

– введение примеси La (0,25–0,5 ат. %) в виде азотнокислой соли приводит к появлению дополнительных пиков на длине волны 610 нм при  $\lambda_{\text{возб}} = 455$  нм. Таким образом, при частичном прохождении синего излучения светодиода визуальное создается ощущение «теплого» белого света за счет смешения цветов синего, желтого и красного.

#### Литература

1. Kitai, A. Luminescent Materials and Applications / A. Kitai. – John Wiley & Sons, 2008. – 374 p.
2. White LEDs / W. J. Park [et al.] // Sol. St. Phen. – 2007. – Vol. 124–126. – P. 379–382.
3. Рентгеновский анализ микронапряжений и размера областей когерентного рассеяния в поликристаллических материалах / А. К. Штольц [и др.]. – Екатеринбург, 2005. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/729/28729/files/ustu336.pdf>. – Дата доступа: 07.08.20.

УДК 621.865:004.896

### **ФОРМИРОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЬНОКОСТРЫ**

**Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко, О. В. Давыдова**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В последние годы актуальным стало создание композиционных материалов, полностью разрушаемых в природных условиях, на основе термопластичных биоразлагаемых полимеров, например, полимолочной кислоты (полилактида), поликапролактона, полигидроксиалконоата [1–3]. Такие материалы, используемые для создания для упаковки, одноразовой посуды, разлагаемые в природной среде, промышленном или домашнем компосте, должны соответствовать принятым стандартам (ISO 16929:2013, ГОСТ Р 57226–2016) и полностью дезинтегрироваться в течение 3–6 месяцев. Наполнение биоразлагаемых полимеров лигноцеллюлозными материалами природного происхождения, такими как древесная мука, солома, лузга злаковых культур и льнокостра, удешевляет полимерные композиции и позволяет значительно уменьшить длительность биоразложения и экологическую нагрузку на природу после их использования.

Таким образом, поиск дешевых природных наполнителей, решение проблем повышения биоразлагаемости подобных композитов с использованием новых биоразлагаемых матриц, а также задачи совмещения частиц наполнителя с полимерной основой остаются актуальными.

Для получения экспериментальных образцов биоразлагаемых материалов на основе полилактида, наполненного льнокострой, были использованы следующие исходные материалы:

- полилактид марки INGEO™ Вуорopolymer 3001D в виде гранулированного материала;
- поливиниловый спирт ПВС 16/1 (ГОСТ 10779–78);
- микротальк марки МТ-К, (ГОСТ 19284–79);
- полиэтиленгликоль ПЭГ-4000;
- льнокостра высушенная (Кормянский льнозавод, Гомельская область, Республика Беларусь).

Используемая в качестве биоразлагаемого наполнителя костра льняная – это одеревеневшие части льняных стеблей. Костра имеет следующий химический

состав, мас. %: целлюлоза – 45–58; лигнин – 21–29; гемицеллюлоза – 9,1; экстрактивные вещества – 9,9; пектиновые вещества – 2,0; зола – 1,5; вода – 8 [4]. Для использования льнокостры в качестве наполнителя необходимо предварительно очистить ее от загрязнений, размолоть и рассеять до порошкообразного состояния.

В качестве биоразлагаемой основы был взят порошкообразный и гранулированный полилактид (полимолочная кислота) марки INGEO™ Вуорopolymer 3001D.

Полиэтиленгликоль ПЭГ-4000 – неионный полимер, хорошо растворим в воде. Используется в качестве лубриканта и биндера. Химическая формула имеет следующий вид:  $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{H}$ .

Поливиниловый спирт (ПВС) относится к синтетическим биоразлагаемым веществам, хорошо набухает в воде, что создает дополнительный источник водопоглощения композиционного материала.

Тальк (химическая формула  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) – минерал из класса силикатов, кристаллическое вещество, которое используется в композиции в качестве зародышеобразователя для иницирования формирования кристаллической фазы полилактида при получении композитов из расплава, что способствует повышению термостойкости.

Дисковые образцы композитов формировали с помощью гидравлического пресса в форме цилиндрической таблетки под давлением 10 МПа, после чего помещали в нагреваемое приспособление между двумя фторопластовыми пластинами.

Ленточные экспериментальные образцы композитов вытягивали на одношнековом экструдере HAAKE RHEOCORD 90 (Германия), диаметр шнека – 20 мм, длина шнека – 500 мм, скорость вращения – 50 об/мин. Способность материалов к биоразложению под действием природных факторов охарактеризована водопоглощением за 24 часа (по ГОСТ 4650–80) и способностью к биоразложению в компосте в соответствии с ГОСТ Р 57226–2016 (ISO 16929:2013).

Для изучения структурных свойств и морфологии композиционных материалов использованы методы оптической и сканирующей электронной микроскопии (микроскоп TESCAN, Чехия).

Состав исходной шихты варьируют таким образом, мас. %: гранулированный полилактид – 40–50; костра льна – 30–40; поливиниловый спирт – 5–10; полиэтиленгликоль ПЭГ-4000 – 8–12; микротальк – 2–3.

Очищенную и подсушенную в течение 2–3 часа при 105 °С костру измельчают в центробежной мельнице 20–30 минут, затем рассеивают на вибросите до состояния порошка с размерами частиц менее 0,5 мм.

Экспериментальные образцы композиционных материалов изготавливаются следующим образом: гранулы полилактида смешивают с порошком поливинилового спирта ПВС 16/1 и полиэтиленгликоля ПЭГ-4000 в скоростном турбосмесителе, затем в смесь добавляют тальк и засыпают порошок костры и выдерживают смесь при вращении 20 минут, затем поднимают температуру в смесителе до 125 °С и обрабатывают шихту в течение 30 минут для удаления избыточной влаги и повышения однородности, после этого отключают нагрев и охлаждают шихту до комнатной температуры. Для получения дисковых образцов используют порошкообразный полилактид, а полученную смесь прессуют в форме цилиндрической таблетки под давлением 10 МПа на гидравлическом прессе и помещают в нагреваемое приспособление между двумя фторопластовыми пластинами. Нагрев производят под давлением при температуре 175 °С в течение 15 минут.

Для получения ленточных образцов смесь загружают в экструдер со щелевой головкой для расплавления и гомогенизации при температуре 160–175 °С и закручивают на каландр.

По сравнению с чистым полилактидом полученные образцы обладают более высоким водопоглощением и повышенной способностью к биоразложению за счет наличия органического наполнителя и более рыхлой структуры.

Таким образом, создана термопластичная композиция с уменьшенным периодом биоразложения с использованием лигноцеллюлозного наполнителя – костры льняной, изделия из которой разрушаются полностью после эксплуатации под действием влаги и микрофлоры компоста или почвы за 5–6 месяцев.

#### Литература

1. Ahmed, J. Polylactides—Chemistry, Properties and Green Packaging Technology : a review / J. Ahmed, S. K. Varshney // International Journal of Food Properties. – Vol. 14. – P. 37–58.
2. Rogovina, S. Z. Biodegradable Polymer Composites Based on Synthetic and Natural Polymers of Various Classes / S. Z. Rogovina // Polymer Science, Series C. – 2016. – Vol. 58, N 1. – P. 62–73.
3. Polyblends and composites of poly (lactic acid) (PLA) : a review on the state of the art / Krishna Prasad Rajan [et al.] // Journal of Polymer Science and Engineering. – 2018. – Vol. 1. – P. 1–14.
4. Карпунин, И. И. Химия льна и перспективные технологии его углубленной переработки / И. И. Карпунин, И. А. Голуб, П. П. Казакевич. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 96 с.

УДК 546:54.057

## РЕВЕРСИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И 3D-ПЕЧАТЬ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

И. Н. Прусенко

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Реверсивное проектирование – это эффективный способ построения компьютерных 3D-моделей на основе физических объектов. Для этого, как правило, применяется комплекс технологий, состоящий из оборудования и программных решений. Совместное использование 3D-сканирования и аддитивных технологий представляет собой современный инструмент для прототипирования объектов в различных отраслях промышленности.

В лаборатории «Аддитивные технологии» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого используется высокоточное оборудование для 3D-печати по технологиям FDM и SLA. При этом изготовление цифровых моделей для аддитивного синтеза изделий производится посредством сканирования по световозвратной технологии структурированного света (точность – 7 и 40 мкн) либо с использованием систем автоматизированного проектирования.

Используя опыт работы лаборатории «Аддитивные технологии», совместно с ООО «Рефралит» произвели разработку технологической оснастки для изготовления горелки печной установки патентирования. Для этого была разработана CAD-модель существующей горелки, после чего проведена оптимизация ее конструкции и произведена 3D-печать.

Для построения 3D-модели использовался оптический сканер Shining EinScan Pro 2x Plus. Данное устройство позволяет зафиксировать форму физических объектов с использованием структурированных линий светового излучения и получить макси-