

Влияние ультрафиолетового излучения на физико-механические и структурные характеристики биоразлагаемого полимерного материала на основе полилактида и поли(бутиленадипат-ко-терефталата) при компостном хранении

Д. М. Мясенко, О. Б. Федотова, А. А. Агарков

Всероссийский
научно-исследовательский
институт молочной
промышленности, г. Москва,
Российская Федерация

Корреспонденция:

Дмитрий Михайлович
Мясенко,
E-mail: d_myalenko@vnimi.org

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Финансирование:

Исследования проведены в рамках государственного задания министерства науки и высшего образования Российской Федерации FNSS-2022-0005 «Развитие научных принципов глубокой переработки и обеспечения длительного хранения молочного сырья и продукции с применением малоотходных ресурсосберегающих технологий».

Поступила: 23.06.2023

Принята: 15.12.2023

Опубликована: 30.12.2023

Copyright: © 2023 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение: Использование биоразлагаемой упаковки в качестве альтернативы упаковке из традиционных полимерных материалов, позволит сократить количество синтетических полимеров, что приведет к уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Исследования в этом направлении, в основном, направлены на анализ скорости деградации таких материалов, при этом влияние внешних факторов на разлагаемые пластики, таких как облучение, тепловая или ультразвуковая обработка перед закладкой их на компостное хранение изучена недостаточно.

Цель: Изучение влияния ультрафиолетового (УФ) излучения на изменения физико-механических и морфологических свойств композиции биоразлагаемого композитного материала на основе полилактида (PLA) и поли(бутиленадипат-ко-терефталата) (PBAT) при компостном лабораторном хранении.

Материалы и методы: Объекты исследований — полимерные биоразлагаемые пленки на основе смеси PLA и PBAT. Изменение прочностных показателей проводили по ГОСТ 14236-2017. Размер частиц определяли методом светлого поля на микроскопе Axio Lab. A1 с оптикой Axiosam 105 color. Регистрация ИК-спектров проведена на макромодуле ИК-Фурье спектрометра-микроскопа Bruker Lumos (Германия). Анализ поверхности образцов проведен на растровом электронном микроскопе Vega 3 (Tescan, Чехия).

Результаты: Облучение материала перед помещением в грунт приводит к ускорению процесса деградации: на 23,3 % быстрее уменьшается прочность при разрыве материала и на 70,0 % уменьшается прочность сварных швов. Анализ структуры поверхности материала после 120 суток хранения в компосте показал ее существенные изменения: на поверхности наблюдались многочисленные трещины, уходящие в глубь материала практически по всей поверхности.

Выводы: Полученные данные по изменению структуры поверхности исследуемых образцов после воздействия на них УФ излучения свидетельствуют о динамично протекающих процессах разложения, что создает реальную перспективу минимизации экологических рисков в сегменте охраны окружающей среды, связанной с утилизацией упаковки.

Ключевые слова: биоразлагаемые материалы, деструкция, ультрафиолет, компостирование



Для цитирования: Мясенко, Д.М., Федотова, О.Б., & Агарков, А.А. (2023). Исследование влияния ультрафиолетового излучения на физико-механические и структурные характеристики биоразлагаемого полимерного материала на основе полилактида и поли(бутиленадипат-ко-терефталата) при компостном хранении. *FOOD METAENGINEERING*, 1(4), 28-38. <https://doi.org/10.37442/fme.2023.4.27>

The Ultraviolet Radiation Influence on the Physical-Mechanical and Structural Characteristics of a Biodegradable Polymeric Material Based on Polylactide and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) during Compost Storage

Dmitriy M. Myalenko, Olga B. Fedotova, Aleksandr A. Agarkov

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

Correspondence:

Dmitriy M. Myalenko,
E-mail: d_myalenko@vniimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Foundation:

The research was conducted as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FNSS-2022-0005 "Development of scientific principles for deep processing and long-term storage of dairy raw materials and products using low-waste resource-saving technologies."

Received: 23.06.2023

Accepted: 15.12.2023

Published: 30.12.2023

Copyright: © 2023 The Authors

ABSTRACT

Introduction: The use of biodegradable packaging as an alternative to traditional polymer materials will reduce the amount of synthetic polymers, leading to a decrease in negative environmental impact. Research in this direction is mainly focused on analyzing the rate of degradation of such materials. However, the influence of external factors on degradable plastics, such as radiation, thermal or ultrasonic treatment, before composting storage, is insufficiently studied.

Purpose: To study the impact of ultraviolet (UV) radiation on the changes in the physical-mechanical and morphological properties of a biodegradable compound material based on polylactide (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) during laboratory compost storage.

Materials and Methods: The purpose of the research was biodegradable polymer films based on a mixture of PLA and PBAT. Changes in strength indicators were conducted according to GOST 14236-2017. Particle size was determined by the bright field method on an Axio Lab. A1 microscope with Axiocam 105 color optics. IR spectra registration was performed on a macro module of the IR-Fourier spectrometer-microscope Bruker Lumos (Germany). Surface analysis of the samples was conducted on a Vega 3 scanning electron microscope (Tescan, Czech Republic).

Results: Irradiation of the material before placement in the soil leads to an acceleration of the degradation process: the strength at break of the material decreases by 23.3% faster, and the strength of the welded seams decreases by 70.0%. The analysis of the surface structure of the material after 120 days of storage in compost showed significant changes: numerous cracks were observed on the surface, extending deep into the material almost across the entire surface.

Conclusion: The obtained data on the change in the surface structure of the samples after exposure to UV radiation indicates dynamically occurring decomposition processes, creating a real perspective for minimizing environmental risks in the segment of environmental protection related to packaging disposal.

Keywords: biodegradable materials, destruction, ultraviolet, composting



To cite: Myalenko, D.M., Fedotova, O.B., & Agarkov, A.A. (2023). The ultraviolet radiation influence on the physical-mechanical and structural characteristics of a biodegradable polymeric material based on Polylactide and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) during compost storage. *FOOD METAENGINEERING*, 1(4), 28-38. <https://doi.org/10.37442/fme.2023.4.27>

ВВЕДЕНИЕ

Темпы производства и применения полимерной упаковки в различных областях промышленности сопровождаются серьезной проблемой правильной переработки и утилизации большого скопления полимерных отходов, которые образуются после окончания жизненного цикла упакованной продукции и оказывают негативное влияние на окружающую среду¹. Среди основных подходов, способных минимизировать образование большого количества отходов, можно выделить: освоение и совершенствование малоотходных технологий производства², применение биологически разлагаемых материалов и композиций на их основе³, модернизация процессов сбора, сортировки и переработки отходов, использование отходов полимерного производства как вторичного сырья для переработки и пр. (Reichert et al., 2020). Наиболее активно развивается направление создания и использования биоразлагаемых полимеров, которые быстро деградируют под воздействием факторов окружающей среды и микроорганизмов (Jian et al., 2020).

Разработкой биоразлагаемых упаковочных материалов для продуктов питания занимаются ученые всего мира (Van Velzen, 2016; Гарифулина и соавт., 2019; Ольхов, 2015; Саликов, 2014), однако идеального решения указанной проблемы пока нет. Для молочной промышленности ситуация с упаковкой является еще более острой (Кобзева & Юрова, 2016; Кручинин 2023; Пряничникова 2020а). Молоко — это живая сложносоставная система с различной кислотностью (Радаева и соавт., 2019; Юрова, 2019, 2020) и комплексом биохимических свойств, которые в процессе хранения могут оказывать негативное влияние на сохранность продукта в биоразлагаемых композициях (Van Velzen, 2016) (Ailes & Abigail, 2013; Brdlík, 2022; Kiruthika, 2022; van den Oever & Molenveld, 2017; Пряничникова, 2020b). Поэтому для сохранности продукции на всем ее жизненном цикле к упаковочным материалам применяются требования к ряду физико-химических, микробиологических, санитарно-гигиенических и эксплуатационных характеристик, способных

существенно ограничить применение биополимеров в качестве пищевой упаковки.

Среди самых распространенных на данный момент коммерческих биополимеров можно выделить: полимолочная кислота (PLA), полибутиленсукцинат (PBS), полибутиленсукцинат адипат (PBSA), полигидроксикарбоксилаты (PHA), поли(бутиленадипат-ко-терефталат) (PBAT), полигидроксипропанат-со-гидроксивалерат (PHBV). Существуют и их различные компаунды на их основе (Ailes & 2013; Brdlík, 2022; Kiruthika, 2022; van den Oever & Molenveld, 2017). Введение различных функциональных компонентов в полимерную основу может служить дополнительными факторами риска при обеспечении качества и безопасности упакованной продукции (Barron & Sparks, 2020; Dilkes-Hoffman et al., 2019; Lunt, 1998; Puchalski et al., 2018). Это особенно актуально для продукции функциональной направленности и детского питания (Barron & Sparks, 2020; Ponjavic et al., 2023; Puchalski et al., 2018; Пряничникова, 2020b). Придание функциональных свойств полимерным пленкам, предназначенным для пищевой упаковки, позволит снизить риски повторного обсеменения в процессе упаковывания (Фильчакова, 2008; Фильчакова, 2008), а также сохранить продукцию на всем ее жизненном цикле.

Важную роль в механизме биоразложения играют факторы окружающей среды — внешнего физического, термического, фотометрического воздействия (Van Velzen, 2016). Так, например, на скорость деградации PLA оказывает существенное влияние повышенная температура в пределах 50–70 °C, которую не всегда удаётся соблюдать в условиях бытового компостирования. Процесс термодеструкции можно выразить аналитически с использованием уравнения Аррениуса, которое учитывает влияние теплового воздействия на скорость распада полимерных связей (Kalita et al., 2020; Weng et al., 2013). Воздействие высоких температур на PLA запускает процессы термохимической деструкции с разрушением связей, которые достигают равновесного значения. Воздействие на полимер УФ облучения может ускорить его старение за счет изменения микроструктуры в виде разрыва цепи (Gewert et al., 2018; Lee et al., 2014) и сшивания (Dobrov et al., 1989; Lee et al., 2014;

¹ Take Action for the Sustainable Development Goals — United Nations Sustainable Development. (n.d.). Retrieved May 11, 2022, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

² Impact through research: applied research for Europe's future. (n.d.). Retrieved May 11, 2022, from <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2018/november/the-rto-summit.html>

³ European Bioplastics EV. (2018). *European bioplastic. The Plastics Strategy — the contribution of bioplastics to a sustainable plastics circular economy.*

Д. М. Мяленко, О. Б. Федотова, А. А. Агарков

Miranda et al., 2001; Oster et al., 1959). Например, молекулярные массы полиэтилена (ПЭ), полистирола (ПС) и полиметилметакрилата (ПММА) уменьшаются после УФ облучения, что приводит к потере его механической прочности (Yousif & Haddad, 2013) produces free radical and reduces the molecular weight, causing deterioration of mechanical properties and leading to useless materials, after an unpredictable time. Polystyrene (PS. В основе старения полимеров, вызванного УФ-излучением, лежит фотоокислительная деградация, приводящая к образованию свободных радикалов (Yousif, 2013; Заиков, 2000).

Вопросы влияния облучения на полимерные композиции изучены довольно глубоко (Tertyshnaya & Podzorova, 2020; Заиков, 2000), в то время как механизмы разрушения биополимеров при воздействии УФ излучения рассмотрены недостаточно. Gardette (2011) рассмотрел два механизма фотодегradации PLA. Один из них включает расщепление цепи и образование двойных углерод-углеродных связей (СС двойная связь) и гидропероксидной группы (О–О–Н) на вновь образованных концах цепи. Другой механизм основан на радикальном окислении с образованием ангидридов и гидропероксидов (Bocchi et al., 2010; Janorkar et al., 2007).

Цель данной статьи: описать влияние УФ излучения на физико-механические и структурные характеристики биоразлагаемого полимерного материала на основе полилактида и поли(бутиленадипат-ко-терефталата) при компостном хранении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В работе в качестве объектов исследований были выбраны полимерные биоразлагаемые пленки на основе смеси PLA и PBAT (CO—PLAS Bio 1002) ООО «Евротек» (Россия). Данная композиция представляет разработанный в соответствии с ГОСТ EN 13432–2015¹ (IDT EN 13432:2000) биополимерный компаунд с высокой термостабильностью, прочностью и газопроницаемостью. Толщина биоразлагаемой пленки составляла 20 мкм. Биополимерный компаунд CO—PLAS Bio 1002 перерабатывается на стандартных пленочных экструдерах с раздувом и формующей головкой для производства

пленки LDPE. Температура переработки составляет 140–165 °С. Режимы переработки данного компаунда совпадают с рекомендуемыми температурами экструзии полиэтилена, что позволяет перерабатывать биоразлагаемый материал на традиционном оборудовании без существенных изменений технологических параметров.

Оборудование и процедура исследования

Подготовка компоста осуществлялась в лабораторных условиях с использованием почвенной смеси, содержащей азот (не менее 230 мг/л), фосфор (не менее 300 мг/л), калий (не менее 350 мг/л) и ускоритель компостобразования, в состав которых входят не менее 30 % пшеничных отрубей, 5 % натрия двууглекислого и почвенные микроорганизмы. Температурные условия эксперимента составляли 20 ± 2 °С, влажность 65–80 %.

Облучение поверхности материала проводили на экспериментальном макетном стенде непосредственно перед закладкой на компостное хранение. В качестве источника излучения была использована бактерицидная лампа TUV 15W/G 15 T8 LONG LIFE фирмы Philips (Голландия). Нами был выбран режим облучения: расстояние от лампы до поверхности материала 15 см, длительность облучения 24 часа.

В качестве контролируемых физико-механических показателей были выбраны прочность при разрыве (МПа) и относительное удлинение при разрыве (%). Испытания проводили на универсальной испытательной машине Shimadzu EZ-LX (Япония) в двух направлениях: продольном и поперечном по ГОСТ 14236–2017 (ISO 527–2:2012). Максимальная мощность установленного датчика силы составляет 2000Н, длина хода траверсы составляет 920 мм. Для проведения расчетов применялось профессиональное программное обеспечение «TRAPEZIUM X» (Shimadzu Япония). Количество проведенных серий эксперимента: — 3; количество повторностей в серии — 10.

Анализ поверхности биоразлагаемых пленок до и после компостирования проводили на растровом электронном микроскопе Vega 3 (Tescan, Чехия) (SEM) Перед исследованием образцы покрывали платиной толщиной ~ 20 нм.

¹ ГОСТ EN 13432–2015 — Упаковка. Требования к использованию упаковки посредством компостирования и биологического разложения. Проверочная схема и критерии оценки для распределения упаковок по категориям.

Д. М. Мяленко, О. Б. Федотова, А. А. Агарков

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Визуальная оценка внешнего вида

Внешний вид образцов до и после облучения представлен на Рисунке 1. Образцы биоразлагаемых пленок на основе PLA и PBAT до облучения имеют гладкую, матовую поверхность, полупрозрачные, без блеска. Образец после облучения УФ в течении 24 часов визуально дефектов не имеет, сохраняется эластичность. Облученные материалы имеют более выраженные физические дефекты: поверхность рыхлая, шершавая, наблюдаются в большом количестве разрывы материала. При срав-

нении с необлучённым образцом отмечается повышенная хрупкость. Образцы, не подвергнутые облучению, после 120 суток компостного хранения, стали более мутными и шероховатыми. На поверхности заметны проколы и трещины, приводящие к ухудшению прочностных показателей.

Физико-механические исследования

Оценку влияния УФ-излучения на динамику протекания деструктивных процессов биоразлагаемой пленки на основе PLA/PBAT в компосте проводили по изменению физико-механических показателей (δ , МПа и ϵ , %). Результаты представлены на Рисунках 2, 3 и 4.

Рисунок 1

Визуальное исследование поверхности образцов до и после облучения

Пленка PLA/PBAT до компостирования



Пленка PLA/PBAT после 120 суток



Пленка PLA/PBAT УФ облученная до компостирования



Пленка PLA/PBAT УФ облученная после 120 дней компостирования



Рисунок 2

Динамика изменения прочности при разрыве образцов пленки PLA/PBAT при компостном хранении в течение 120 суток

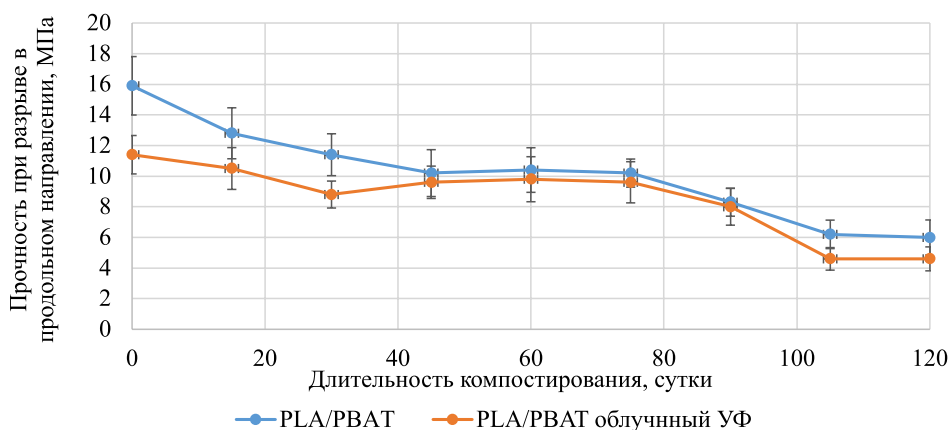


Рисунок 3

Динамика изменения относительного удлинения при разрыве образцов пленки PLA/PBAT при компостном хранении в течение 120 суток

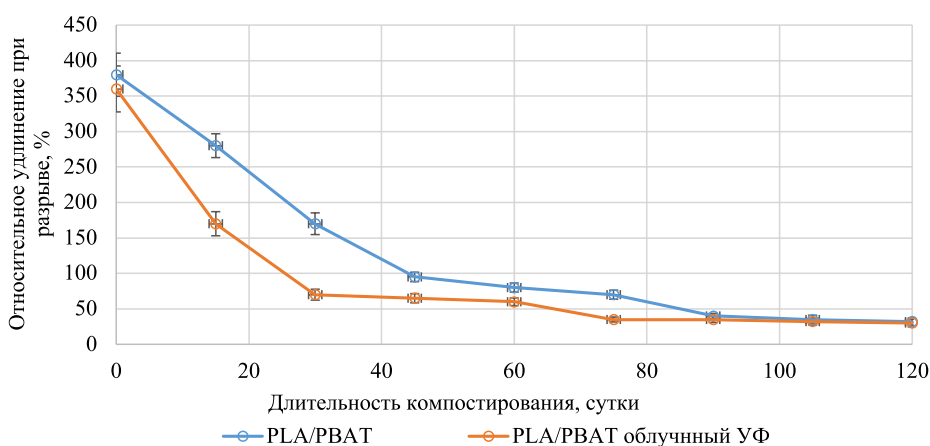
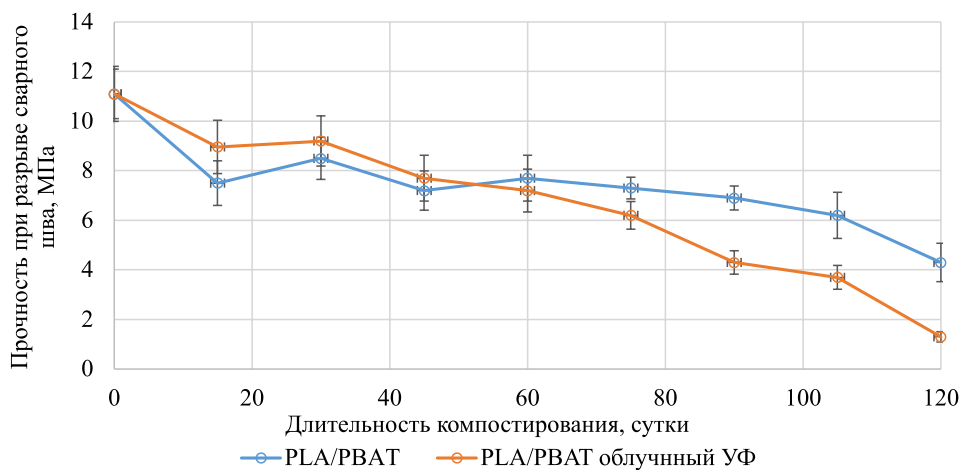


Рисунок 4

Динамика изменения прочности при разрыве сварного шва образцов PLA/PBAT



Д. М. Мяленко, О. Б. Федотова, А. А. Агарков

Анализ полученных результатов показал, что характер изменения прочностных показателей у облученных и необлученных материалов уменьшается за 120 суток компостного хранения на 60,4–62,3% по сравнению с начальным контрольным измерением перед закладкой на хранение.

Относительное удлинение при разрыве облученных и необлученных материалов меняется очень резко. Уже к 30 суткам хранения происходит уменьшение показателя в 2,2 раза у необлученной пленки и в 5,4 раза у образцов после облучения. Как видно из представленных на рисунке данных, после резкого падения показателя «относительное удлинение при разрыве, %» наблюдается некоторая стабилизация. Dammak et al. (2020), Kalita et al. (2020), Aversa et al. (2022), Weng et al. (2013) и Wang et al. (2022) отметили аналогичный эффект, который связали с тем, что под воздействием почвенных микроорганизмов при компостировании процесс разрушения макромолекул PLA протекает с образованием цепочек одинакового размера. Начиная с 45 суток компостирования, наблюдается так называемое равновесие, при котором разложение материала протекает относительно медленно.

Gardette et al. (2011) наблюдали быстрое снижение поглощения УФ-облученного PLA между 250 и 400 нм в течение

первых 20 часов УФ-облучения. Это объясняется разрывами цепей PLA, активированными фотоокислением и, как следствие, падением прочностных характеристик.

Прочностные характеристики сварных соединений изменяются по аналогичной с прочностью материала закономерностью. После 60 суток компостного хранения у всех образцов наблюдается падение прочности сварного шва и к концу 120 суток она составляет 2,6 раза для необлученных образцов и 8,5 раз для образцов после обработки УФ излучением.

На 90 сутки у облученного образца PLA/PBAT наблюдали резкое падение показателя прочности сварного шва, что коррелирует с полученными данными о прочности материала.

Структурно-морфологические исследования

Для оценки изменений поверхности опытных образцов биоразлагаемых материалов после выдержки в компосте были проведены структурно-морфологические исследования. Результаты исследований поверхности материала состава PLA/PBAT без облучения и после воздействия УФ — излучения представлены на Рисунках 5–6.

Рисунок 5

Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности пленки состава PLA/PBAT до помещения в компост; (а) без УФ облучения; (б) после УФ облучения

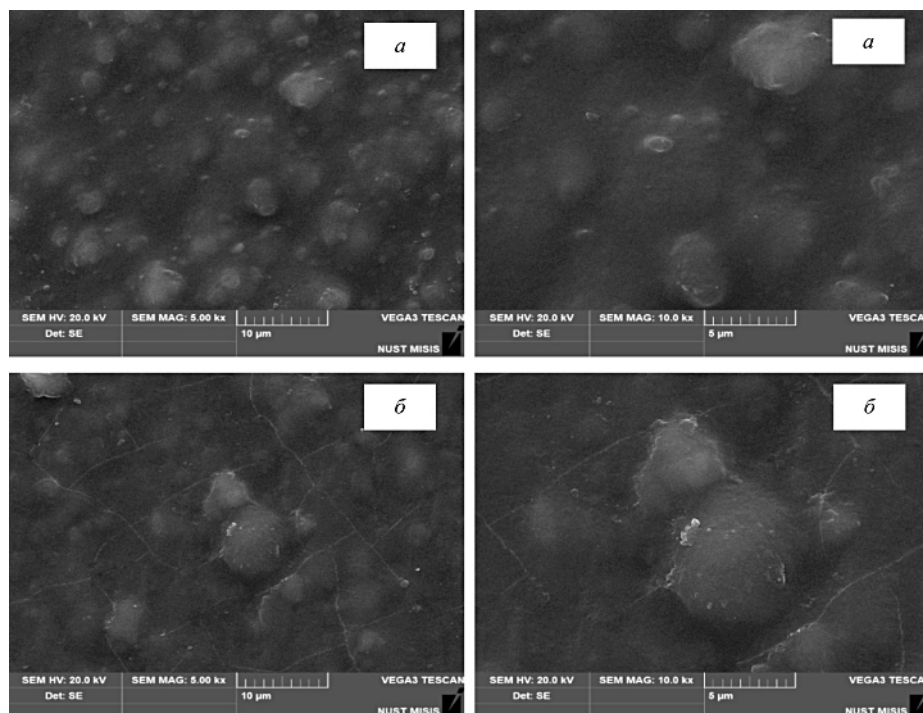
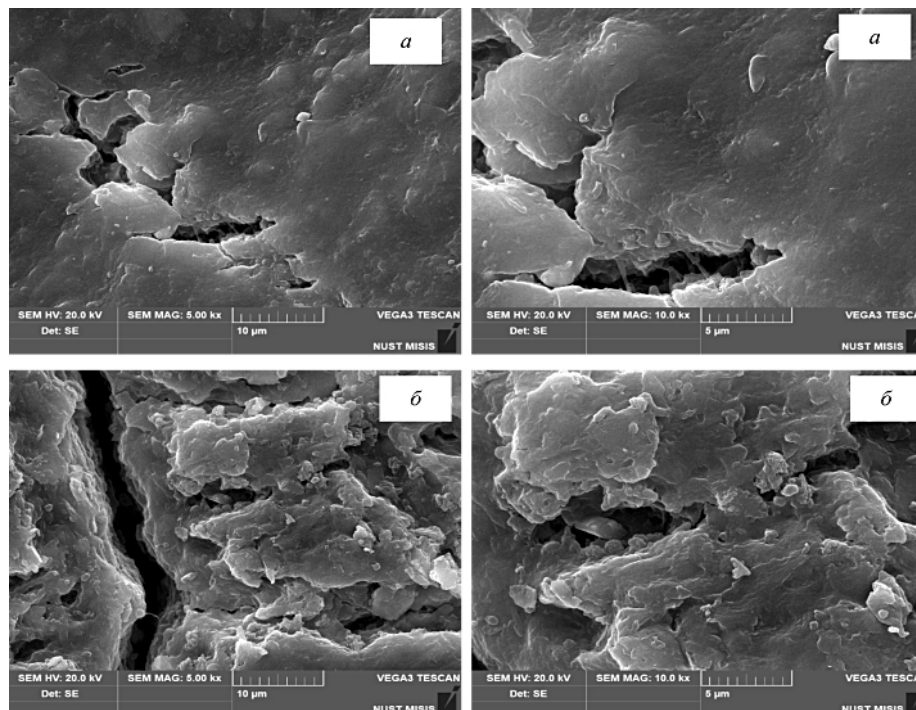


Рисунок 6

Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности пленки состава PLA/PBAT после 4 месяцев в компосте: (а) без УФ-облучения; (б) после УФ-облучения



Анализ поверхности материала свидетельствует о значительных изменениях в его структуре после хранения в компосте в течение 4 месяцев. Исследованные опытные биоразлагаемые пленки представляют собой смешанной неоднородный композит.

Структурные исследования, проведенные перед закладкой на компостное хранение, показали, что с увеличением кратности изображения на поверхности заметны микротрещины, не уходящие в глубь материала и не влияющие на прочностные характеристики, что подтверждается результатами физико-механических испытаний. Аналогичная картина наблюдается при исследовании SEM поверхности материала после обработки УФ излучением. Существенных изменений в структуре поверхностных слоев не наблюдается.

После хранения образцов в компосте в течение 4 месяцев заметны существенные изменения. На поверхности материала до и после обработки УФ излучением наблюдаются многочисленные трещины, уходящие вглубь материала. Трещины имеют мицеллярную структуру, что объясняется разнородным составом материала. Со-

гласно литературным данным PLA начинает активно разрушаться при повышенной влажности и температуре более 50 °С, тогда как PBAT начинает разрушаться при более низких температурах (Aversa et al., 2022; Kalita et al., 2020; Weng et al., 2013). При увеличении в 5000 раз на поверхности материала заметны углубления и рытвины, которые как раз и свидетельствуют о различной скорости разрушения компонентов, входящих в состав пленки. Полученные данные хорошо коррелируют с результатами физико-механических испытаний и с данными ученых проводивших похожие исследования (Janczak, 2020; Weng, 2013). В зависимости от условий компостирования и состава полимерного материала динамика биodeградации отличается, но общая тенденция сохраняется (Janczak 2020; Kale et al., 2007).

Анализ полученных результатов за 120 суток хранения образцов в компосте показывает перспективность его применения в качестве биоразлагаемой упаковки.

Д. М. Мясенко, О. Б. Федотова, А. А. Агарков

ВЫВОДЫ

УФ облучение материала перед помещением в грунт приводит к ускорению процесса деградации биоразлагаемой пленки PLA/PBAT по сравнению с необлученным материалом: на 23,3 % быстрее уменьшается прочность при разрыве материала и на 70,0 % уменьшается прочность сварных швов.

Результаты исследований поверхности материала методом сканирующей электронной микроскопии поверхности материала после 120 суток хранения в компосте показали существенные изменения: на поверхности биоразлагаемых пленок наблюдались многочисленные трещины, уходящие в глубь материала практически по всей поверхности. Полученные данные хорошо коррелируют с результатами физико-механических испытаний. Показано, что полимеры, входящие в состав исследованного компаунда, разлагаются с разной скоростью, тем не менее, суммарный эффект свидетельствует об ускоренной биodeградации материала в том числе усиливающийся при УФ облучении.

Полученные результаты комплексных физико-механических испытаний полимерной биоразлагаемой пленки показывают ее перспективность для применения в качестве альтернативной полимерной упаковки для мо-

лочной и пищевой продукции с небольшими сроками хранения, а способность PLA/PBAT к биodeградации в условиях окружающей среды позволит существенно улучшить экологическую обстановку в России.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Мясенко Дмитрий Михайлович: формулирование идеи, формулирование исследовательских целей и задач, проведение исследовательского процесса, в частности, проведение экспериментов или сбор данных/доказательств, подготовка и создание черновика рукописи, в частности, написание первоначального текста рукописи, подготовка и создание рукописи, её комментирование или пересмотр, включая этапы до или после публикации рукописи.

Федотова Ольга Борисовна: формулирование идеи, формулирование исследовательских целей и задач, надзор и руководство за планированием и выполнением исследовательской деятельности, включая наставничество.

Агарков Александр Александрович: проведение исследовательского процесса, в частности, проведение экспериментов или сбор данных/доказательств, визуализация/представление данных.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Гарифулина, Л.И., Ли, Н. И., Гарипов, Р. М., & Миннахметова, А. К. (2019). Биоразложение полимерных пленочных материалов (обзор). *Вестник Технологического Университета*, 22(1), 47–53.
- Garifulina, L.I., Li, N. I., Garipov, R. M., & Minnakhmetova, A. K. (2019). Biodegradation of polymer film materials (review). *Bulletin of the Technological University*, 22(1), 47–53. (In Russ.)
- Заиков, Г.Е. (2000). Почему стареют полимеры. *Соросовский образовательный журнал*, 12, 48–55.
- Zaikov, G.E. (2000). Why polymers age. *Soros Educational Journal*, 12, 48–55. (In Russ.)
- Кобзева, Т.В., & Юрова, Е. А. (2016). Оценка показателей качества и идентификационных характеристик сухого молока. *Молочная промышленность*, 3, 32–35.
- Kobzeva, T.V., Yurova, E. A. (2016). Evaluation of quality indicators and identification characteristics of dry milk. *Dairy Industry*, 3, 32–35. (In Russ.)
- Кручинин, А.Г., Илларионова, Е.Е., Туровская, С.Н., & Бигаева, А. В. (2023). Исследование влияния белкового профиля на структурно-механические параметры молочных биосистем с промежуточной влажностью. *Food Processing Industry*, 1, 59–62. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.1.1.017>
- Kruchinin, A.G., Illarionova, E.E., Turovskaya, S.N., & Bigaeva, A. V. (2023). Study of the influence of the protein profile on the structural-mechanical parameters of dairy biosystems with intermediate moisture. *Food Processing Industry*, 1, 59–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.1.1.017>
- Ольхов, А.А. (2015). Перспективные биоматериалы на основе полигидроксibuтирата и двойного этиленпропиленового сополимера для транспорта физиологических сред: фазовая структура. *Перспективные материалы*, 10, 56–63.
- Olkhov, A.A. (2015). Prospective biomaterials based on polyhydroxybutyrate and the double ethylene-propylene copolymer for the transport of physiological media: Phase structure. *Advanced Materials*, 10, 56–63. (In Russ.)

- Пряничникова, Н.С. (2020а). Защитные покрытия для пищевых продуктов. Современные достижения биотехнологии. Техника, технологии и упаковка для реализации инновационных проектов на предприятиях пищевой и биотехнологической промышленности (том 2, с. 86–89). Пятигорск.
- Pryanichnikova, N.S. (2020a). Protective coatings for food products. Modern achievements in biotechnology. Techniques, technologies and packaging for the implementation of innovative projects in the food and biotechnology industries (vol. 2, pp. 86–89). Pyatigorsk. (In Russ.)
- Пряничникова, Н.С. (2020b). Съедобная упаковка: транспорт для функциональных и биоактивных соединений. *Молочная Река*, 4(80), 32–34.
- Pryanichnikova, N.S. (2020b). Edible packaging: Transport for functional and bioactive compounds. *Dairy River*, 4(80), 32–34. (In Russ.)
- Радаева, И.А., Радаева, И. А., Илларионова, Е. Е., Туровская, С. Н., Рябова, А. Е., & Галстян, А. Г. (2019). Принципы обеспечения качества отечественного сухого молока. *Пищевая промышленность*, 9, 54–57. <http://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10145>
- Radaeva, I.A., Radaeva, I. A., Illarionova, E. E., Turovskaya, S. N., Ryabova, A. E., & Galstyan, A. G. (2019). Principles of quality assurance of domestic dry milk. *Food Industry*, 9, 54–57. (In Russ.) <http://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10145>
- Саликов П.Ю. (2014). Пиролизная утилизация использованных изделий из полиэтилентерефталата. *Экология и промышленность России*, 3, 16–20.
- Salikov, P.Yu. (2014). Pyrolytic disposal of used polyethylene terephthalate products. *Ecology and Industry of Russia*, 3, 16–20. (In Russ.)
- Фильчакова С. А. (2008). *Санитария и гигиена на предприятиях молочной промышленности*. ДеЛи принт.
- Filchakova, S. A. (2008). *Sanitation and hygiene at dairy industry enterprises*. DeLi print. (In Russ.)
- Фильчакова, С.А. (2008). Микробиологическая чистота упаковки для молочных продуктов. *Молочная промышленность*, 7, 44–46.
- Filchakova, S.A. (2008). Microbiological purity of packaging for dairy products. *Dairy Industry*, 7, 44–46. (In Russ.)
- Юрова, Е.А. (2019). Оценка качества и хранимостпособности молочных продуктов функциональной направленности. *Milk Branch Magazine*, 10, 6–11. <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-10-6-10>
- Yurova, E.A. (2019). Evaluation of quality and shelf life of functional dairy products. *Milk Branch Magazine*, 10, 6–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-10-6-10>
- Юрова, Е.А. (2020). Особенность определения содержания витамина Е (токоферолов) в молочных продуктах функциональной направленности. *Продовольственная безопасность*, 12, 36–39. <http://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10141>
- Yurova, E.A. (2020). Specifics of determining the content of vitamin E (tocopherols) in functional dairy products. *Food Safety*, 12, 36–39. (In Russ.) <http://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10141>
- Ailes, A., & Abigail, N. M. (2013). Expanding bioplastics: Sustainable business innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production* 45, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.008>
- Aversa, C., Barletta, M., Cappiello, G., & Gisario, A. (2022). Compatibilization strategies and analysis of morphological features of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)/poly(lactic acid) PLA blends: A state-of-art review. *European Polymer Journal*, 173, 111304. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2022.111304>
- Barron, A., & Sparks, T. D. (2020). Commercial marine-degradable polymers for flexible packaging. *iScience*, 23(8). <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2020.101353>
- Bocchini, S., Fukushima, K., Blasio, A. Di, Fina, A., Frache, A., & Geobaldo, F. (2010). Polylactic acid and polylactic acid-based nanocomposite photooxidation. *Biomacromolecules*, 11(11), 2919–2926. <https://doi.org/10.1021/bm1006773>
- Brdlík, P., Borůvka, M., Běhálek, L., & Lenfeld, P. (2022). The influence of additives and environment on biodegradation of PHBV biocomposites. *Polymers*, 14(4), 838. <https://doi.org/10.3390/polym14040838>
- Dammak, M., Fourati, Y., Tarrés, Q., Delgado-Aguilar, M., Mutjé, P., & Boufi, S. (2020). Blends of PBAT with plasticized starch for packaging applications: Mechanical properties, rheological behaviour and biodegradability. *Industrial Crops and Products*, 144, 112061. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.112061>
- Dilkes-Hoffman, L. S., Lant, P. A., Laycock, B., & Pratt, S. (2019). The rate of biodegradation of PHA bioplastics in the marine environment: A meta-study. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 15–24. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2019.03.020>
- Dobrov, E.N., Arbieva, Z. K., Timofeeva, E. K., Esenaliev, R. O., Oraevsky, A. A., & Nikogosyan, D. N. (1989). UV Laser induced rna-protein crosslinks and rna chain breaks in tobacco mosaic virus RNA in situ. *Photochemistry and Photobiology*, 49(5), 595–598. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1989.tb08429.x>
- Gardette, M., Thérias, S., Gardette, J.-L., Murariu, M., & Dubois, P. (2011). Photooxidation of polylactide/calcium sulphate composites. *Polymer Degradation and Stability*, 96(4), 616–623. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.023>
- Gewert, B., Plassmann, M., Sandblom, O., & Macleod, M. (2018). Identification of chain scission products released to water by plastic exposed to ultraviolet light.

- Environmental Science and Technology Letters*, 5(5), 272–276. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00119>
- Janczak, K., Dąbrowska, G. B., Raszkowska-Kaczor, A., Kaczor, D., Hryniewicz, K., & Richert, A. (2020). Biodegradation of the plastics PLA and PET in cultivated soil with the participation of microorganisms and plants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 155, 105087. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2020.105087>
- Janorkar, A. V., Metters, A. T., & Hirt, D. E. (2007). Degradation of poly(L-lactide) films under ultraviolet-induced photografting and sterilization conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, 106(2), 1042–1047. <https://doi.org/10.1002/app.24692>
- Jian, J., Xiangbin, Z., & Xianbo, H. (2020). An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2020.01.001>
- Kale, G., Auras, R., & Singh, S. P. (2007). Comparison of the degradability of poly(lactide) packages in composting and ambient exposure conditions. *Packaging Technology and Science*, 20(1), 49–70. <https://doi.org/10.1002/PTS.742>
- Kale, G., Auras, R., Singh, S. P., & Narayan, R. (2007). Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. *Polymer Testing*, 26(8), 1049–1061. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.07.006>
- Kalita, N. K., Bhasney, S. M., Mudenur, C., Kalamdhad, A., & Katiyar, V. (2020). End-of-life evaluation and biodegradation of Poly(lactic acid) (PLA)/Polycaprolactone (PCL)/Microcrystalline cellulose (MCC) polyblends under composting conditions. *Chemosphere*, 247, 125875. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.125875>
- Kiruthika, A. V. (2022). PHBV based blends and composites. In *Biodegradable Polymers, blends and composites* (pp. 283–308). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823791-5.00008-9>
- Lee, J., Maddipatla, M. V. S. N., Joy, A., & Vogt, B. D. (2014). Kinetics of UV irradiation induced chain scission and cross-linking of coumarin-containing polyester ultrathin films. *Macromolecules*, 47(9), 2891–2898.
- Lunt, J. (1998). Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polym. Degrad. Stab.*, 59, 145–152. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00148-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00148-1)
- Miranda, T. M. R., Gonçalves, A. R., & Amorim, M. T. P. (2001). Ultraviolet-induced crosslinking of poly(vinyl alcohol) evaluated by principal component analysis of FTIR spectra. *Polymer International*, 50(10), 1068–1072. <https://doi.org/10.1002/pi.745>
- Oster, G., Oster, G. K., & Moroson, H. (1959). Ultraviolet induced crosslinking and grafting of solid high polymers. *Journal of Polymer Science*, 34(127), 671–684. <https://doi.org/10.1002/pol.1959.1203412744>
- Ponjavic, M., Malagurski, I., Lazic, J., Jeremic, S., Pavlovic, V., Prlainovic, N., Maksimovic, V., Cosovic, V., Atanase, L. I., Freitas, F., Matos, M., & Nikodinovic-Runic, J. (2023). Advancing PHBV biomedical potential with the incorporation of bacterial biopigment prodigiosin. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 1906. <https://doi.org/10.3390/ijms24031906>
- Puchalski, M., Szparaga, G., Biela, T., Gutowska, A., Sztajnowski, S., & Krucińska, I. (2018). Molecular and supramolecular changes in Polybutylene Succinate (PBS) and Polybutylene Succinate Adipate (PBSA) copolymer during degradation in various environmental conditions. *Polymers*, 10(3), 251. <https://doi.org/10.3390/POLYM10030251>
- Reichert, C. L., Bugnicourt, E., Coltelli, M. B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Canesi, I., Braca, F., Martínez, B. M., Alonso, R., Agostinis, L., Verstichel, S., Six, L., De Mets, S., Gómez, E. C., Ißbrücker, C., Geerinck, R., Nettleton, D. F., Campos, I., Sauter, E., Pieczyk, P., Schmid, M. (2020). Bio-based packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability. *Polymers*, 12(7), 1558. <https://doi.org/10.3390/POLYM12071558>
- Tertyshnaya, Y. V., & Podzorova, M. V. (2020). Effect of UV irradiation on the structural and dynamic characteristics of polylactide and its blends with polyethylene. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 14(1), 167–175. <https://doi.org/10.1134/S1990793120010170>
- Van den Oever, M., & Molenveld, K. (2017). Replacing fossil based plastic performance products by bio-based plastic products — Technical feasibility. *New Biotechnology*, 37, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.07.007>
- Van Velzen at all. (2016). Recycling efficiency of used plastic packaging. *Proceedings of the 32nd International Conference of the Society for the Processing of Polymers, Lyon, France*. The Digital Book of Abstracts.
- Wang, L., Xu, J., Zhang, M., Zheng, H., & Li, L. (2022). Preservation of soy protein-based meat analogues by using PLA/PBAT antimicrobial packaging film. *Food Chemistry*, 380, 132022. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.132022>
- Weng, Y. X., Jin, Y. J., Meng, Q. Y., Wang, L., Zhang, M., & Wang, Y. Z. (2013). Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. *Polymer Testing*, 32(5), 918–926. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2013.05.001>
- Yousif, B. F. (2013). Editorial for SI: Materials, design and tribology. *Materials & Design*, 48, 1. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.009>
- Yousif, E., & Haddad, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: Review. *SpringerPlus*, 2(1), 1–32. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398/FIGURES/49>