

лиза со средней, требуемой для эффективного перемешивания материала, частотой. Во время выгрузки твердой фракции – угля, частоту вращения ворошителя увеличивают, что ускоряет разгрузку и, следовательно, повышает производительность процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рациональное использование древесных отходов // Электронный ресурс: <http://odrevesine.ru/obrabotka/othody-ilitvorichnoesyre.html>.
2. Лесохимия – современное состояние и перспективы развития // Электронный ресурс: <https://cyberleninka.ru/article/n/lesohimiya-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektiv>.
3. Пиролиз древесины // Электронный ресурс: <https://cotlix.com/chto-takoe-piroliz>.

УДК 661

А. А. Бурков, доц., канд. хим. наук; К. А. Земцова, студ.
(ФГБОУ ВО «ВятГУ», г. Киров, Российская Федерация)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И БИОУГЛЕРОДА

Биоуглерод – это наполнитель, получаемый карбонизацией возобновляемого растительного сырья. Интерес к биоуглероду обусловлен его свойствами, такими как высокая химическая и термическая стабильность, отличные электрические свойства и большая площадь поверхности, низким воздействием на окружающую среду. В данной работе была исследована возможность получения биокomпозитов на основе полилактида и биоуглерода.

Для улучшения совместимости полярного полилактида с неполярным биоуглеродом проводят модификацию наполнителя различными веществами. В частности, в исследовании [1] проводилась обработка кислотой, щелочью, силаном, результатом чего является улучшение межфазной адгезии между наполнителем и полимером. В данной работе химическая модификация выполнялась соляной кислотой, в качестве источника биоуглерода использовались отходы деревообрабатывающей промышленности Кировской области.

Предварительно измельченные опилки проходят процесс карбонизации в низкотемпературной печи. В ходе процесса температуру повышали от комнатной до 200°C, а затем до 400°C со скоростью нагрева 10°C/мин. Температуру поддерживали на уровне 400°C в течение часа, чтобы могла произойти карбонизация. Печь охлаждали до комнатной температуры со скоростью 6,16 °C/мин. Далее полученный

биоуглерод обрабатывался с помощью шаровой мельницы в течение примерно 5–10 минут в диапазоне скоростей от 18 000 до 20 000 об/мин. В ходе процедуры использовались 20 шариков из нержавеющей стали весом 0,5 г каждый. Процесс получения модифицированного биоуглерода отличается дополнительной стадией обработки опилок 0,05М раствором соляной кислоты по методике, описанной в литературе [2].

Существенное влияние на технологические и эксплуатационные свойства получаемых биокомпозитов влияют условия их изготовления. Чтобы в процессе смешения полилактида с биоуглеродом предотвратить нежелательную деструкцию полимера, вызванную наличием влаги в материале, необходимо подвергать оба материала тщательной сушке. Полилактид выдерживают в сушильном шкафу при температуре 100°C в течение суток, а биоуглерод – в течение 12 часов. На качество смешения и, соответственно, свойства получаемых композиций также существенно влияет время смешения. Была установлена оптимальная продолжительность смешения – 30 мин, при смешении в камере микросмесителя при 40 об/мин, температуре 170°C. При данных условиях были изготовлены две серии композитов: серия №1 – с добавлением немодифицированного биоуглерода, №2 – с добавлением модифицированного соляной кислотой биоуглерода. Из полученных смесей литьем под давлением при температуре 190°C изготовлены стандартные образцы. Результаты испытаний механических свойств представлены в таблице.

Таблица – Результаты испытаний образцов

Содержание БУ	Серия № 1	Серия № 2	Серия № 1	Серия № 2
	Предел прочности, МПа		Удлинение при растяжении, %	
1 масс. ч.	66,0	66,7	3,30	2,57
5 масс. ч.	53,8	62,1	2,62	2,86
10 масс. ч.	44,1	54,2	2,22	2,51

Из данных таблицы видно, что с увеличением количества биоуглерода, добавленного в смесь, показатель предела прочности падает. Это характерное для композитов такой природы явление [3]. Однако композиты ПЛА с биоуглеродом, обработанным соляной кислотой, показывают лучшие результаты показателя предела прочности. Это можно объяснить увеличением совместимости полярного полилактида с изначально неполярным биоуглеродом, т. к. на его поверхности после обработки образуются функциональные группы.

На относительное удлинение материалов добавление биоуглерода не оказывает значительного влияния. Чтобы оценить влияние количества биоуглерода на термическую стабильность композитов был проведен термогравиметрический анализ. Из полученных результатов

установлено, что композиты с биоуглеродом более термостойкие, чем ненаполненный полилактид, характеризуются меньшей потерей массы при нагревании. В аналогичных исследованиях [3] композиты, наполненные биоуглеродом, показывали ухудшение термостойкости. Такую разницу можно объяснить различающимся составом БУ.

Чтобы охарактеризовать структуру композитов, была выполнена дифференциальная сканирующая калориметрия. Результаты испытаний отображены на рисунке 1. Из графиков ДСК видно, что температура стеклования чистого ПЛА незначительно меньше, чем температура стеклования композитов ПЛА с БУ.

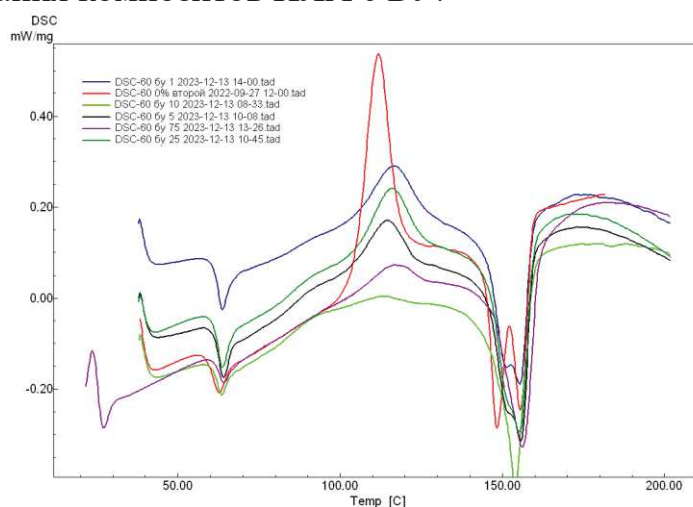


Рисунок 1 – ДСК-термограммы образцов

Степень кристалличности значительно снижается при увеличении количества биоуглерода. Также отличаются пики, соответствующие кристаллизации фазы ПЛА: с увеличением содержания биоуглерода интенсивность пика снижается. Это можно объяснить тем, что наполнитель затрудняет укладку макромолекул полилактида в кристаллическую структуру.

Таким образом, в ходе исследования было установлено, что модификация биоуглерода соляной кислотой улучшает его совместимость с матрицей ПЛА. Механические свойства биокомпозитов с модифицированным БУ демонстрируют более высокие показатели. Также введение БУ незначительно повышает термостабильность материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kamran M. J., Jayamani E., Heng S. K., Wong Y. C., Rahman M. R., Al-Bogami A. S., Huda D., Bin Bakri M. K., Rahman M. M. Characterization and comparative study on chemically treated luffa fiber as reinforcement for polylactic acid bio-composites // *BioResources*. –2022. – № 17(2). – P. 2576–2597.
2. Rahman M. R., Bin Othman A. K., Alfaifi S. Y., Madkhali O.,

Aljabri M. D., Rahman M. M. Rheological and mechanical study of micro-nano sized biocarbon-PLA biodegradable biocomposites // *BioResources*. – 2023. – № 18(3) – P. 4492–4509.

3. Zouari M., Devallance D. B., Marrot L. Effect of Biochar Addition on Mechanical Properties Thermal Stability, and Water Resistance of Hemp-Polylactic Acid (PLA) Composites // *Materials*. – 2022. – № 15(6). – P. 2271.

УДК 678.7-139.9:678.742.3

А. И. Нигматуллина, доц., канд. техн. наук;
С. И. Вольфсон, зав. кафедрой ХТПЭ, д-р техн. наук;
Ю. М. Казаков, ректор, д-р техн. наук
(ФГБОУ ВО «КНИТУ»), г. Казань, Российская Федерация)

МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

В последние годы получение полимерных композиционных материалов производится на основе различных полимеров и их смесей, наполнителей и процессинговых добавок. Для исследователя, разрабатывающего новые составы, важной и актуальной является задача прогнозирования механической прочности получаемого композиционного материала. Это становится возможным при использовании энергии когезии атомных групп полимеров, которая позволяет существенно уменьшить количество трудоемких экспериментов и осуществить целенаправленный подбор полимеров. Макромолекулы полимеров связаны между собой силами молекулярного взаимодействия, от которых зависят механические свойства полимеров. Установлено, что полимеры с высокой когезионной энергией дают более прочные полимерные композиционные материалы.

Таким образом, прочностные свойства древесно-полимерных композитов (ДПК) во многом определяются когезией – сцеплением молекул полимеров, входящих в состав ДПК, под действием сил межмолекулярного взаимодействия [1]. Межмолекулярное взаимодействие в ДПК обусловлено слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами (до 40 кДж/моль), которые состоят из дисперсионного (до 40 кДж/моль) взаимодействия и водородной связи (до 50 кДж/моль). Межмолекулярное взаимодействие зависит от атомных групп, строения и количества группировок мономерного звена данного полимера [2]. Когезионная прочность полимера определяется числом и величиной этих связей. Зная химическое строение полимера, можно рассчитать величину когезии данного полимера.

В огромном большинстве ДПК матрицей служит полиэтилен