

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ ДЛЯ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ. ЧАСТЬ 4: СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ В МАТРИЦЕ МАТЕРИАЛА

*И.Ю. Потороко*¹, *irina_potoroko@mail.ru*
*А.В. Малинин*¹, *artemmalinin3@gmail.com*
*А.В. Цатуров*¹, *aram-chel@mail.ru*
Удей Багале^{1,2}, *uday_bagale@yahoo.co.in*
*А.В. Игнатова*¹, *ignatovaav@susu.ru*
*М.А. Булах*¹, *bulahmaxim99@gmail.com*

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Национальный технологический институт, Варангал, шт. Телангана, Индия

Аннотация. Примерно 40 % упаковки для пищевых продуктов производится из полимеров из нефтепродуктов. В течение последних десятилетий использование для этой цели пластмасс на нефтяной основе, таких как полиэтилен низкой плотности, было очень интенсивным. Однако из-за широкого использования одноразовых упаковочных материалов и серьезных проблем, связанных с их переработкой, разработка экологически чистых и возобновляемых материалов стала приоритетной задачей. Для решения этой проблемы рассматривается создание биоразлагаемых материалов на основе растительных полисахаридов. В качестве основного сырья для приготовления пленок, обладающих биоразлагаемой способностью, наиболее часто используют биополимеры, такие как: крахмал, целлюлоза, пектин, желатин и т. д. Целью настоящего исследования стало приготовление образцов биоразлагаемых материалов с улучшенными характеристиками, близкими к аналогу упаковки с оптимальным соотношением основных ингредиентов (крахмала картофельного и целлюлозы льняной) и исследование процессов, проходящих в матрице. В ходе исследования у образцов материала оценивались такие показатели, как структура поверхности пленочного материала при помощи электронной сканирующей микроскопии, рентгеноструктурный анализ, механические характеристики, толщина. В результате обработки экспериментальных данных образцов биоразлагаемого материала были выявлены наилучшие показатели у образца 4 (картофельный крахмал 2,0 % / целлюлоза льняная 0,5 %). Разработанный биоразлагаемый материал может быть использован для создания упаковочных материалов и изделий кратковременного назначения для решения экологических проблем, связанных с утилизацией и накоплением отходов полимеров из нефтепродуктов.

Ключевые слова: биоразлагаемая пленка, картофельный крахмал, целлюлоза льняная, матрица материала, экология

Для цитирования: Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 4: Структурные изменения компонентов в матрице материала / И.Ю. Потороко, А.В. Малинин, А.В. Цатуров и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2022. Т. 10, № 4. С. 26–35. DOI: 10.14529/food220403

Original article
DOI: 10.14529/food220403

BIODEGRADABLE MATERIALS BASED ON PLANT POLYSACCHARIDES FOR FOOD PACKAGING. PART 4: PROCESSES OCCURRING IN THE MATRIX OF THE MATERIAL

I.Yu. Potoroko¹, irina_potoroko@mail.ru
A.V. Malinin¹, artemmalinin3@gmail.com
A.V. Tsaturov¹, aram-chel@mail.ru
Uday Bagale^{1,2}, uday_bagale@yahoo.co.in
A.V. Ignatova¹, ignatovaav@susu.ru
M.A. Bulakh¹, bulahmaxim99@gmail.com

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² National Institute of Technology, Warangal, Telangana State, India

Abstract. Approximately 40% of food packaging is made from polymers from petroleum products. Over the past decades, the use of petroleum-based plastics for this purpose, such as low-density polyethylene, has been very intensive. However, due to the widespread use of disposable packaging materials and serious problems associated with their recycling, the development of environmentally friendly and renewable materials has become a priority. To solve this problem, the creation of biodegradable materials based on plant polysaccharides is being considered. Biopolymers such as starch, cellulose, pectin, gelatin, etc. are most often used as the main raw materials for the preparation of films with biodegradable ability. The purpose of this study was the preparation of samples of biodegradable materials with improved characteristics close to the analogue of packaging with an optimal ratio of the main ingredients (potato starch and flax cellulose) and the study of processes taking place in the matrix. During the study, such indicators as the surface structure of the film material using electron scanning microscopy, X-ray diffraction analysis, mechanical characteristics, thickness were evaluated in the samples of the material. As a result of processing experimental data of samples of biodegradable material, the best indicators were revealed in sample 4 (potato starch 2.0 % / linseed cellulose 0.5 %). The developed biodegradable material can be used to create packaging materials and short-term products to solve environmental problems associated with the disposal and accumulation of polymer waste from petroleum products.

Keywords: biodegradable film, potato starch, flax cellulose, material matrix, ecology

For citation: Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V., Uday Bagale, Ignatova A.V., Bulakh M.A. Biodegradable materials based on plant polysaccharides for food packaging. Part 4: Processes occurring in the matrix of the material. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 26–35. (In Russ.) DOI: 10.14529/food220403

Введение

На сегодняшний день проблемы, связанные с накоплением и утилизацией полимерных отходов, имеют высокую актуальность. Утилизация твёрдых бытовых отходов, содержащих пластик в достаточно больших объемах, специальными мусороперерабатывающими предприятиями оказывает негативное влияние на биосферу и как следствие – на здоровье человека.

Даже несмотря на существующий уровень технологического развития в сфере обработки и утилизации отходов, объемы отхо-

дов пластика, попадающие в окружающую среду, остаются на высоком уровне и продолжают неуклонно нарастать. В условиях климатического кризиса, обусловленного глобальным потеплением, процессы утилизации отходов переходят на новый уровень по значимости и определяют заинтересованность всех стран в снижении углеродного следа.

Одним из путей решения данной проблемы является разработка приороподобного биоразлагаемого материала как альтернативы пластику.

Известно, что биоразлагаемые материалы – это полимеры, способные полностью разрушаться в естественных условиях при воздействии факторов окружающей среды. Кроме того, биоразлагаемые материалы должны исполнять основные функции как упаковочный материал для объектов разной химической природы, а значит, чтобы ускорить их биоразложение, необходимо изменение гидрофобных свойств, устойчивости к окислению, изменение молекулярной массы и плотности.

Указанные позиции стали ключевыми факторами для определения задач, на решение которых направлены исследования научного сообщества в разных странах. Предлагается значительная вариативность сырьевого состава (крахмалы, целлюлоза, лигнины, хитозаны, коллаген и др.), как правило, рассматриваются возможности композиционных сочетаний, изучается влияние модификации основных биополимеров на физические, морфологические, термомеханические, барьерные и биоразлагаемые свойства получаемых пленочных материалов и т. д. Каждая из разработок предлагает комплексные подходы, либо сырьевые вариации с использованием термопластов (сочетание гидрофильных и гидрофобных веществ), либо дополнительные воздействующие факторы (СВЧ, ИК, УЗ и прочие воздействия). Особое место в исследованиях занимают процессы, проходящие в матрице материала, позволяющие регулировать и контролировать свойства будущего биоразлагаемого изделия.

Матрица биоразлагаемого материала формируется в процессе шивки пластифицирующих ингредиентов используемого сырья, в которых происходят превращения при фазовом переходе из одного агрегатного состояния в другое в условиях воздействия температуры и давления. Эффективность пластификации материала зависит от следующих факторов: химическое строение пластификатора и биополимеров, используемых для формирования матрицы материала, объем и форма молекул пластификатора, их способность к конформационным превращениям. Биоразлагаемые материалы, имеющие в составе оптимальное соотношение пластификатора к общей массе используемых биополимеров в суспензии, позволяют получить пленочный материал с высокими физико-механическими свойствами [2, 11].

Молекулярная масса биоразлагаемого материала является важной характеристикой, увеличение молекулярной массы способствует улучшению их механических свойств: эластичности, прочности. В процессе разрушения биоразлагаемого материала, как правило, наблюдается снижение его молекулярной массы, образуются низкомолекулярные биоассимилируемые фрагменты, имеющие свободные реакционноспособные гидроксильные, карбонильные или карбоксильные группы. Такие преобразования оказывают влияние на процессы водопоглощения, высвобождение наполнителя и прочие маложелательные свойства [1, 3, 4].

Наиболее часто для получения биоразлагаемых материалов широкое применение находят крахмалы и волокна целлюлозы, природные полисахариды, которые можно рассматривать как возобновляемые источники сырья.

Крахмал является уникальным усвояемым полисахаридом, образованным глюкозными остатками, связанными α -1 \rightarrow 4 и α -1 \rightarrow 6-гликозидными связями. Короткие ответвления цепей амилопектина образуют геликоидальные структуры, которые могут кристаллизоваться. Гидрофильные свойства проявляют гранулы крахмала, тем самым формируют прочные ассоциаты благодаря проявлению водородных связей между гидроксильными группами на поверхности гранул. Кристаллическая структура для придания термопластичности материалу должна быть разрушена путем воздействия тепла, давления [7, 8].

Целлюлоза – основной структурный компонент стенок растительной клетки. Целлюлоза является гомоглюканом, состоящим из линейных цепей (1 \rightarrow 4)- β -D-глюкопиранозных звеньев. Преобладающая линейность целлюлозы дает преимущество молекулам прочно соединяться параллельным образом. Целлюлоза имеет как кристаллическую, так и аморфную структуру. Аморфные области могут подвергаться воздействию растворителей [9].

Целью данного исследования является исследование процессов, проходящих в матрице пленочного материала, при различном соотношении основных сырьевых компонентов (крахмала картофельного и целлюлозы льняной).

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись биоразлагаемые пленки, полученные при различном соотношении растительных компонентов.

В качестве основного сырья были использованы картофельный крахмал (нативный) (ГОСТ Р. 53876-2010) (далее КК) и целлюлоза льняная (далее ЦЛ).

Исследования процессов, проходящих в матрице материала, проводились на следующих образцах:

образец 1 – на основе компонентов КК: ЦЛ в соотношении 1.5: 0.3;

образец 2 – на основе компонентов КК: ЦЛ в соотношении 1.5: 0.5;

образец 3 – на основе компонентов КК: ЦЛ в соотношении 2.0: 0.3;

образец 4 – на основе компонентов КК: ЦЛ в соотношении 2.0: 0.5 [6].

Для исследования процессов, проходящих в матрице материала, и оценки их характеристик в качестве критериев были определены следующие показатели:

– электронная сканирующая микроскопия поверхности;

– рентгеноструктурный анализ;

– механические свойства и толщина.

Электронная сканирующая микроскопия (SEM) пленок. Для изучения поверхности материала с целью выявления структурных особенностей проводилась электронная сканирующая микроскопия. Использовали просвечивающий электронный микроскоп высокого разрешения Jeol JEM-2100, увеличение $\times 500$. Для каждого образца выполняли не менее пяти измерений [14].

Рентгеноструктурный анализ (XRD) пленок. Дифрактограммы исследуемых образцов пленок получали с помощью дифрактометра высокого разрешения Rigaku «Ultima IV» с использованием медной трубки, работающей при 40 кВ и 30 мА. Рабочий параметр поддерживался на уровне шага $0,02^\circ 2\theta$ со временем сканирования 0,5 с/шаг при дифракции в диапазоне от 4 до $60^\circ 2\theta$ [10].

Определение механических свойств пленок. Механические свойства полученных образцов оцениваются с помощью разрывной машины Instron 5942. Частота одновременной регистрации данных составляет до 1 кГц по каналу нагрузки, удлинения и деформации.

Определение данного показателя позволяет установить применимость биоразлагаемого материала, а также его перспективность. Данный показатель является основополагающим и проводится для всех новых материалов. Стоит отметить, что для пленочных об-

разцов с внесенным органическим наполнителем наблюдается незначительное снижение прочности при разрыве, и на порядок уменьшается относительное удлинение.

Определение толщины пленок. Толщину пленки измеряли с помощью механического микрометра «ТОРЕХ 31с629». Для каждого образца пленки выполняли не менее трех измерений. Затем определяли средний показатель толщины.

Данный показатель позволяет регулировать деформационно-механические характеристики образцов материала. Толщина биоразлагаемого материала играет важную роль при производстве пленочных изделий и влияет на большинство его характеристик.

Результаты и их обсуждение

Для установления эффективного соотношения ингредиентов в биоразлагаемом материале производилось варьирование количества биополимеров (картофельного крахмал и целлюлозы льняной) с установленным количеством поливинилового спирта, растворителя и пластификатора. Приготовленные образцы пленочного материала обладали повышенной эластичностью, бесцветные полупрозрачные матовые.

При пластификации материала молекулы пластификатора, имея высокое сродство к полимеру, постепенно проникают внутрь любых структурных образований, постепенно разрушая их и, распределяясь среди макромолекул полимера, ослабляют взаимодействие последних между собой. Вследствие уменьшения межмолекулярного взаимодействия повышается кинетическая гибкость цепей полимера, увеличивается свободный объем.

К биоразлагаемым материалам может быть применен такой термин, как кристалличность. В матрице могут формироваться области трехмерного упорядочения на атомных (а не макромолекулярных) масштабах длины, которые обычно возникают за счет внутримолекулярного сворачивания или укладки соседних цепей. Пленочные материалы могут состоять как из кристаллических, так и из аморфных областей.

Результаты исследования поверхности образцов биоразлагаемых пленок с использованием электронной сканирующей микроскопии (общее увеличение составляет $\times 500$), представлены на рис. 1.

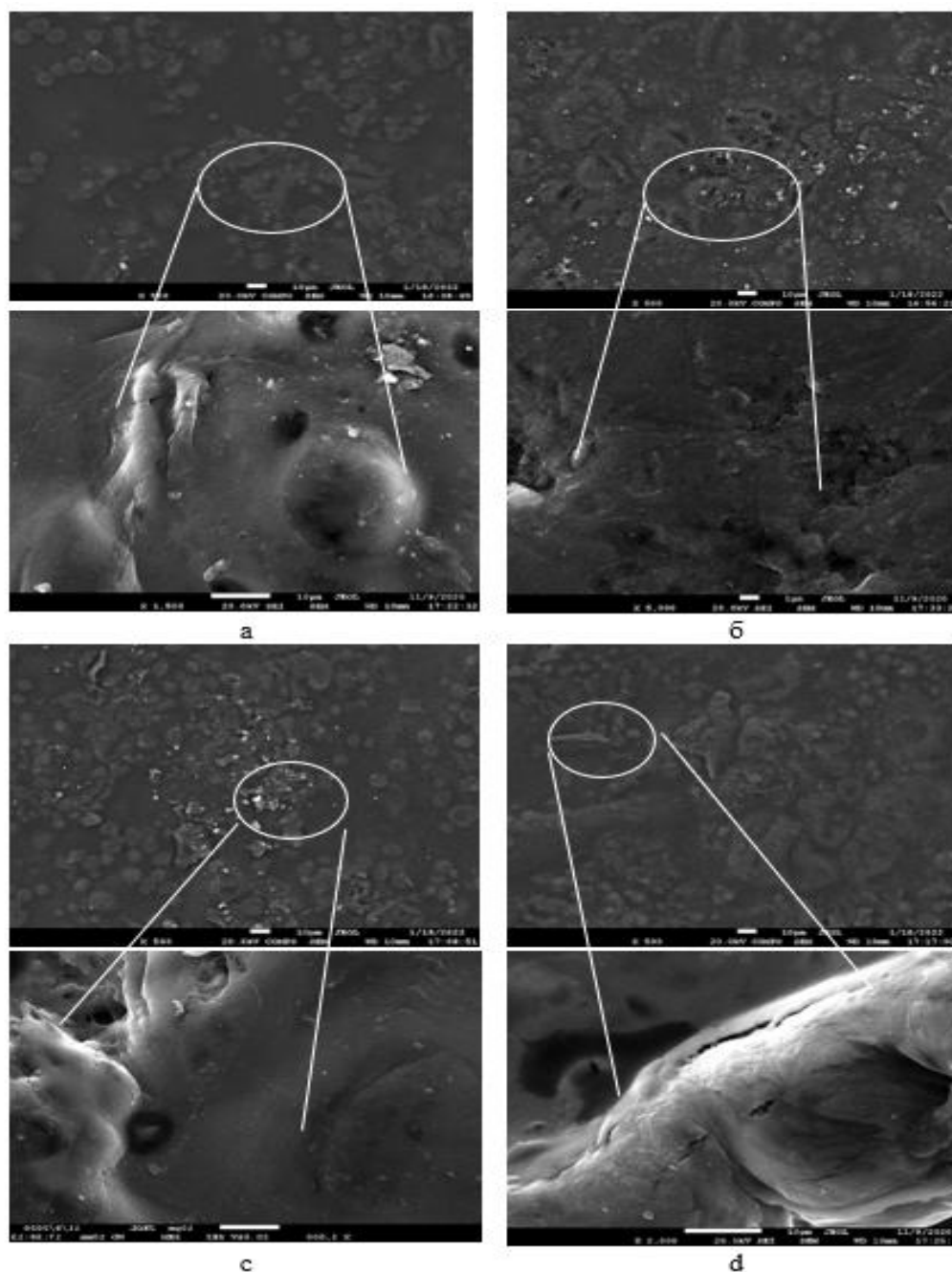


Рис. 1. Фотографии поверхности исследуемых образцов биоразлагаемых материалов (пленок), полученные с использованием электронной сканирующей микроскопии (общее увеличение составляет $\times 500$): а – образец 1; б – образец 2; с – образец 3; d – образец 4

Поверхность у всех образцов биоразлагаемых материалов рельефная, наблюдаются встроенные крахмальные зерна, не подвергнувшиеся клейстеризации. Пластифицированный крахмал картофельный в присутствии поливинилового спирта обволакивает волокна целлюлозы льняной. При микроскопии в изломе материала были обнаружены волокна

целлюлозы, имеющие разную длину и встроенные в композитную матрицу. У образца 2 и 3 присутствует на поверхности материала небольшое количество нерастворенных частиц поливинилового спирта. У образца 2 наблюдаются небольшие дефекты структуры поверхности, трещины, углубления. Более однородная поверхность установлена у образца 1.

Следовательно, изменения в матрице биоразлагаемого материала зависят от соотношения ингредиентов, а также их количества в составе, технологических стадий [5].

На следующем этапе исследования был проведен рентгеноструктурный анализ (XRD) образцов биоразлагаемых материалов (пленок). Результаты анализа в виде рентгенограмм представлены на рис. 2. Рентгеноструктурный анализ – это один из дифракционных методов исследования структуры вещества. Сущность метода основана на явлении дифракции рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке. Данный метод находит свое применение при исследовании кристаллической структуры полимера. Исследуемые образцы биоразлагаемого материала демонстрируют два точных пика 2θ при уровне шага 19° и 22° . Целлюлоза льняная имеет два пика при 2θ при уровне шага 15° и 22° . Крахмал картофельный имеет два пика при 2θ , уровень шага составляет 17° и 20° . Таким образом, исследуемые образцы имеют умеренную степень кристаллизации. Более интенсивные пики наблюдаются у образцов 2 и 4 за счет увеличения содержания целлюлозы льняной в матрице биоразлагаемого материала. Изучение величины степени кристалличности непосредственно определяют ряд физико-механических свойств полимера.

Следовательно, чем выше степень кристалличности полимера, тем труднее жидко-

сти проникают в полимерную матрицу и проходят сквозь нее, тем жестче полимер.

В процессе исследования ожидалась потеря кристалличности после процесса пластификации для получения пленок на основе крахмала и целлюлозы из-за нарушения межмолекулярных водородных связей между молекулами крахмала и молекулами глицерина, что увеличивает цепную подвижность молекул крахмала. Сравнение рентгенограмм нативного крахмала и целлюлозы и соответствующих пленок подтвердило значительную потерю кристалличности после процесса пластификации [16].

На заключительном этапе исследования образцов биоразлагаемых материалов оценивались физико-механические характеристики. Результаты исследования образцов пленок представлены в таблице. На рис. 3 представлены зависимости напряжения-деформации при растяжении образцов биоразлагаемых материалов (пленок).

Данные показатели определяют применимость и перспективность пленочного материала для формирования готового изделия с установленными эксплуатационными свойствами. Толщина пленочного материала может варьироваться в зависимости от необходимого количества суспензии. Максимальный предел прочности наблюдается у образца 4 (КК:ЦЛ в соотношении 2,0:0,5). Наибольшая деформация в момент разрыва установлена у

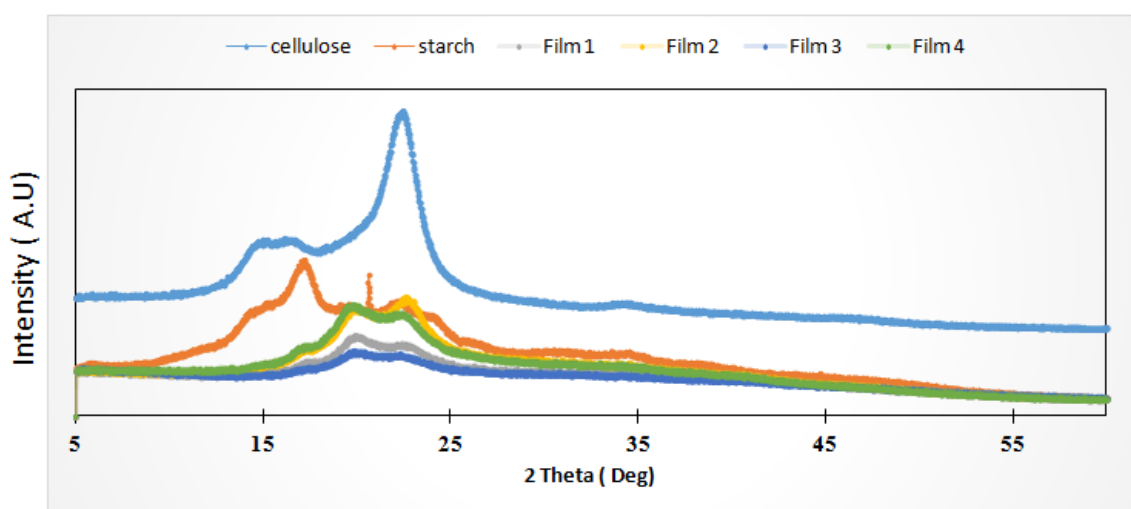


Рис. 2. Рентгеноструктурный анализ (XRD) образцов биоразлагаемых материалов (пленок):
cellulose – целлюлоза льняная; starch – крахмал картофельный; film 1 – образец 1;
film 2 – образец 2; film 3 – образец 3; film 4 – образец 4

образца 1 (КК:ЦЛ в соотношении 1,5:0,3). При увеличении предела прочности снижается деформация в момент разрыва материала. При увеличении концентрации льняной целлюлозы в матрице материала снижается показатель деформации в момент разрыва. При увеличении содержания крахмала картофельного, пластифицированного глицерином, в сшитой матрице композита наблюдается повышение предела прочности от 2,37 до 2,69 МПа. При увеличении концентрации основных ингредиентов (КК:ЦЛ) повышается предел прочности материала, обладающего биоразлагаемой способностью. Данные изменения могут быть вызваны природой наполнителя, взаимодействием цепей, кристалличностью [12, 13, 15].

Выводы по результатам работы

Таким образом, результаты исследования показали, что при изменении вариации компонентов (крахмала картофельного и целлюлозы льняной) в суспензии биоразлагаемого материала можно регулировать свойства будущего изделия, влиять на механические свойства (предел прочности, деформация в момент разрыва). Наилучшие показатели наблюдаются у образца 4 (картофельный крахмал 2,0 % / целлюлоза льняная 0,5 %). Полученный биоразлагаемый материал может быть использован для создания упаковочных материалов и изделий кратковременного назначения для решения экологических проблем, связанных с накоплением и утилизацией отходов полимеров из нефтепродуктов.

Физико-механические характеристики образцов биоразлагаемых материалов (пленок)

Наименование образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Предел прочности, МПа	Деформация в момент разрыва, %
Образец 1	0,25	13,0	40,0	2,37	113,38
Образец 2	0,25	16,0	40,0	1,90	25,85
Образец 3	0,26	16,0	40,0	2,69	80,72
Образец 4	0,24	16,50	40,0	3,05	23,40
Образец 1	0,26	16,0	40,0	2,19	115,13
Образец 2	0,33	15,0	40,0	2,34	30,53

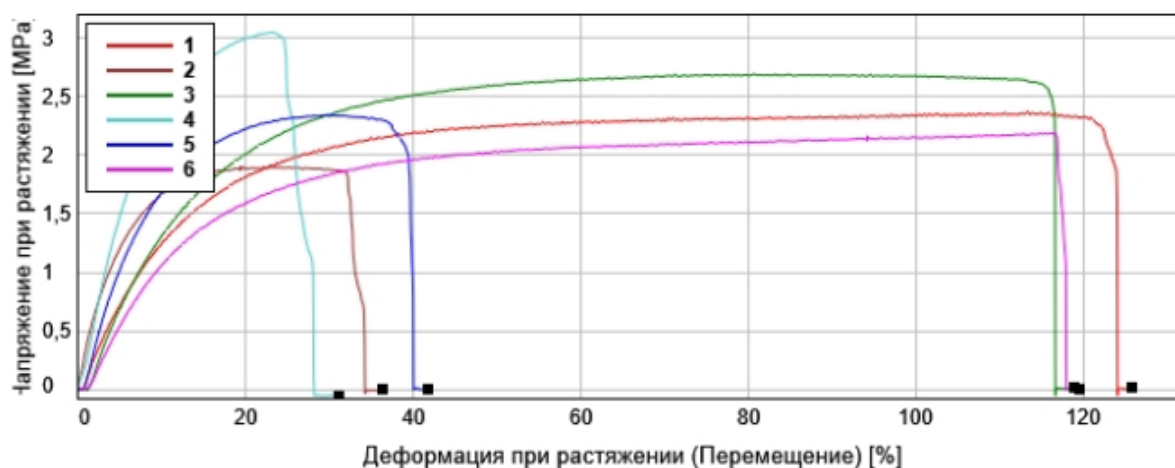


Рис. 3. Диаграмма деформирования образцов биоразлагаемых материалов (пленок), %:
 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – образец 4; 5 – образец 1; 6 – образец 2

Список литературы

1. Власов С.В., Ольхов, А.А. Биоразлагаемые полимерные материалы // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. 2006. № 7. С. 23–26.
2. Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р., Глоба А.И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов. Минск: Изд-во БГТУ, 2014. 105 с.
3. Луканина Ю.К., Колесникова Н.Н., Лихачев А.Н., Хватов А.В., Попов А.А. Влияние структуры полимерной матрицы на развитие микромицетов на смесевых композициях полиолефинов с целлюлозой // Пластические массы. 2010. № 11. С. 56–59.
4. Лонг Ю. Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 464 с.
5. Потороко, И.Ю., Малинин, А.В., Цатуров, А.В., Удей Багале. Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 1 // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2020. Т. 8, № 2. С. 21–28. DOI: 10.14529/food200203
6. Потороко И.Ю., Малинин А.В., Цатуров А.В., Кади А.М., Ботвинников Н.А., Генжак З.Ю. Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 3: Исследование способности к биоразложению // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2022. Т. 10, № 1. С. 107–116. DOI: 10.14529/food220112
7. Рыбкина С.П., Пахаренко В.В., Булах В.Ю. Биоразлагаемые упаковочные материалы на основе полисахаридов (крахмала) // Пластические массы. 2012. № 2. С. 61–64.
8. Сивкова Г.А., Хусаинова А.А. Получение биоразлагаемого пластика из возобновляемого сырья // Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы, Саратов, 10 января 2020 г. 2020. С. 25–30.
9. Терентьева Э.П., Удовенко Н.К., Павлова Е.А., Алиев Р.Г. Основы химии целлюлозы и древесины: учебно-методическое пособие. СПб.: ГОУВПО СПбГТУ РП, 2010. 23 с.
10. Ali Ghadetaj, Hadi Almasi, Laleh Mehryar. Development and characterization of whey protein isolate active films containing nanoemulsions of Grammosciadium ptrocarpum Bioss. essential oil // Food Packaging and Shelf Life. 2018. V. 16. P. 31–40. DOI: 10.1016/j.fpsl.2018.01.012
11. Alberto Jimenez, María Jose Fabra, Pau Talens Amparo Chiralt. Edible and Biodegradable Starch Films: A Review // Food and Bioprocess Technology. 2012. V. 5. P. 2058–2076. DOI: 10.1007/s11947-012-0835-4
12. A.A.S. Curvelo, A.J. F de Carvalho, J.A. M Agnelli. Thermoplastic starch-cellulosic fibers composites: preliminary results // Carbohydrate Polymers. 2001. V. 45. P. 183–188. DOI: 10.1016/S0144-8617(00)00314-3
13. Bledzki A.K., Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres // Progress in Polymer Science (Oxford). 1999. V. 24(2). P. 221–274. DOI: 10.1016/S0079-6700(98)00018-5
14. Dong Y., Abdullah Z. Biodegradable and Water Resistant Poly(vinyl) Alcohol (PVA)/Starch (ST)/Glycerol (GL)/Halloysite Nanotube (HNT) Nanocomposite Films for Sustainable Food Packaging // Frontiers in materials. 2019. V. 6. P. 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2019.00058
15. Yu L., Petinakis S., Dean K., Bilyk A., Wu D. Green polymeric blends and composites from renewable resources // Macromol. Symp. 2007. P. 535–539. DOI: 10.1002/masy.200750432
16. Zhou Y., Hoover R., Liu Q. Relationship between amylase degradation and the structure and physicochemical properties of legume starches // Carbohydrate Polymers. 2004. V. 57. P. 200–317. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.05.010

References

1. Vlasov S.V., Olkhov A.A. Biodegradable polymer materials. *Polimernye materialy: izdeliya, oborudovanie, tekhnologii* [Polymer materials: products, equipment, technologies], 2006, no. 7, pp. 23–26. (In Russ.)
2. Krutko E.T., Prokopchuk N.R., Globa A.I. *Tekhnologiya biorazlagaemykh polimernykh materialov* [Technology of biodegradable polymer materials]. Minsk, 2014. 105 p.

3. Lukanina Yu.K., Kolesnikova N.N., Likhachev A.N., Khvatov A.V., Popov A.A. Influence of the polymer matrix structure on the development of micromycetes on mixed compositions of polyolefins with cellulose. *Plastic masses*, 2010, no. 11, pp. 56–59. (In Russ.)
4. Long Yu. *Biorazlagaemye polimernye smesi i kompozity iz vozobnovlyaemykh istochnikov* [Biodegradable polymer mixtures and composites from renewable sources]. St. Petersburg, 2013. 464 p.
5. Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V., Uday Bagale Biodegradable Materials Based on Plant Polysaccharides for Food Packaging. Part 1. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 21–28. (In Russ.) DOI: 10.14529/food200203
6. Potoroko, I.Yu., Malinin, A.V., Tsaturov, A.V., A.M. Kadi, Botvinnikov, N.A., Genzhak, Z.Yu. Biodegradable materials based on plant polysaccharides for food packaging. Part 3: Investigation of biodegradability. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 107–116. (In Russ.) DOI: 10.14529/food220112
7. Rybkina S.P., Pakhareno V.V., Bulakh V.Yu. Biodegradable packaging materials based on polysaccharides (starch). *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2012, no. 2, pp. 61–64. (In Russ.)
8. Sivkova G.A., Khusainova A.A. [Getting biodegradable plastic from renewable raw materials]. *Traditsionnaya i innovatsionnaya nauka: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy* [Traditional and innovative science: history, current state, prospects], Saratov, January 10, 2020, pp. 25–30.
9. Terenteva E.P., Udoenko N.K., Pavlova E.A., Aliyev R.G. *Osnovy khimii tsellyulozy i drevesiny* [Fundamentals of pulp and wood chemistry]. St. Petersburg, 2010. 23 p.
10. Ali Ghadetaj, Hadi Almasi, Laleh Mehryar. Development and characterization of whey protein isolate active films containing nanoemulsions of Grammosciadium ptoocarpum Bioss. essential oil. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, vol. 16, pp. 31–40. DOI: 10.1016/j.fpsl.2018.01.012
11. Alberto Jimenez, Maria Jose Fabra, Pau Talens Amparo Chiralt. Edible and Biodegradable Starch Films: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, vol. 5, pp. 2058–2076. DOI: 10.1007/s11947-012-0835-4
12. A.A.S. Curvelo, A.J. F de Carvalho, J.A. M Agnelli. Thermoplastic starch-cellulosic fibers composites: preliminary results. *Carbohydrate Polymers*, 2001, vol. 45, pp. 183–188. DOI: 10.1016/s0144-8617(00)00314-3
13. Bledzki A.K., Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* (Oxford), 1999, vol. 24(2), pp. 221–274. DOI: 10.1016/s0079-6700(98)00018-5
14. Dong Y., Abdullah Z. Biodegradable and Water Resistant Poly(vinyl) Alcohol (PVA)/Starch (ST)/Glycerol (GL)/Halloysite Nanotube (HNT) Nanocomposite Films for Sustainable Food Packaging. *Frontiers in materials*, 2019, vol. 6, pp. 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2019.00058
15. Yu L., Petinakis S., Dean K., Bilyk A., Wu D. Green polymeric blends and composites from renewable resources. *Macromol. Symp*, 2007, pp. 535–539. DOI: 10.1002/masy.200750432
16. Zhou Y., Hoover R., Liu Q. Relationship between amylase degradation and the structure and physicochemical properties of legume starches. *Carbohydrate Polymers*, 2004, vol. 57, pp. 200–317. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.05.010

Информация об авторах

Потороко Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, irina_potoroko@mail.ru

Малинин Артем Владимирович, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, artemmalinin3@gmail.com

Цатуров Арам Валерикович, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, aram-chel@mail.ru

Удей Багале, Ph.D, кафедра химической инженерии, Национальный технологический институт, Варангал, шт. Телангана, Индия; Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, uday_bagale@yahoo.co.in

Игнатова Анастасия Валерьевна, кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ignatovaav@susu.ru

Булах Максим Александрович, студент магистратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, bulahmaxim99@gmail.com

Information about the authors

Irina Yu. Potoroko, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, irina_potoroko@mail.ru

Artem V. Malinin, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, artemmalinin3@gmail.com

Aram V. Tsaturov, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, aram-chel@mail.ru

Uday Bagale, Doctor of Philosophy, Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, Warangal, Telangana State, India; South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, uday_bagale@yahoo.co.in

Anastasia V. Ignatova, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of the Department of Technical Mechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ignatovaav@susu.ru

Maxim A. Bulakh, student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, bulahmaxim99@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.08.2022

The article was submitted 07.08.2022