

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ ПОЛИГИДРОКСИАЛКАНОАТОВ (ПГА) МЕТОДАМИ АТОМНО- СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Кондратьева С. А.¹, Новиков О. П.¹, Рыльцева Г.А.², Скорб Е.В.¹
Научный руководитель – Новиков О. П.¹, м.н.с., Рыльцева Г.А.²

¹Университет ИТМО

²Сибирский федеральный университет
sony_245@mail.ru

Введение

Полигидроксиалканоаты (ПГА) являются перспективными биоматериалами для создания медицинских изделий и систем доставки лекарств, а также широко применяются в тканевой инженерии и регенеративной медицине, включая восстановление кожи, мягких тканей, костей и элементов сердечно-сосудистой системы [1]. ПГА представляют собой биоразлагаемые полиэфиры бактериального происхождения. Варьирование мономерного состава позволяет регулировать механические и структурные характеристики полимеров и изделий из них [2]. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является современным методом исследования морфологии и свойств поверхности материалов на наноуровне. Помимо контактного и полуконтактного режимов, существует гибридный режим АСМ, основанный на регистрации силовых кривых взаимодействия «зонд–поверхность» в каждой точке сканирования. Такой подход позволяет одновременно получать морфологию поверхности и количественные данные о жёсткости, адгезии, деформации и других наномеханических характеристиках, что необходимо при исследовании мягких полимерных плёнок [3]. Изменения свойств поверхности ПГА плёнок в зависимости от мономерного состава недостаточно изучены, что затрудняет дальнейшее практическое применение. В связи с этим исследование является актуальным из-за отсутствия закономерности между составом плёнок ПГА и их механическими и поверхностными свойствами.

Основная часть

Образцы ПГА были синтезированы в Лаборатории биотехнологии новых биоматериалов Сибирского федерального университета микробиологическим синтезом бактерий *Cupriavidus necator* В-10646: гомополимер: поли-3-гидроксибутират; три двухкомпонентных образца: поли-3-гидроксибутират-со-3-гидроксивалерат, поли-3-гидроксибутират-со-3-гидрогексаноат, поли-3-гидроксибутират-со-4-гидроксибутират; два трёхкомпонентных сополимера: поли-3-гидроксибутират-со-3-гидроксивалерат-со-3-гидрогексаноат; три четырёхкомпонентных сополимера: поли-3-гидроксибутират-со-3-гидроксивалерат-со-4-гидроксибутират-со-3-гидрогексаноат. В качестве полимера сравнения использовали полилактид. Плёнки были изготовлены кастинг методом, в качестве растворителя использовали хлороформ. Методами АСМ был проведен анализ механических и структурных характеристик полимерных плёнок, таких как жёсткость, деформация, адгезия и модуль Юнга. Все образцы имели значения шероховатости больше, чем полилактид, однако образец четырёхкомпонентного сополимера с пониженной концентрацией 4-гидроксибутирата имел наибольшее значение шероховатости. Все образцы характеризовались сходными значениями жёсткости с полилактидом, кроме поли-3-гидроксибутират-со-4-гидроксибутирата,

который демонстрировал наибольшее значение жёсткости. Все двухкомпонентные образцы и образец четырёхкомпонентного сополимера с пониженной концентрацией 4-гидроксibuтирата характеризовались наибольшими сопоставимыми между собой значениями адгезии, в то время как все остальные образцы имели меньшие соизмеримыми между собой значения, кроме полилактида, который демонстрировал самое наименьшее значение адгезии. Образец поли-3-гидроксibuтират-со-4-гидроксibuтирата демонстрировал большее значение модуля Юнга, чем полилактид, в то время как, все остальные образцы были меньшего значения. Наибольшие значения деформации имели образцы гомополимера и четырёхкомпонентных сополимеров, остальные образцы характеризовались значениями деформации больше, чем полилактид.

Выводы

Были исследованы механические свойства и морфология поверхности полимеров с учётом их состава. Показано, что состав полимерных плёнок оказывает существенное влияние на их морфологические и структурные характеристики. Полученные результаты подтверждают возможность направленного регулирования свойств поверхности ПГА путём изменения их химического состава, что делает их перспективными для биомедицинских применений. В дальнейшем планируется исследовать и выявить зависимость между составом полимерных плёнок и их свойствами поверхности методами машинного обучения.

Литература

1. Volova T. G., Kiselev E. G., Nemtsev I. V. et al. Properties of degradable polyhydroxyalkanoates with different monomer compositions // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 182. P. 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.008>.
2. Liang X., Cha D. K., Xie Q. Properties, production, and modification of polyhydroxyalkanoates // *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2024. Vol. 21. P. 200206. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200206>.
3. Joo S., Eom S., Choi Y. et al. Atomic Force Microscopy for Cross-Disciplinary Materials Research // *Small Methods*. 2025. Vol. 9, no. 11. P. 2500514. <https://doi.org/10.1002/smt.202500514>.