

УДК 678.6+541.6

DOI: 10.15372/KhUR2022369

EDN: VNLYZH

Модификация структуры и физико-механических свойств конструкционных полиэтиленов неорганическими добавками

З. А. КОРОТАЕВА¹, Г. Е. СЕЛЮТИН², Б. П. ТОЛОЧКО¹, Л. К. БЕРДНИКОВА¹, А. А. ЖДАНОВ¹, Ф. К. ГОРБУНОВ¹

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск (Россия)

E-mail: z.korotaeva@ngs.ru

²Институт химии и химической технологии СО РАН,
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
Красноярск (Россия)

(Поступила 09.11.21; после доработки 30.12.21)

Аннотация

Представлены результаты исследований порошковых и конструкционных композитов (пластин) на основе полиэтиленов низкой плотности (ПЭВД 15803-020 и LLDPE 6101RQ) и сверхвысокомолекулярного (СВМПЭ компании Braskem) и неорганических добавок (SiC, TiO₂, CaCO₃, SiO₂) в диапазоне концентраций 0.05–70 мас. %. Установлено, что ультрадисперсные неорганические частицы способствуют уменьшению количества кристаллической фазы полимеров и увеличению износостойкости для образцов: СВМПЭ (с содержанием 7 мас. % SiC ($S_{уд} = 10 \text{ м}^2/\text{г}$)) – примерно в 150 раз; ПЭВД 15803-020 (20 мас. % SiC ($S_{уд} = 6\text{--}10 \text{ м}^2/\text{г}$)) – в 2–2.5 раза. Для образцов LLDPE 6101RQ с низким содержанием добавки (0.05–5 мас. % TiO₂, SiO₂, CaCO₃) прочность при разрыве возрастает на 7–24 %, модуль упругости (вдоль) увеличивается в 1.2–1.4 раза, относительное удлинение при разрыве снижается в пределах 13.5–38.0 %. Максимальное увеличение прочности при разрыве наблюдается для образцов с содержанием 20 мас. % SiO₂ и 50 мас. % TiO₂ (на 38.5 и 43.6 % соответственно), при этом относительное удлинение при разрыве снижается в 2.8 и 3.9 раза, а модуль упругости увеличивается в 1.9 и 2.0 раза соответственно. Сравнительные данные по кислородопроницаемости пластин при разных способах смешения исходных компонентов показывают, что для образцов, приготовленных смешением полимера с неорганическими добавками в миксере (количество добавок 5 и 20 мас. %), кислородопроницаемость снижается в пределах 5.6–11.2 %, а для образцов, приготовленных смешением в активаторе АГО-3, – в пределах 16.8–28.7 % по сравнению с исходным образцом.

Ключевые слова: карбид кремния, композит, механохимическая обработка, модифицирование, полиэтилен

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей современного материаловедения является повышение эксплуатационных характеристик материалов. Существенную по объему и значимости группу материалов составляют полимеры и композиты на их основе. Бесспорным лидером на мировом рынке полимерных материалов является полиэтилен. По прогнозам BusinesStat, в 2018–2022 гг. продажи полиэтилена в мире продолжат расти в среднем

на 3.7 % в год и в 2022 г. достигнут 95.2 млн т, что превысит значение 2017 г. на 19.8 % [1]. Ассортимент полиэтилена, как и область его применения, постоянно расширяется. Если раньше традиционный тип – полиэтилен низкой плотности (высокого давления) – применялся в основном в упаковочной отрасли, то в настоящее время его широко используют в электротехнике, автомобилестроении, строительстве и пр. [2].

Линейный полиэтилен низкой плотности (LLDPE) нашел применение в производстве

литьевых изделий, кабельной изоляции, а также в производстве труб. Благодаря прочности, гибкости и неплохой прозрачности LLDPE массово применяется в изготовлении упаковочных пленок. Из него превосходно получают пленки толщиной от 5 мкм, что дает как экономию материала, так и снижает нагрузку на окружающую среду. При производстве пленок основными группами продукции являются стретч-пленки, изготавливаемые на экструзионных линиях и методом раздува, многослойные термоусадочные пленки и пленки под ламинацию [3].

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) благодаря исключительно высоким физико-механическим характеристикам нашел применение в качестве конструкционного материала особенно при работе в экстремальных условиях эксплуатации. Так, в машиностроении СВМПЭ используют для изготовления износостойких футеровок, опорных втулок, направляющих; в пищевой и химической промышленности – для изготовления фильтров, работающих в агрессивных средах; в оборонной промышленности – для изготовления легкой полимерной брони и канатов [4].

Для открытия новых возможностей применения полиэтиленов в настоящей работе исследовано влияние их модификации неорганическими добавками с применением методов механохимии.

Присутствие дисперсной фазы в объеме полимера создает условия для его упрочнения, оказывая влияние на динамику дислокаций. Такой материал можно рассматривать как дисперсно-упрочненный композит. Для упрочнения полимера дисперсными частицами необходимо выполнение следующего условия: частицы модификатора должны смачиваться полимером [5].

Эффективность смачивания неорганических частиц полимерами в настоящем исследовании обеспечивалась двумя способами: во-первых, механохимической обработкой (МО) керамического модификатора; во-вторых, предварительным плакированием (покрытием полимером) вводимых частиц для улучшения их “смачиваемости”. В данной работе это достигалось совместной механической обработкой полимера и модификатора.

Цель работы – разработка новых композиционных материалов с применением методов механохимии на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, полиэтиленов низкой плотности и неорганических ультрадисперсных порошков.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты для модифицирования: сверхвысокомолекулярный полиэтилен СВМПЭ (Braskem, Бразилия) и полиэтилены высокого давления двух марок – ПЭВД 15803-020 (СИБУР-Нефтехим, Россия) и LLDPE 6101RQ (Exxon Mobile™, США).

Карбид кремния предварительно обрабатывали при нормальных условиях в центробежно-планетарной мельнице-активаторе АГО-2 (при 60g) [6] в течение 1 мин (образец SiC-1) и 5 мин (образец SiC-2).

Удельную поверхность ($S_{уд}$, м²/г) порошков определяли методом БЭТ по тепловой десорбции аргона [7].

Характеристики всех применяемых материалов представлены в табл. 1.

Для получения композитов на основе СВМПЭ карбид кремния обрабатывали с порошком по-

ТАБЛИЦА 1

Характеристики исходных материалов

Материал	Марка	$S_{уд}$, м ² /г	ρ , г/см ³
СВМПЭ	Молекулярная масса $6.4 \cdot 10^6$ г/моль	–	0.936
Полиэтилен низкой плотности	ПЭВД 15803-020	–	0.916
Полиэтилен низкой плотности	LLDPE 6101RQ	0.06	0.863
SiC	SiC зеленый 63С, ГОСТ 3647–80	0.3	3.21
SiC-1	»	6.0	–
SiC-2	»	10.0	–
TiO ₂	TR-92 (рутил)	17.1	4.25
CaCO ₃	ГОСТ 4530–76	3.5	2.74
Росил-175 (SiO ₂)	ТУ 2168-038-00204872–2001	155.0	1.96–2.60

Примечания. 1. $S_{уд}$ – удельная поверхность; ρ – плотность. 2. Прочерк – нет данных.

лимера в мельнице-активаторе АГО-2 в течение 20 с, полученную таким образом порошковую композицию вводили в оставшуюся часть полимера при интенсивном перемешивании в миксере. Содержание карбида кремния варьировали в диапазоне 1–20 мас. %.

Порошковые композиции на основе полиэтиленов LLDPE 6101RQ и ПЭВД 15803-020 с содержанием неорганических добавок более 5 мас. % получали совместной обработкой в мельнице-активаторе АГО-3 (60g, 20 с), а с низким содержанием неорганических добавок (≤ 5 мас. %) – различными способами: непосредственным смешением в активаторах; предварительным смешением в миксерах, затем обработкой в активаторах; разбавлением более концентрированных составов с использованием миксера и активатора.

Далее из порошковых композиций получали пластины методом горячего прессования при температуре 180 °С и давлении 6 МПа, с выдержкой 15 мин и последующим охлаждением до комнатной температуры под нагрузкой. Содержание неорганических добавок в полимерах варьировали в пределах 0.05–70 мас. %.

У полученных конструкционных композитов (пластин) определяли следующие физико-механические характеристики: плотность (ρ , г/см³) методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69 [8]; износостойкость для СВМПЭ (сопротивление истиранию при скольжении) – ГОСТ 426-77 [9]; показатель истирания (σ , мм³/м) для композитов из ПЭВД 15803-020 – по ГОСТ 11012-69 [10]; прочность при разрыве и относительное удлинение при разрыве – по ГОСТ 14236-81 [11]; кислородопроницаемость – с помощью анализатора газо- и паропроницаемости TotalPerm (Extrasolution, Италия).

Для изучения структуры порошковых и конструкционных композитов применяли методы

дифференциального термического анализа (ДТА), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР), ИК-спектроскопии.

Исследования методами ДТА и ДСК осуществляли с использованием синхронного термоанализатора JUPITER STA 449S (Netzsch, Германия), методом МУРР – с помощью малоуглового рентгеновского дифрактометра S3-MICRO (Hecus, Австрия). ИК-спектры регистрировали с помощью Фурье-спектрометра “Инфралюм ФТ-081” (Люмекс, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование влияния SiC на физико-механические характеристики конструкционных композитов на основе СВМПЭ

Введение модификатора в СВМПЭ в количестве от 0.05 до 15 мас. % приводит к увеличению износостойкости (рис. 1). При концентрации неорганической добавки 7 мас. % износостойкость увеличивается примерно в 150 раз: при нагрузке 4.5 кг потеря массы исходной пластины из СВМПЭ составляет 9.05 мг, с добавкой SiC-2 – 0.06 мг. По результатам ДСК (табл. 2), степень кристалличности СВМПЭ при МО уменьшается, причем в большей степени – при МО порошка СВМПЭ совместно с модифицирующими добавками. Из работ авторов [12–14] известно, что введение неорганической добавки переводит часть кристаллической фазы полимера в некую промежуточную фазу – приповерхностную или межфазную. В основном материаловеды склоняются к тому, что промежуточная фаза по свойствам более близка к аморфной с участками упорядоченности. Таким образом, уменьшение количества кристаллической фазы поли-

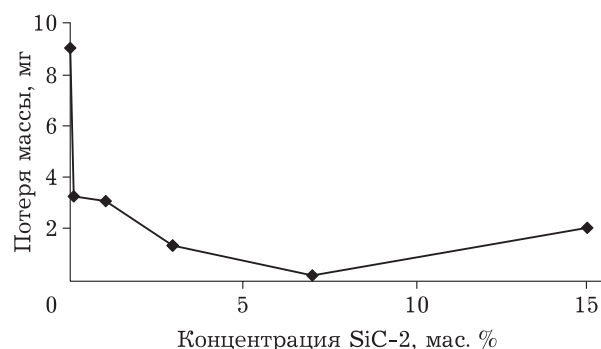


Рис. 1. Зависимость сопротивления истиранию при скольжении пластин на основе СВМПЭ от концентрации добавки SiC-2.

ТАБЛИЦА 2

Данные дифференциальной сканирующей калориметрии для СВМПЭ

Полимер	Температура плавления*, °С	Степень кристалличности, %
СВМПЭ исходный	146.1	76.8
»	145.8	78.3
СВМПЭ, после МО	146.8	70.3
в течение 10 мин	146.9	69.7
СВМПЭ + 7 мас. % SiC-2	146.1	66.3
	145.7	68.3

* Максимум пика на кривых плавления.

мера по результатам ДСК можно объяснить ростом количества аморфных областей. За счет увеличения аморфных областей износостойкость полимера повышается [15, 16], поэтому показатель истирания пластин с добавками меньше, чем без них.

На рис. 2 представлены ИК-спектры порошков: до и после МО исходного СВМПЭ (кривые 1 и 2) и с добавкой SiC-2 в количестве 14 мас. % (кривая 3). По данным ИК-спектроскопии, в результате МО исходного порошка СВМПЭ происходит сужение линий CH_2 -колебаний ($2851, 1432, 712 \text{ см}^{-1}$) с одновременным ростом пиковой интенсивности (см. рис. 2, кривая 2). Однако при совместной МО порошков СВМПЭ и неорганической добавки рост интенсивности указанных линий CH_2 -колебаний значительно выше (см. рис. 2, кривая 3). В работах, посвященных изучению формирования структуры наполненных композитов на основе СВМПЭ [17, 18], наиболее вероятной причиной называют формирование разветвленной структуры промежуточной зоны. Возможно, большая свобода CH_2 -групп в аморфной части приводит к сужению линий, а рост интегральной интенсивности связан с уменьшением фонов-

ных взаимодействий при переходе в аморфную фазу.

По данным МУРР, в результате введения в СВМПЭ добавки SiC-2 в количестве 7 мас. % (рис. 3, кривая 2) наблюдается резкое уменьшение размеров первичных частиц наполненного СВМПЭ по сравнению с размерами первичных частиц исходного СВМПЭ и первичных частиц наполненного СВМПЭ при введении в него 15 мас. % модификатора (см. рис. 3, кривые 1 и 3 соответственно).

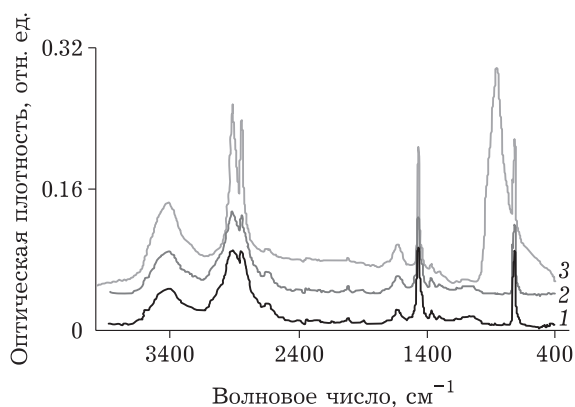


Рис. 2. ИК-спектры порошков СВМПЭ: исходного (1); после МО в течение 10 мин (2); модифицированного 14 мас. % SiC-2, после МО в течение 10 мин (3).

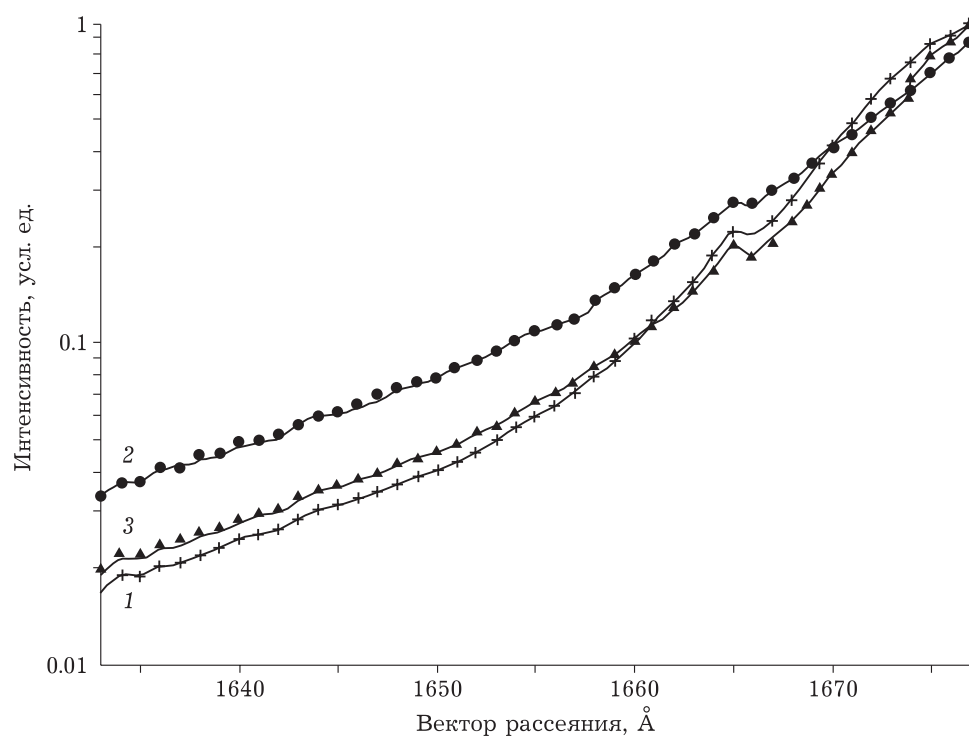


Рис. 3. Данные МУРР пластин: исходного СВМПЭ (1); СВМПЭ с добавкой SiC-2 в количестве 7 (2) и 15 мас. % (3).

*Исследование влияния SiC
на физико-механические характеристики
конструкционных композитов
на основе ПЭВД 15803-020*

В табл. 3 приведены данные по влиянию добавки карбида кремния разной дисперсности на показатель истирания пластин. Увеличение количества введенного модификатора приводит к монотонному повышению износостойкости по сравнению с исходным полиэтиленом: 20 мас. % SiC-1 – в 2.5 раза; 20 мас. % SiC-2 – в 2 раза.

Причина столь значительного увеличения износостойкости пластин из применяемых полимеров может быть объяснена как антифрикционными свойствами модификатора, так и изменением надмолекулярной структуры полимеров.

По данным ДТА, в исходном образце ПЭВД 15803-020 наблюдается тепловой эффект при температуре 140 °С, связанный с плавлением полимера (рис. 4, а). Разложение полимера начинается при 460 °С. После введения в ПЭВД добавки SiC-2 наблюдается дополнительный тепловой эффект в области 400 °С (см. рис. 4, б), что доказывает образование новой фазы, обладающей повышенной термической устойчивостью.

Таким образом, введение карбида кремния как в СВМПЭ, так и в ПЭВД 15803-020 приводит к появлению новой промежуточной фазы.

*Исследование влияния неорганических добавок
на физико-механические характеристики
конструкционных композитов
на основе LLDPE 6101RQ*

Известно, что газопроницаемость полиэтилена низкого давления в четыре раза меньше газопроницаемости полиэтилена высокого давления [19]. Поэтому более показательными являются исследования влияние неорганических добавок на газопроницаемость полиэтилена марки LLDPE 6101RQ.

В табл. 4 представлены физико-механические характеристики пластин (толщина – 920 ± 95 мкм) с различными неорганическими добавками в диапазоне концентраций 0.05–50 мас. % (порошковая смесь предварительно обрабатывалась в мельнице АГО-3 в течение 20 с). Для образцов, содержащих добавки TiO_2 , SiO_2 и CaCO_3 в количестве 0.05–5 мас. %, прочность при разрыве растет в пределах 7–24 %, модуль упругости (вдоль) увеличивается в 1.2–1.4 раза, относительное удлинение при разрыве снижается в пределах 13.5–38.0 %. Максимальное увеличение прочности при разрыве наблюдается для образцов, содержащих 20 мас. % SiO_2 (38.5 %) и 50 мас. % TiO_2 (43.6 %), при этом относительное удлинение при разрыве снижается в 2.8 и 3.9 раза, а модуль упругости увеличивается в 1.9 и 2.0 раза соответственно.

В табл. 5 приведены значения плотности пластин, изготовленных с применением различных режимов предварительной обработки (ак-

ТАБЛИЦА 3

Влияние модифицирования на характеристики пластин на основе ПЭВД 15803-020

Образец	Добавка	Количество добавки, мас. %	Плотность, г/см ³	Показатель истирания, мм ³ /м
1	Без добавки	–	0.916	1.12
2	SiC-1	1	0.926	0.85
3	»	4	0.939	0.84
4	»	7	0.964	0.78
5	»	10	0.985	0.72
6	»	15	1.017	0.55
7	»	20	1.064	0.45
8	SiC-2	1	0.924	1.37
9	»	4	0.935	1.18
10	»	7	0.966	0.98
11	»	10	0.987	0.80
12	»	15	1.019	0.62
13	»	20	1.065	0.59

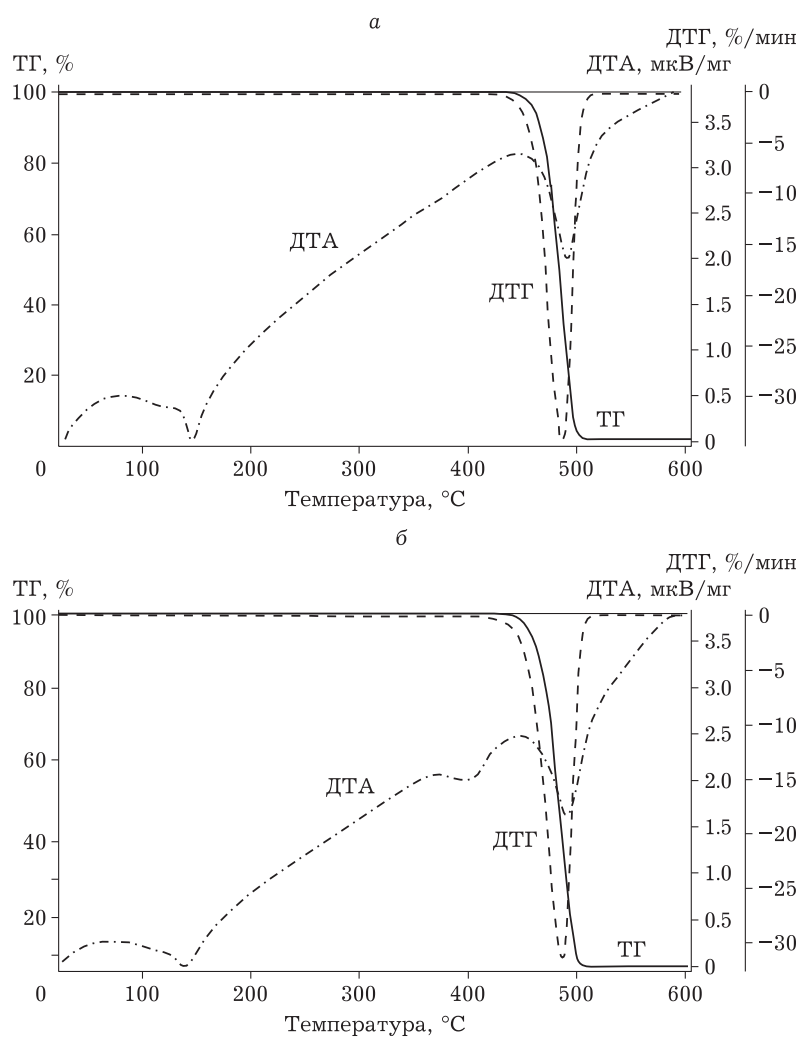


Рис. 4. Данные термического анализа ПЭВД 15803-020: исходного (а) и с добавкой 7 мас. % SiC-2 (б).

ТАБЛИЦА 4

Влияние модифицирования на характеристики пластин на основе LLDPE 6101RQ

Образец	Добавка	Количество добавки, мас. %	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости (вдоль), МПа
1	Без добавки	—	11.7	19.3	250
2	TiO ₂	0.05	13.4	16.0	320
3	»	1	13.6	16.0	330
4	»	5	13.6	15.0	330
5	»	20	13.4	13.4	357
6	»	50	16.8	5.0	500
7	CaCO ₃	0.05	13.6	17.0	310
8	»	1	13.5	17.0	300
9	»	5	13.6	15.0	330
10	»	20	12.5	11.5	344
11	»	50	10.8	2.0	560
12	SiO ₂	0.1	13.6	17.0	330
13	»	5	14.5	14.0	350
14	»	20	16.2	7.0	480

ТАБЛИЦА 5

Влияние модифицирования на плотность пластин на основе LLDPE 6101RQ при разных режимах обработки

Образец	Добавка	Количество добавки, мас. %	Обработка, с		Плотность, г/см ³	Изменение плотности, %
			АГО-3	Миксер		
1	Без добавки	—	—	—	0.863	—
2	SiO ₂	20	20	—	0.911	5.6
3	»	20	40	—	1.060	22.8
4	»	20	60	—	1.080	25.1
5	»	20	—	30	0.989	14.6
6	»	5	20	—	0.916	6.1
7	»	5	40	—	0.953	10.4
8	»	5	60	—	0.951	10.2
9	»	5	—	30	0.950	10.1
10	TiO ₂	70	20	—	1.902	220.4
11	»	70	—	30	1.633	89.2
12	»	20	20	—	1.151	33.4
13	»	20	—	30	1.111	28.7
14	»	5	20	—	0.964	11.7
15	»	5	40	—	0.965	11.8
16	»	5	60	—	0.961	11.4
17	»	5	—	30	0.948	9.8
18	»	1	20	—	0.932	8.0
19	»	1	40	—	0.934	8.2
20	»	1	—	30	0.915	6.0
21	CaCO ₃	20	20	—	1.112	28.9
22	»	20	—	30	1.044	21.0
23	»	5	20	—	0.961	11.4
24	»	5	40	—	0.960	11.2
25	»	5	60	—	0.957	10.9
26	»	5	—	30	0.962	11.5
27	SiC	70	20	—	1.700	97.0
28	»	70	—	30	1.552	79.8
29	»	20	20	—	1.147	32.9
30	»	20	—	30	1.065	23.4
31	»	5	20	—	0.963	11.6
32	»	5	—	30	0.964	11.7

Примечание. Прочерк — отсутствует.

тиватор АГО-2 и миксер). Плотность пластин, полученных из композитов с неорганическими добавками, выше плотности пластин, изготовленных из исходного полиэтилена. При увеличении времени МО порошка-композита (при одном и том же содержании добавки) от 20 до 60 с плотность пластин значительно не меняется, за исключением пластин, содержащих 20 мас. % SiO₂ (плотность повышается с 5.6 до 25.1 %). При этом плотность пластин, полученных с применением обработки в миксере, увеличивается на 14.6 %. При добавке CaCO₃ или SiC в количестве 5 мас. % плотность пластин не за-

висит от способа предварительной обработки порошка.

В табл. 6 представлены сравнительные данные по кислородопроницаемости пластин при разных способах смешения исходных компонентов. Для образцов, приготовленных смешением полимера с неорганическими добавками в миксере (количество добавок 5 и 20 мас. %), наблюдается снижение кислородопроницаемости в пределах 5.6–11.2 % (образцы 3, 5, 7, 9); а для образцов, приготовленных смешением в активаторе АГО-3, — в пределах 16.8–28.7 % (образцы 2, 4, 6, 8) по сравнению с исходным образцом 1.

ТАБЛИЦА 6

Зависимость кислородопроницаемости пластин на основе LLDPE 6101RQ от способа смешения исходных компонентов

Образец	Метод предварительной обработки	Добавка	Количество, мас. %	Толщина, мкм	Кислородопроницаемость, $(\text{cm}^3 \cdot \text{mm})/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ ч})$	Снижение кислородопроницаемости, %
1	—	Без добавки	—	920	143	—
2	АГО-3	CaCO_3	20	1110	102	28.7
3	Миксер	»	20	1089	127	11.2
4	АГО-3	SiO_2	5	996	119	16.8
5	Миксер	»	5	1061	135	5.6
6	АГО-3	TiO_2	5	1007	115	19.6
7	Миксер	»	5	1016	132	7.7
8	АГО-3	SiC	5	1074	110	23.1
9	Миксер	»	5	1000	129	9.8

На рис. 5 показана модель формирования межфазного слоя, который образуется в результате введения дисперсных добавок в матрицу полимера [20]. Из модельного представления следует, что граница раздела двух разнородных фаз представляет собой не поверхность, а межфазную зону, включающую в себя несколько слоев – разрыхленный слой матрицы, межфазный и приповерхностный (толщиной δ_m) слои, структура и характеристики которых отличаются от матричной фазы.

Можно заключить, что изменение структуры СВМПЭ, обнаруженное методами МУРР и ДСК, влияет на эксплуатационные свойства композита. Увеличение износостойкости пластин можно объяснить формированием более устойчивой к износу структуры СВМПЭ за счет уменьшения количества кристаллической фазы.

Введение карбида кремния и в полиэтилен высокого давления марки ПЭВД 15803-020, согласно данным ДТА, приводит к появлению новой фазы.

При исследовании влияния различных неорганических добавок на свойства конструкционных композитов на основе LLDPE 6101RQ показано, что предварительная МО смеси полимера и добавок приводит к значительному улучшению физико-механических характеристик (увеличению прочности при разрыве, снижению газопроницаемости). Определено, что кислородопроницаемость пластин зависит от способа смешения полимера с неорганическими добавками. По-видимому, смешение в активаторе АГО-3 позволяет более равномерно распределить гидрофильные неорганические добавки в гидрофобной матрице полимера, тем самым сформировать более однородную и менее газопроницаемую структуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования порошковых и конструкционных композитов (пластин) на основе полиэтиленов (СВМПЭ компании Braskem, ПЭВД 15803-020 Сибур-Нефтехим, Exxon Mobile™ LLDPE 6101RQ) и неорганических добавок (SiC , TiO_2 , CaCO_3 , SiO_2) в диапазоне концентраций 0.05–70 мас. %.

Физико-химическими методами анализа установлено, что при введении неорганических добавок происходит уменьшение степени кристалличности полимеров, в результате чего изменяются свойства конструкционных композитов: увеличивается износостойкость для образцов СВМПЭ (с содержанием 7 мас. % SiC ($S_{\text{уд}} = 10 \text{ м}^2/\text{г}$)) примерно в 150 раз, для образцов ПЭВД 15803-020 (20 мас. % SiC ($S_{\text{уд}} = 6\text{--}10 \text{ м}^2/\text{г}$)) – в 2–2.5 раза; для образцов

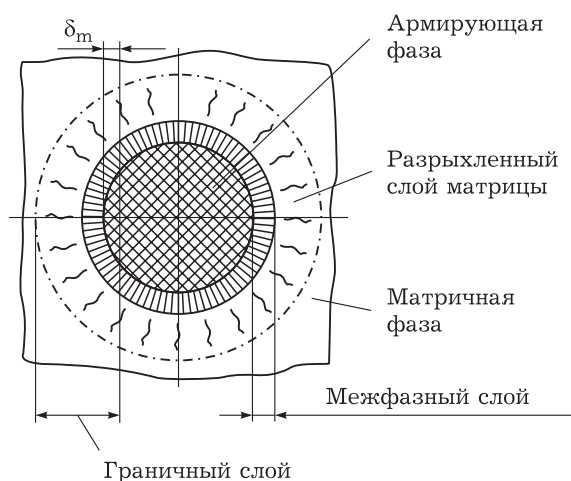


Рис. 5. Модель межфазного слоя в системе полимер – наполнитель [20].

на основе LLDPE 6101RQ, содержащих добавки TiO_2 , SiO_2 и CaCO_3 в количестве 0.05–5 мас. %, прочность при разрыве увеличивается в пределах 7–24 %; модуль упругости (вдоль) увеличивается в 1.2–1.4 раза, относительное удлинение при разрыве снижается в пределах 13.5–38 %.

Максимальное увеличение предела прочности при растяжении наблюдается для образцов на основе LLDPE 6101RQ с содержанием 20 мас. % SiO_2 (38.5 %) и 50 мас. % TiO_2 (43.6 %), при этом относительное удлинение при разрыве снижается в 2.8 и 3.9 раза, а модуль упругости увеличивается в 1.9 и 2 раза соответственно.

Показано влияние способов смешения полимера с неорганическими добавками на кислородопроницаемость пластин на основе LLDPE 6101RQ: образцы, приготовленные в миксере (количество добавок 5 и 20 мас. %), дают снижение кислородопроницаемости в пределах 5.6–11.2 %; образцы, приготовленные смешением в активаторе АГО-3, – в пределах 16.8–28.7 % по сравнению с исходным образцом.

Работа выполнена при поддержке ФЦП по Соглашению № 075-15-2021-1359 от 13.10.2021 г. (Внутренний номер 15.СИН.21.0015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Анализ мирового рынка полиэтилена в 2013–2017 гг., прогноз на 2018–2022 гг. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://businessstat.ru/images/demo/polyethylene_world_2018_demo_businessstat.pdf (дата обращения: 28.10.2021).
- 2 Сейдов А., Аньшаков В., Шкерин Е. Обзор российского рынка полиэтилена // The Chemical Journal. 2003. Февраль. С. 22–25.
- 3 Полиэтилен LLDPE [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nortex-chem.ru/products/polymery/poliiolefiny/polyethylene-lldpe/> (дата обращения: 28.10.2021).
- 4 Михайлин Ю. А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1) // Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии. 2003. № 3. С. 18–21.
- 5 Сабуров В. П., Черепанов А. Н., Жуков М. Ф., Галевский Г. В., Крушенко Г. Г., Борисов В. Т. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 384 с.
- 6 А. с. СССР № 975068, 1982.
- 7 Буянова Н. Е., Карнаухов А. П., Алабужев Ю. А. Определение удельной поверхности дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Институт катализа СО АН СССР, 1978. 74 с.
- 8 ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). М.: ИПК Изд-во стандартов, 1988. 17 с.
- 9 ГОСТ 426–77. Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 8 с.
- 10 ГОСТ 11012–69. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1969. 13 с.
- 11 ГОСТ 14236–81. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1989. 10 с.
- 12 Тагер А. А. Физико-химия полимеров. М.: Химия, 1968. 545 с.
- 13 Вундерлих Б. Физика макромолекул. Кристаллическая структура, морфология, дефекты. М.: Мир, 1976. 311 с.
- 14 Охлопкова Т. А. Триботехнические материалы на основе СВМПЭ, модифицированного наноразмерными оксидными керамиками: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2018. 160 с.
- 15 Машков Ю. К., Полеценко К. Н., Поворзник С. Н., Орлов П. В. Трение и модифицирование материалов трибосистем. М.: Наука, 2000. 280 с.
- 16 Наронгрит С. Повышение износостойкости сверхвысокомолекулярного полиэтилена при абразивном изнашивании, сухом трении и граничной смазке введением неорганических микро- и нанонаполнителей: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2013. 162 с.
- 17 Баронин Г. С., Столин А. М., Пугачев Д. В., Завражин Д. О., Кобзев Д. Е., Козлукова Ю. О., Разинин А. К. Молекулярно-релаксационные и структурно-механические характеристики композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, полученных жидко- и твердофазной экструзией // Физика и техника высоких давлений. 2009. Т. 19, № 2. С. 147–155.
- 18 Жорник В. И., Ковалева С. А., Григорьева Т. Ф., Киселева Т. Ю., Белоцерковский М. А., Таран И. И., Валькович И. В., Витязь П. А., Ляхов Н. З. Формирование структуры высоконаполненных композитов на основе СВМПЭ в условиях интенсивной механической активации для получения радиационно-защитных материалов // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 4 (49). С. 70–78.
- 19 Удыма П. Г. Коррозионностойкие трубопроводы из неметаллических материалов. М.: Госхимиздат, 1963. 220 с.
- 20 Бондалетова Л. И., Бондалетов Л. И. Полимерные композиционные материалы. Ч. 1: Учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 118 с.