

УДК 539.23;678.046

## НАПОЛНЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ОКСИДАМИ МЕТАЛЛОВ

*Касперович О.М., к.т.н., доц., Петрушеня А.Ф., к.т.н., доц.,  
Касперович А.В., к.т.н., доц., Ленартович Л.А., к.т.н., доц.*

*Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

Реферат. В настоящей работе приведены данные по исследованиям влияния введения наполнителей с повышенной теплопроводностью на основе оксидов различных металлов на свойства полиэтилена.

Ключевые слова: теплопроводность, полиэтилен, наполнитель, полимерная матрица, деформационно-прочностные свойства.

Полимерные композиты на основе термопластичных полимеров с повышенной теплопроводностью широко используются в различных отраслях промышленности. Однако, поскольку полимеры обладают низкой теплопроводностью, их использование в приложениях, требующих повышенного теплоотвода ограничено. Для повышения теплопроводности полимерных композиций широко используются наполнители с высокими теплопроводящими свойствами [1, 2]. Наполнитель как один из компонентов играет ведущую роль в формировании основных характеристик КМ. От наполнителя в значительной степени зависят эксплуатационные и технологические свойства композитов и возможности их переработки в изделия. Влияние дисперсного наполнителя на механические и прочие свойства полимера зависит в значительной степени от свойств самого наполнителя и его концентрации. Поэтому для целенаправленного и научно-обоснованного создания ПКМ с заданными свойствами путем наполнения необходимо знать как характеристики наполнителей, так и оптимальные концентрации их введения, исходя из концентрационных зависимостей наиболее важных эксплуатационных характеристик материала.

К тому же не стоит забывать о том, что введение дисперсных наполнителей в полимерную матрицу, способную к кристаллизации, так же будет приводить, как к повышению физико-механических свойств, так и к некоторому повышению теплопроводности за счет упорядочения молекулярной структуры. Однако тут просматривается прямая зависимость степени кристалличности от концентрации наполнителя. При концентрациях порядка 0,1 мас.% наполнители способствуют образованию в полимере большого числа центров кристаллизации, повышая ее скорость. Увеличение концентрации до средних значений (10 мас.%) способствует развитию менее совершенных, чем сферолиты надмолекулярных образований. Дальнейшее увеличение концентрации наполнителей (до 40 мас.%) приводит к тому, что процесс образования более совершенных надмолекулярных структур становится еще более затруднительным. Это обусловлено тем, что при больших концентрациях наполнителей полимер, в основном, находится в виде тонких прослоек между частицами [3].

В качестве перспективных наполнителей для целей повышения теплопроводности полимерных композитов были рассмотрены пудра алюминиевая пигментная, наноксид цинка, оксид титана и оксид магния.

В ходе исследований предстояло определить изменение физико-механических свойств композиций на основе термопластичных полимеров при введении в них наполнителей, обладающих высокой теплопроводностью.

В исследовании использовался полиэтилен марки M3204RUP, который представляет собой линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП), доступный в форме порошка, с показателем текучести расплава 4 г/10 мин, пигментная алюминиевая пудра марки ПАП-2 (ГОСТ 5494-95), с насыпной плотностью 0,15–0,3 г/см<sup>3</sup>, оксид цинка, с размером частиц 21–23 нм, диоксид титана с массовой долей диоксида титана 92 %, насыпной массой 800 кг/м<sup>3</sup>, размером кристаллов 0,25 мкм, оксид магния с насыпной плотностью 3,5 г/см<sup>3</sup>.

Концентрации наполнителей составили от 5 до 60 мас. %.

В работе нам хотелось изучить возможность введения наполнителя в достаточно большом процентном соотношении. Предполагая возможные технологические сложности, связанные со значительным увеличением вязкости и абразивным износом оборудования, было принято решение применить технологию прессования для получения экспериментальных образцов. Однако данный способ имеет сложности с гомогенизацией получаемых композиций и требует, чтобы смеси были подготовлены до стадии прессования соответствующим образом. Получение смеси проводилось по авторской методике.

Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что вводимые наполнители выступают в роли искусственных зародышей структурообразования. Механизм действия добавок заключается в том, что на поверхности твердых частиц зародышеобразователя в результате адсорбции возникают упорядоченные области полимера, играющие роль центров кристаллизации. При этом происходит измельчение сферолитов, распределение их по размерам, повышение плотности упаковки внутри них, увеличение размера кристаллитов, уменьшение гибкости участков макромолекул, находящихся в аморфных областях. Такой характер изменений в надмолекулярной структуре сопровождается повышением прочности при растяжении.

При дальнейшем увеличении концентрации вводимого модификатора на величинах механических характеристик начинают все сильнее сказываться ослабляющие факторы, связанные с ростом менее совершенных сферолитов и других надмолекулярных образований, ухудшением распределения их по размерам. Переход к крупным сферолитам сопровождается появлением большого количества дефектов в виде трещин, проходящих по границам сферолитов. Поэтому после достижения оптимальных значений происходит снижение прочностных характеристик. Таким образом, полученный характер зависимостей механических характеристик от концентрации высокодисперсного наполнителя соответствует данным, приведенным в литературе. Одновременно с увеличением прочности образцов при введении модификаторов наблюдается снижение эластичности и уменьшение относительного удлинения при разрыве.

Разные типы наполнителей оказывают различное влияние на полимерную матрицу, и каждый из них формирует определенный комплекс деформационно-прочностных свойств.

Диоксид титана и оксид цинка приводят к аналогичному влиянию на полимерную матрицу. Введение этих наполнителей приводило к незначительному снижению прочности при растяжении и росту таких характеристик как прочность при разрыве и предел текучести.

В то же время при концентрации наполнителей около 5 мас. % наблюдалось значительное повышение относительного удлинения при растяжении со 110 % до 250 %, после которого следовало резкое снижение этого показателя до 10 % при наполнении более 30 мас. %.

Алюминиевая пудра и оксид магния проявляли аналогичные закономерности. При увеличении содержания наполнителя происходит снижение всех деформационно-прочностных показателей. Однако для алюминиевой пудры при содержании 5 и 10 мас. % наблюдался рост прочности при растяжении с 10 МПа для чистого полиэтилена до 13,5 МПа для наполненной композиции.

Для деформационных характеристик происходило резкое снижение относительного удлинения со 110 % до 20 % уже при 5–10%-ом наполнении композиции.

Модуль упругости всех композиций монотонно возрастал и достигал значений около 1000 МПа при наполнении 50 мас. %

Показатель текучести монотонно снижался. При этом снижение ПТР более выражено для композиций с алюминиевой пудрой и оксидом магния (до 0,3 г/10 мин при 50%-ом наполнении). Для оксида цинка и диоксида титана значения ПТР сохранялись на уровне 2–3 г/10 мин даже при наполнении 50 мас. %.

Таким образом, разработанная методика позволяет получать образцы с достаточно высоким процентом наполнения – до 60 мас. %. Причем наполнители можно разделить по «видам», поскольку ряд из них оказывает аналогичное влияние на деформационно-прочностные свойства полимерной композиции. Дальнейшие работы будут направлены на изучение теплопроводящих свойств разработанных композиций.

#### Список использованных источников

1. Exfoliated hexagonal boron nitride-based polymer nanocomposite with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation / Z. Lin [et al.]. – Compos. Sci. Technol. 2014, –

Vol. 90, – P. 123–128.

2. Wang, X. Preparation of Highly Thermally Conductive Polymer Composite at Low Filler Content via a Self-Assembly Process between Polystyrene Microspheres and Boron Nitride Nanosheets / X. Wang, P. Wu. – ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017. – Vol. 9. – P. 19934–19944.
3. Булдык, Е. П. Свойства полимерных систем, наполненных высокодисперсными кластерами синтетического углерода / Е. П. Булдык [и др.]. – Материалы, технологии, инструменты, № 3, 1998, – С. 41–44.

УДК502.174.1

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФЛОТАЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕСИ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ПЛАСТМАСС

*Ковалева А.А., асп., Кулевец П.С., инж.,  
Левданский А.Э., д.т.н., доц., Опимах Е.В., к.т.н.*

*Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассмотрен способ флотационного разделения смеси измельченных полибутилентерефталата и акрилонитрилбутадиенстирол. Получена зависимость влияния температуры на флотационное разделение смеси измельченных пластмасс. Проведенные исследования позволяют сократить количества пластиковых отходов, поступающих на полигоны захоронения отходов.

Ключевые слова: пластмассовый отход, флотационное разделение, переработка, температура.

В последние годы переработка пластмасс стала серьезной проблемой в связи с увеличением количества пластиковых отходов, образующихся в результате деятельности человека. По данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь ежегодной в нашей стране образуется 280 тыс. тонн пластмассовых отходов. В 2021 г. сбор основных видов вторичных материальных ресурсов (отходы бумаги и картона, отходы стекла, полимерные отходы, изношенные шины, отработанные масла, отходы электрического и электронного оборудования) составил 790,56 тыс. тонн, в том числе 106,61 тыс. тонн полимерных отходов [1], остальные пластмассовые отходы захораниваются на полигонах. Разделение пластмасс является важным этапом в процессе переработки, поскольку позволяет извлечь ценные материалы, которые могут быть использованы в производстве новых продуктов. Одним из наиболее перспективных методов разделения пластмасс является процесс флотационного разделения, который позволяет разделять различные типы пластмасс на основе их плотности [2].

Флотационное разделение пластмасс предполагает использование поверхностно-активных веществ и пенообразователей, которые избирательно адсорбируются на поверхности пластмасс и способствуют их разделению. На эффективность флотационного разделения влияет несколько факторов, включая температуру, рН, тип и концентрацию используемого поверхностно-активного вещества (ПАВ) [3–5].

Температура является одним из наиболее важных факторов, поскольку она влияет на свойства флотационного реагента и кинетику процесса флотации. Исследования показали, что эффективность процесса флотации увеличивается с повышением температуры [3, 4]. Однако повышенная температура также может привести к деградации флотационного агента, что снижает эффективность процесса.

Адсорбция поверхностно-активных веществ на поверхности пластмасс сильно зависит от температуры. При повышении температуры адсорбция ПАВ на поверхности пластика увеличивается, что может привести к повышению эффективности разделения. Однако, если температура слишком высока, поверхностно-активное вещество может стать менее эффективным из-за его деградации.

Кроме того, стабильность пены, которая имеет решающее значение для разделения пластмасс, также зависит от температуры. Стабильность пены снижается при более