ПВХ наибольший вклад вносит содержание гемицеллюлоз. При этом вклад гемицеллюлоз в биodeградацию композитов с лигноцеллюлозными наполнителями более значителен по сравнению с лигнином и целлюлозой. Поэтому увеличение содержания целлюлозы в наполнителе, означающее снижение содержания гемицеллюлоз, приводит к падению показателя потери массы после выдержки в грунте. При использовании вторичного поливинилхлорида в качестве полимерной фазы композитов с лигноцеллюлозными наполнителями содержание гемицеллюлоз становится единственным фактором, оказывающим статистически значимое влияние на показатель биоразложения после 120 суток выдержки в активированном грунте (см. рисунок 4).

Высоким содержанием гемицеллюлоз объясняется высокая степень биodeградации композитов с наполнителями недревесного происхождения, в частности, мукой шелухи овса и измельчённым сеном луговых трав. Относительно низкую степень биоразложения композита с фитомассой опавших листьев можно объяснить высоким содержанием лигнина в наполнителе.

Нахождение закономерностей влияния компонентного состава лигноцеллюлозных наполнителей на физико-механические свойства композитов является теоретической базой для выбора наполнителя для разработки методики регулирования степени биоразложения, обусловленного конкретной областью применения композита. Получение изделий из композитов с полимерной фазой вторичного ПВХ и лигноцеллюлозными наполнителями представляется важным шагом к решению проблемы утилизации отходов лесопромышленного и аграрного комплексов, а также пластиковых отходов производства и потребления.

Список литературы

1. Review. Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites / A. Vihod, M. R. Sanjay, S. Suchart, P. Jyotishkumar // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 258. P. 1—27. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120978.
2. A literature review on life cycle tools fostering holistic sustainability assessment: An application in biocomposite materials / L. J. Rodriguez, P. Peças, H. Carvalho, C. E. Orrego // *Journal of Environmental Management*. 2020. 262. 110308. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110308.
3. *Feng J., Li S., Peng R.* Effects of fungal decay on properties of mechanical, chemical, and water absorption of wood plastic composites // *Journal Appl. Polym. Sci.* 2020. e50022. DOI: 10.1002/app.50022.
4. *Matlin S. A., Mehta G., Hopf H.* Material circularity and the role of the chemical sciences as a key enabler of a sustainable post-trash age // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2020. Vol. 7. 100312. DOI: 10.1016/j.scp.2020.100312.

5. *Braghiroli F. L., Passarini L.* Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities // *Current Forestry Reports*. 2020. Vol. 6. P. 172—183. DOI: 10.1007/s40725-020-00112-9.
6. *Tajeddin B., Momen R. F.* The effect of wheat straw bleaching on some mechanical properties of wheat straw/LDPE biocomposites // *Journal of Food and Bioprocess Engineering*. 2020. Vol. 3, no. 1. P. 23—28. DOI: 10.22059/JFABE.2020.75620.
7. *Салмерс Д.* Поливинилхлорид. СПб.: Профессия, 2007. 736 с.
8. *Химия растительного сырья: учебное пособие / А. В. Вураско, А. Р. Минакова, А. К. Жвирблите, И. А. Блинова.* Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. 90 с.
9. Lignin-based materials with antioxidant and antimicrobial properties / F. Luzi, W. Yang, P. Ma [et al.] // Elsevier. 2021. P. 291—326. DOI: 10.1016/B978-0-12-820303-3.00003-5.
10. Effect of microcrystalline cellulose content in mixture with kraft lignin on properties of wood-polymer composites / P. S. Zakharov, A. E. Shkuro, V. V. Glukhikh, Y. M. Kulazhenko // *AIP Conference Proceedings*. 2022. 2632. DOI: 020004. 10.1063/5.0098919.

References

1. Vihod A., Sanjay M. R., Suchart S., Jyotishkumar P. Review. Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 258, pp. 1—27. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120978.
2. Rodriguez L. J., Peças P., Carvalho H., Orrego C. E. A literature review on life cycle tools fostering holistic sustainability assessment: An application in biocomposite materials. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262, 110308. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110308.
3. Feng J., Li S., Peng R. Effects of fungal decay on properties of mechanical, chemical, and water absorption of wood plastic composites. *Journal Appl. Polym. Sci.*, 2020, e50022. doi: 10.1002/app.50022.
4. Matlin S. A., Mehta G., Hopf H. Material circularity and the role of the chemical sciences as a key enabler of a sustainable post-trash age. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2020, vol. 7, 100312. doi: 10.1016/j.scp.2020.100312.
5. *Braghiroli F. L., Passarini L.* Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. *Current Forestry Reports*, 2020, vol. 6, pp. 172—183. doi: 10.1007/s40725-020-00112-9.
6. *Tajeddin B., Momen R. F.* The effect of wheat straw bleaching on some mechanical properties of wheat straw/LDPE biocomposites. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 23—28. doi: 10.22059/JFABE.2020.75620.
7. *Salmers D.* *Polyvinylchloride*. Saint Petersburg, Profession, 2007. 736 p. (In Russ.)
8. *Vurasko A. V., Minakova A. R., Zhvirblyte A. K., Blinova I. A.* *Chemistry of plant raw materials: a textbook*. Ekaterinburg, UGLTU, 2013. 90 p. (In Russ.)
9. Luzi F., Yang W., Ma P., Torre L., Puglia D. Lignin-based materials with antioxidant and antimicrobial properties. *Elsevier*, 2021, pp. 291—326. doi: 10.1016/B978-0-12-820303-3.00003-5.
10. Zakharov P. S., Shkuro A. E., Glukhikh V. V., Kulazhenko Y. M. Effect of microcrystalline cellulose content in mixture with kraft lignin on properties of wood-polymer composites. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2632. doi: 020004. 10.1063/5.0098919.