

Композиты на основе полипропилена, наполненные стеклянными микросферами и базальтовым волокном Polypropylene composites filled with glass microspheres and basalt fiber

НГУЕН КОНГ ТИНЬ¹, Н.М. ЧАЛАЯ², В.С. ОСИПЧИК¹

NGUEN KONG TINH¹, N.M. CHALAYA², V.S. OSIPCHIK¹

¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

² ОАО «МИПП – НПО «Пластик», Москва

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

² JSC MIPP – NPO Plastic

tshalaya@yandex.ru

Исследованы физико-механические и технологические свойства наполненных базальтовыми волокнами (БВ) и стеклянными микросферами (МС) композитов на основе полипропилена (ПП). Показано, что введение коротких БВ и МС в ПП при обеспечении хорошей адгезии «волокно-матрица» путем использования малеинизированного полипропилена (МАПП) в качестве компатибилизатора приводит к повышению модуля упругости и предела текучести при растяжении. Ударная вязкость композитов улучшается с увеличением содержания волокон в присутствии МС. Повышается текучесть и термомеханическая стабильность разработанных композитов.

Ключевые слова: полипропилен, базальтовое волокно, стеклянные микросферы, малеинизированный полипропилен, модуль упругости, ударная вязкость

The physicochemical and technological properties of polypropylene-based composites filled with basalt fibers (BF) and glass microspheres (GM) are studied.

It is shown that the introduction of short BFs and glass microspheres into PPs while ensuring good “fiber-matrix” adhesion by adding maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) leads to a significant increase in the elastic modulus and tensile yield strength. The impact strength of composites improves with increasing fiber content in the presence of GM. The melt index and thermomechanical stability of the developed composites increase.

Keywords: polypropylene, basalt fiber, glass microspheres, maleic anhydride-grafted polypropylene, elastic modulus, impact strength

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-72-76

Введение

В настоящее время композиты на основе термопластов, армированные минеральным волокном, становятся все более привлекательными для учёных и практиков, благодаря тому, что они имеют ряд преимуществ по сравнению с композитами на основе синтетических волокон, включая хорошую абразивостойкость при переработке, низкое воздействие на окружающую среду, невысокую стоимость и хорошие эксплуатационные свойства [1, 2]. В то же время сочетания различных наполнителей всё больше используются для улучшения механических и технологических свойств различных термопластичных материалов.

Полипропилен продолжает конкурировать с полиэтиленом за звание самого широко используемого полимерного материала благодаря относительно низкой стоимости в сочетании с ценными эксплуатационными и технологическими свойствами [3, 4].

Однако ПП имеет определённые ограничения в применении, когда требуются более высокие механические, физические и/или термические свойства [5]. Для расширения области применения свойства ПП регулируют введением армирующих волокон, минеральных наполнителей, модификаторов, и данное направление является достаточно актуальным.

Стеклянные микросферы (МС) являются неорганическими сферическими минеральными наполнителями [6]. Они представляют собой мелкодисперсные, легкосыпучие тонкостенные порошковые частицы с хорошими термическими свойствами и низкой плотностью [7]. Стеклянные микросферы используются в композиционных материалах для повышения жесткости и стабильности размеров получаемого изделия [8].

Базальтовое волокно минерального происхождения привлекает все больше внимания в качестве армирующего материала по сравнению с традиционными стеклянными и углеродными волокнами [9]. В работе [10] показано, что добавление БВ в композит на основе полиэтилена высокой плотности приводит к улучшению прочности при растяжении и изгибе. В другой работе [11] отмечается, что введение модифицированных базальтовых волокон в композит обеспечило улучшение показателей прочности при изгибе и ударе. Следует учесть, что модификация поверхности волокон или использование объемных модификаций полимерной матрицы могут улучшить адгезию между матрицей и базальтовыми волокнами. В литературных источниках отмечается необходимость использования различных компатибилизаторов, таких как привитой малеиновым ангидридом полипропилен (МАПП) [12].

В литературе имеется недостаточно информации, касающейся термопластичных композитов с базальтовыми волокнами. Кроме того, отсутствуют данные по исследованию свойств трехкомпонентных композитов ПП/БВ/МС, которые составляют основную задачу представленной работы, в которой исследовались физико-механические и технологические характеристики таких композитов.

Целью данной работы является исследование свойств и структуры наполненных короткими базальтовыми волокнами (БВ) и стеклянными микросферами композитов на основе полипропилена (ПП) с использованием малеинизированного полипропилена (МАПП).

Объекты и методы исследования

- В работе были использованы следующие объекты:
- ПП марки PPG1035-08 «Ставролен» с показателем текучести расплава 3,6 г/10 мин ($P = 2,16$ кг, $T = 230^{\circ}\text{C}$).
 - Стекланые микросферы, полые (МС), марки МС-ВП-А9-1Л.
 - МС имеют хорошие реологические характеристики, регулируемую прочность на объемное сжатие и относительно низкую плотность, что позволяет снизить вес изготавливаемых изделий. Микросферы аппретированы γ -аминопропилтриэтоксиланом для улучшения адгезии с полимером. Плотность МС составляет 0,21–0,25 г/см³, диаметр частиц – 40–109 мкм.
 - Рубленые базальтовые волокна (БВ) марки KB-02 производства ООО «Каменный Век» с диаметром монофиламента 13–14 мкм и длиной 3,2 мм, тип замасливателя – силановый.
 - Компатибилизатор – маленинизированный полипропилен (МАПП) марки Exxelor PO 1020 (ExxonMobil), с показателем текучести расплава 430 г/10 мин ($P = 2,16$ кг, $T = 230^{\circ}\text{C}$) и пиковой температурой плавления 162^oC.

Композиционные материалы получали методом компаундирования в расплаве на лабораторном двухшнековом экструдере с температурным профилем 210–220^oC (1 и 2 зоны нагрева) и 210^oC в головке экструдера, со скоростью вращения шнека 85–90 об/мин. Сначала механическим методом смешивали исходные компоненты, а затем полученные материалы загружались в экструдер. Выходящие из головки стренги охлаждались водой и гранулировались с последующей подсушкой при температуре 80^oC. В случае изготов-

ления наполненных базальтовыми волокнами и стеклянными микросферами композитов применяли двукратную экструзию, чтобы достичь равномерного распределения волокон и микросфер в ПП матрице.

Показатели текучести расплава (ПТР) исследуемых материалов определяли на капиллярном вискозиметре ИИРТ-А по ГОСТ 11645-73 при $T = 230^{\circ}\text{C}$ и нагрузке 2,16 кг.

Образцы для физико-механических испытаний получали методом литья под давлением. Испытание на растяжение проводили на разрывной машине Р-5 (Точприбор) по ГОСТ 11262-80 при различных скоростях растяжения зажимов: для определения модуля упругости использовали скорость растяжения зажимов 2 мм/мин, для определения прочностных характеристик – 50 мм/мин.

Ударную вязкость по Шарпи на образцах с надрезом определяли при различных температурах (+23^oC и –10^oC).

Испытание на статический изгиб проводили по ГОСТ 4648-71 при комнатной температуре (+20^oC), расстояние между опорами составляло 6 см.

Термограммы композитов определяли на приборе ДСК по ГОСТ Р 56724-2015 на приборе Netzsch DSC 214.

В работе изготавливали и исследовали наполненные короткими базальтовыми волокнами и стеклянными микросферами композиты на основе полипропилена с использованием МАПП в качестве компатибилизатора. Отношение наполнителей (БВ и МС) к МАПП было фиксировано и равно 1:1, 5:4, 5:3 и 5:2. Для сравнения также изготавливали композит ПП/МАПП/МС (90/5/5, т.е. без БВ).

Таблица 1. Составы исследуемых материалов и их значения ПТР.

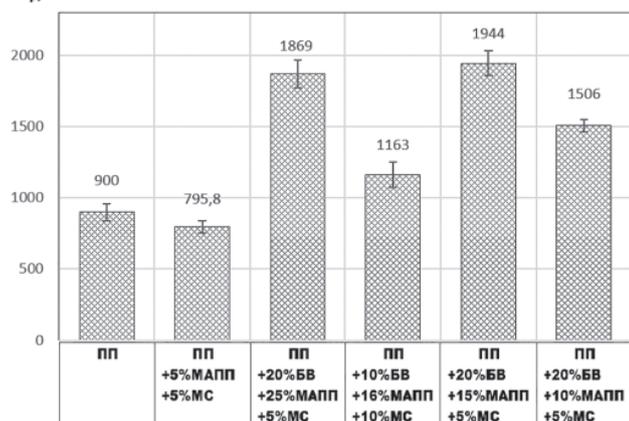
Состав				ПТР, г/10 мин	Примечание
ПП	Базальтовое волокно (БВ)	МАПП	МС		
100	–	–	–	3,3	Исходный ПП
90	–	5	5	6,1	
50	20	25	5	6,6	
64	10	16	10	2,98	фиксировано отношение наполнителей / МАПП = 5:4
68	10	12	10	3,2	
60	15	15	10	3,0	фиксировано отношение наполнителей / МАПП = 5:3
60	20	15	5	3,18	
79	10	6	5	3,2	фиксировано отношение наполнителей / МАПП = 5:2
65	20	10	5	2,24	

Таблица 2. Результаты физико-механических испытаний исследуемых материалов.

Исследуемые образцы	E_p , МПа	σ_T , МПа	ϵ_T , %	ϵ_p , %
ПП	900 (±60)	33 (±1,1)	15 (±1)	90 (±30)
ПП/БВ/МАПП/МС 50 / 20 / 25 / 5	1869 (±100)	68 (±0,7)	11,6(±1,0)	11,7(±1,0)
ПП/БВ/МАПП/МС 60 / 20 / 15 / 5	1944 (±200)	67 (±0,4)	10 (±1,1)	11,5(±1,2)
ПП/БВ/МАПП/МС 65 / 20 / 10 / 5	1506 (±44)	68 (±0,6)	11,2(±0,7)	11,5(±1,5)
ПП/БВ/МАПП/МС 68 / 10 / 12 / 10	1168 (±140)	52 (±0,6)	10,8(±1,0)	11,3(±1,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 79 / 10 / 6 / 5	1295 (±30)	49 (±2,0)	10,4(±0,7)	11 (±1,1)
ПП/МАПП/МС 90 / 5 / 5	796 (±100)	34 (±0,8)	13(±0,6)	18 (±2,5)
ПП/БВ/МАПП/МС 60 / 15 / 15 / 10	1584,5(±150)	58,3(±1,5)	10,4(±1,0)	10,9(±1,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 64 / 10 / 16 / 10	1163 (±90)	48,8(±1,7)	10,2(±1,0)	10,6(±1,0)

E_p – модуль упругости при растяжении; σ_T – предел текучести при растяжении; ϵ_T – относительное удлинение при текучести; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве.

E_p , МПа



σ_T , МПа

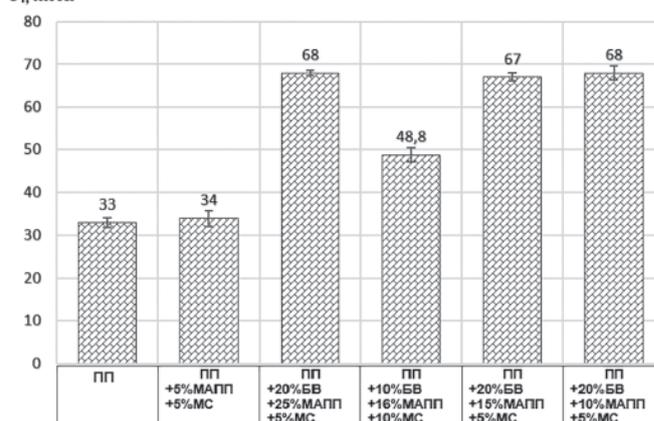


Рис. 1. Диаграмма изменения модуля упругости и предела текучести исследуемых композиций ПП/БВ/МАПП/МС.

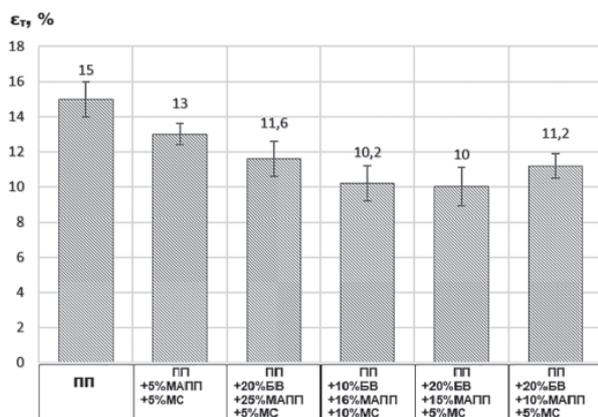


Рис. 2. Изменение относительного удлинения при текучести и при разрыве исследуемых композиций ПП/БВ/МАПП/МС.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты измерений механических свойств на растяжение исследуемых материалов представлены в таблице 2 и изображены на рис. 1 и 2. Было показано, что модуль упругости возрастает с увеличением содержания волокна. Введение 10–20% масс. коротких БВ и 5–10% масс. МС в ПП приводит к повышению модуля упругости и предела текучести при растяжении. Композиты ПП/БВ/МАПП/МС с 10–20% масс. БВ и 5% масс. МС имели эти показатели выше примерно в 2 раза по сравнению с исходным ПП.

Однако добавление волокна привело к снижению величины удлинения при разрыве (табл. 2). Отмечено, что у исследуемых композитов ПП/МАПП/МС (т.е. без БВ), величины удлинения при разрыве больше, чем у композитов ПП/БВ/МАПП/МС.

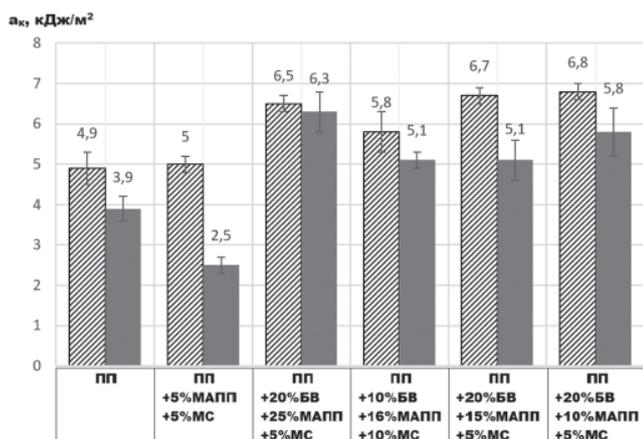


Рис. 3. Диаграмма изменения ударной вязкости исследуемых композиций ПП/БВ/МАПП/МС (образцы с надрезом).

Результаты определения ударной вязкости представлены в таблице 3 и на рис. 3. Из представленных данных видно, что у всех исследуемых композитов ПП/БВ/МАПП/МС ударная вязкость при двух температурах испытания увеличивается при добавлении 10–20% масс. БВ, и она намного выше по сравнению с исходным ПП. Показано, что этот показатель у композитов с короткими БВ 10–20% масс. больше, чем у композитов без коротких БВ (ПП/МАПП/МС – 90/5/5).

Можно предположить, что при испытании на образцах с надрезом в образцах композитов происходит процесс развития трещины, который может существенно замедлиться в присутствии базальтовых волокон, приводящих к удлинению пути распространения трещины, особенно при хорошей адгезии «волокно-матрица», которая в представленной работе обеспечивается добавлением compatibilizатора МАПП [13].

Однако ударная вязкость уменьшается при введении МС. Возможно, это связано тем, что микросферы действуют как поры внутри объемной матрицы.

Механизмы рассеяния энергии, работающие при ударной нагрузке, – это, в основном, разрушение матрицы и волокна, расслоение волокна-матрицы и вытягивание волокон. Если силы адгезии невысоки, то, чем больше содержание наполнителя, тем ниже поглощенная энергия образца, тем ниже ударная вязкость [13].

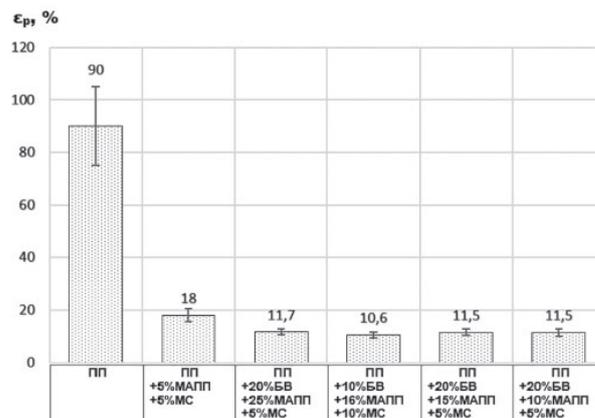


Таблица 3. Ударная вязкость по Шарпи исследуемых материалов при испытании на образцах с надрезом.

Композиты	Ударная вязкость кДж/м²	
	С надрезом	
	При 23°С	При -10°С
ПП исходный	4,9±0,4	3,9±0,3
ПП/МАПП/МС 90-5-5	5,0±0,2	2,5±0,2
ПП/БВ/МАПП/МС 79/10/6/5	6,2±0,5	4,6±0,5
ПП/БВ/МАПП/МС 65/20/10/5	6,8±0,2	5,8±0,6
ПП/БВ/МАПП/МС 60/20/15/5	6,7±0,2	5,11±0,45
ПП/БВ/МАПП/МС 50/20/25/5	6,5±0,2	6,3±0,5
ПП/БВ/МАПП/МС 68/10/12/10	5,2±0,2	4,9±0,3
ПП/БВ/МАПП/МС 60/15/15/10	6,3±0,3	5,3±0,3
ПП/БВ/МАПП/МС 64/10/16/10	5,8±0,5	4,9±0,3

Из результатов измерений механических свойств можно утверждать, что добавление БВ резко увеличивает жесткость пластмассовых деталей (модуль упругости при растяжении и изгибе). Однако при введении стеклянных микросфер модуль упругости при изгибе снижается. Показано, что модуль упругости при изгибе испытанных композитов увеличивается с увеличением содержания БВ. В композитах с максимальным количеством коротких БВ (20% масс.) зафиксировано увеличение модуля упругости при изгибе на 16% (табл. 4, рис. 4).

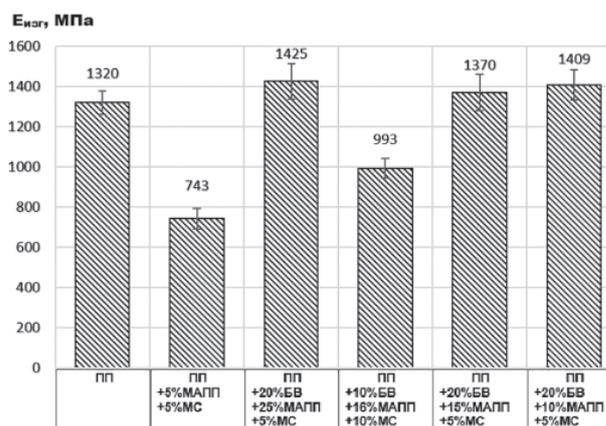


Рис. 4. Модуль упругости при изгибе.

Для оценки предела текучести при сжатии исследуемых композитов было проведено испытание на сжатие литьевых образцов исследуемых материалов как в параллельном, так и в перпендикулярном направлении течения расплава материала в литьевой форме. Результаты испытаний приведены в таблице 4 и на рис.5.

Из результатов измерений можно утверждать, что введение коротких БВ в ПП приводит к заметному увеличению предела текучести при сжатии вдоль направления течения расплава. У композитов с 20% масс. коротких БВ наблюдается повышение предела текучести приблизительно в 2 раза по сравнению с исходным ПП. В то же время предел текучести при сжатии перпендикулярно направлению течения расплава резко увеличивается. Однако при добавлении стеклянных микросфер этот показатель практически не изменился.

Наблюдаемые явления, вероятно, связаны с ориентацией волокон в направлении течения расплава при получении образцов методом литья под давлением.

Предел текучести при сжатии, МПа

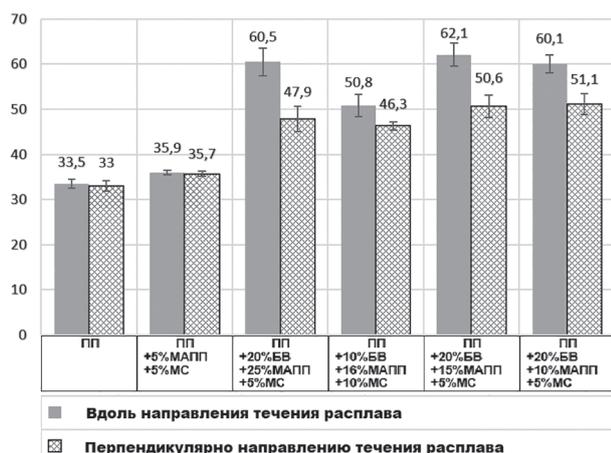


Рис. 5. Изменение предела текучести при сжатии исследуемых композитов ПП/БВ/МАПП/МС.

В работе термостабильность расплава исследуемых материалов оценивали изменением значения ПТР, определенного при нагрузке 2,16 кг после разных времен выдержки расплава при 230°C в капиллярном вискозиметре типа ИИРТ-М.

Из данных таблицы 5 видно, что по сравнению с исходным ПП введение МС в композит вызывает повышение значения ПТР. Так, значение ПТР композиций ПП/МАПП/МС 90/5/5 возрастает практически в два раза по сравнению с исходным ПП. Это можно объяснить тем, что, во-первых, в композиты введен компатибилизатор МАПП с высоким значением ПТР (430 г/10 мин), и, во-вторых, как известно, исходные базальтовые волокна и стеклянные микросферы обработаны замасливателем, который также может играть роль «смазки», снижающей трение между расплавом и стенкой цилиндра

Таблица 4. Модуль упругости при изгибе и предел текучести при сжатии.

Композиты	Модуль упругости при изгибе, (МПа)	Предел текучести при сжатии, МПа	
		Вдоль направления течения расплава	Перпендикулярно направлению течения расплава
ПП исходный	1320 ± 60	33,5 ± 10	33,0 ± 1,1
ПП/МАПП/МС 90/5/5	743 ± 50	35,9 ± 0,5	35,7 ± 0,6
ПП/БВ/МАПП/МС 79/10/6/5	1019 ± 80	50,2 ± 2,5	45,1 ± 2,9
ПП/БВ/МАПП/МС /10/12/10	1074 ± 70	50,4 ± 1,7	45,9 ± 1,6
ПП/БВ/МАПП/МС 5/20/10/5	1409 ± 75	60,1 ± 2,0	51,1 ± 2,3
ПП/БВ/МАПП/МС 0/20/15/5	1370 ± 90	62,1 ± 4,6	50,6 ± 3,5
ПП/БВ/МАПП/МС 0/20/25/5	1425 ± 90	60,5 ± 4,0	47,9 ± 2,8
ПП/БВ/МАПП/МС 4/10/16/10	992,8 ± 50	50,8 ± 2,5	46,3 ± 0,9
ПП/БВ/МАПП/МС 60/15/15/10	1119,4 ± 60	61,0 ± 1,8	48,0 ± 1,0

Таблица 5. Показатель текучести расплава композитов при разном времени выдержки.

Исследуемые образцы	ПТР после разного времени выдержки при 230°C, г/10 мин			
	5 мин	20 мин	40 мин	60 мин
ПП	3,3 (±0,1)	3,34 (±0,1)	3,5 (±0,09)	3,44 (±0,1)
ПП/МАПП/МС 90/5/5	6,1 (±0,2)	4,1 (±0,09)	3,1 (±0,1)	3,1 (±0,09)
ПП/БВ/МАПП/МС 79/10/6/5	3,2 (±0,1)	2,9 (±0,1)	2,8 (±0,09)	2,8 (±0,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 65/20/10/5	2,3 (±0,1)	2,3 (±0,1)	2,3 (±0,09)	2,1 (±0,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 60/20/15/5	3,2 (±0,1)	3,5 (±0,1)	3,3 (±0,1)	3,1 (±0,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 50/20/25/5	6,6 (±0,1)	6,3 (±0,1)	5,3 (±0,1)	5,1 (±0,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 68/10/12/10	3,3 (±0,1)	2,9 (±0,1)	2,7 (±0,1)	2,5 (±0,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 60/15/15/10	3,0 (±0,1)	2,8 (±0,1)	2,1 (±0,1)	2,0 (±0,1)
ПП/БВ/МАПП/МС 64/10/16/10	3,0 (±0,1)	2,7 (±0,1)	2,2 (±0,1)	1,7 (±0,1)

Таблица 6. Значения степени кристалличности и температуры плавления исследуемых композиционных материалов.

Исследуемые материалы	Температура плавления $T_{пл}$ (°C)	Энтальпия плавления (ΔH , Дж/г)	Степень кристалличности χ , %
ПП	168,6	87,47	42,26
ПП/МАПП/МС (90/5/5)	171,0	81,93	39,58
ПП/БВ/МАПП/МС (60/20/15/5)	170,3	66,08	31,92
ПП/БВ/МАПП/МС (50/20/25/5)	170,8	57,52	27,79

вискозиметра ИИРТ-М. Термостабильность расплава также повышается в композиции ПП/БВ/МАПП/МС 65/20/10/5, что позволяет расширить температурный диапазон переработки композитов.

ПТР, г/10 мин

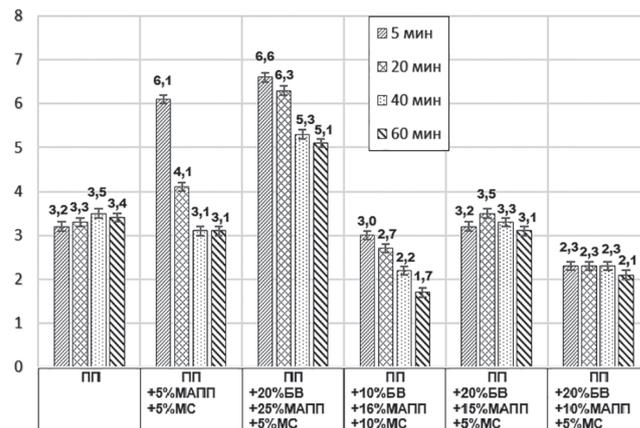


Рис. 6. Изменение показателя текучести расплава (ПТР при нагрузке 2,16 кг после разных времен выдержки при 230°C).

Исследования свойств композитов методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) представлены на рис. 7.

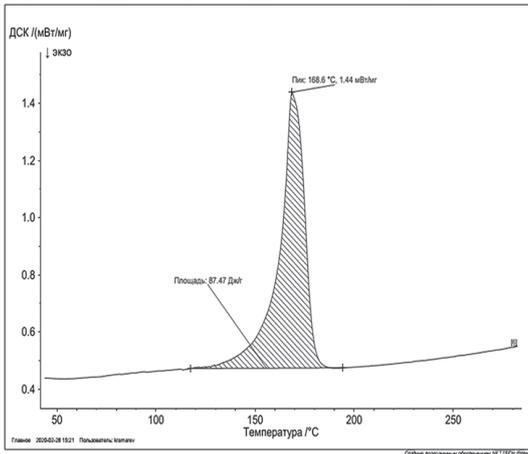
По ДСК-термограммам определяли температуру плавления, энтальпию плавления и степень кристалличности композитов. Последние представляют собой величины, показывающие, какая часть полимера (по массе или объему) является кристаллической.

Степень кристалличности полимера определяется по формуле:

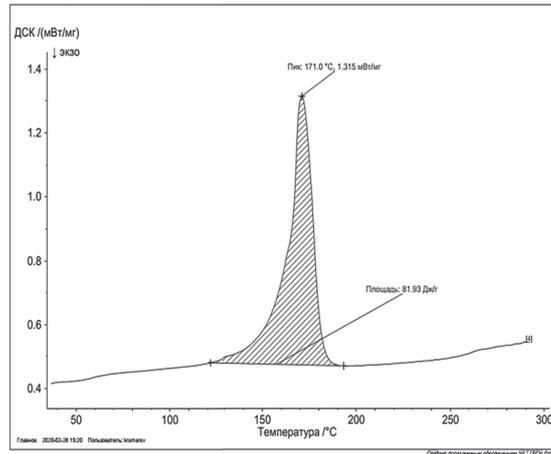
$$\chi = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100\%}} \cdot 100\% ,$$

где ΔH – энтальпия плавления исследуемого полимера, $\Delta H_{100\%}$ – энтальпия плавления полностью кристаллического полимера (информация из справочника). Энтальпия плавления полностью кристаллического ПП равна 207 Дж/г.

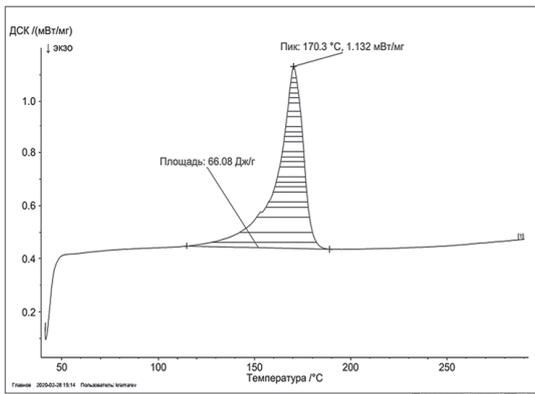
Результаты определения параметров представлены в таблице 6.



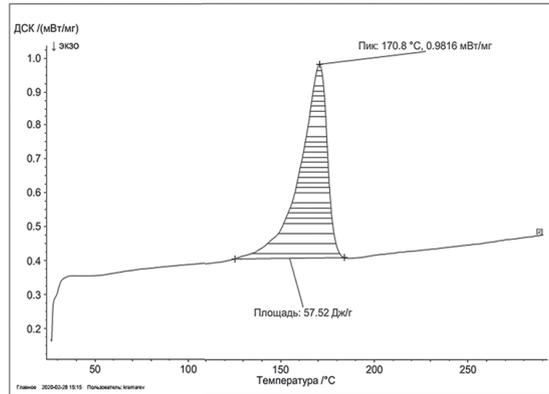
ПП



ПП/МАПП/МС 90/5/5



ПП/БВ/МАПП/МС
60/20/15/5



ПП/БВ/МАПП/МС
50/20/25/5

Рис. 7. ДСК-термограммы.

Исходя из результатов измерений можно утверждать, что добавление базальтовых волокон и стеклянных микросфер в ПП с использованием МАПП приводит к уменьшению степени кристалличности, при этом одновременно температура плавления полученных композиционных материалов незначительно повышается. Таким образом, наполнители повлияли на процессы структурообразования в полимерной матрице.

Заключение

В результате исследований выявлено, что использование 10–20% масс. коротких БВ и 5–10% масс. МС в ПП приводит к повышению модуля упругости и предела текучести при растяжении примерно в два раза по сравнению с исходным ПП. Введение МС в композицию положительно сказывается на увеличении деформационных свойств. Значения ударной вязкости при двух температурах испытания повышаются для всех разработанных составов композитов.

Показано, что модуль упругости при изгибе композитов повышается с увеличением содержания БВ, а у композитов с 20% масс. БВ наблюдается повышение предела текучести при сжатии вдоль направления течения приблизительно в два раза по сравнению с исходным ПП, что, вероятно, связано с ориентацией волокон в направлении течения расплава

Наблюдается улучшение технологических свойств: повышается текучесть и термомеханическая стабильность разработанных композитов, что позволяет увеличить производительность и расширить температурный диапазон их переработки.

Литература

- Almeida Ju'nior JHS. Hybridization effect on the mechanical properties of curaua glass fiber composites / Almeida Ju'nior JHS, Amico S.C // Compos. Part. – 2013. – Vol. 55. – p. 492–497.
- Karaduman Y. Effect of stacking sequence on mechanical properties of hybrid flax/jute fibers reinforced thermoplastic composites / Karaduman Y, Onal L, Rawal A // Polym. Compos. – 2015. – Vol. 36. – p. 2167–2173.

- Pigatto C. Study of polypropylene/ethylene-propylene-diene monomer blends reinforced with sisal fibers / Pigatto C, Almeida Ju'nior JHS // Polym. Compos. – 2012. – Vol. 33. – p. 2262–2270.
- Doumbia A.S. Flax/polypropylene composites for lightened structures: multiscale analysis of process and fibre parameters / Doumbia A.S., Castro M., Jouannet D. // Mater Des. – 2015. – Vol. 87. – p. 331–341.
- Pedrazzoli D. Long-term creep behavior of polypropylene/fumed silica nanocomposites estimated by time-temperature and time-strain superposition approaches / Pedrazzoli D., Pegoretti A. // Polym. Bull. – 2014. – Vol. 71. – p. 2247–2268.
- Hu Y. Silicon rubber/hollow glass microsphere composites: influence of broken hollow glass microsphere on mechanical and thermal insulation property / Hu Y, Mei R, An Z, Zhang J // Compos. Sci. technol. – 2013. – Vol. 79. – p. 64–69.
- Budov V.V. Hollow glass microspheres. Use, properties and technology (review) / Budov V.V. // Glass Ceram. – 1994. – Vol. 51. – p. 7–11.
- Li J. Preparation and characterization of hollow glass microsphere reinforced poly(butylene succinate) composites / Li J, Luo X, Lin X // Mater. Des. – 2013. – Vol. 46. – p. 902–909.
- Goldsworthy, W. B. New Basalt Fiber Increases Composite Potential / Goldsworthy, W.B. // Technol. – 2000. – Vol. 8. – p. 15.
- Chen, J.X. Development of Basalt Fiber Reinforced Wood-Plastic Composite Materials / Chen, J.X.; Guan, S.J.; Zhang, S.H. // Mater. Res. – 2011. – Vol. 46. – p. 189–193.
- Lu, G. Mechanical Properties of Wood Flour Reinforced High Density Polyethylene Composites with Basalt Fibers / Lu, G.; Wang, W.; Shen, S. // Mater. Sc. – 2014. – Vol. 20. – p. 464–467.
- Greco, A. Mechanical properties of basalt fibers and their adhesion to polypropylene matrices / Greco, A.; Maffezzoli, A. // Compos. – 2014. – Vol. 67. – p. 233–238.
- Туан Н.М., Чаяла Н.М., Осипчик В.С. Наполненные короткими базальтовыми волокнами композиты на основе смеси полипропилена и металлоценового этиленпропиленового эластомера // Пластические массы. – 2018. – Vol. 3. – p. 40–45.