

## Получение и переработка полимерных композиционных материалов с полыми стеклянными сферами и разными типами дисперсных структур

### Production and processing of polymer composite materials with hollow glass spheres and various types of dispersed structures

*А.Н. ТРОФИМОВ<sup>2</sup>, И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, А.А. ПЫХТИН<sup>1</sup>, С.И. ШАЛГУНОВ<sup>2</sup>,  
В.И. СОКОЛОВ<sup>2</sup>, К.И. ХАРЛАМОВА<sup>1</sup>, Е.Р. ДЕРГУНОВА<sup>1</sup>*  
*A.N. TROFIMOV<sup>2</sup>, I. D. SIMONOV-EMEL'YANOV<sup>1</sup>, A.A. PYKHTIN<sup>1</sup>, S.I. SHALGUNOV<sup>2</sup>,  
V.I. SOKOLOV<sup>2</sup>, K.I. KHARLAMOVA<sup>1</sup>, E.R. DERGUNOVA<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва, Россия

<sup>2</sup> АО «НПО Стеклопластик», п. Андреевка, Московская обл.

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, Russia

<sup>2</sup> JSC NPO Stekloplastic, Andreevka, Moscow region, Russia

nanocntpolimer@gmail.com

В работе представлены данные о влиянии типа структуры и способа получения (вальцевание и экструзия) на плотность дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) и разрушение полых стеклянных микросфер в высоковязкой матрице полиэтилена низкой плотности.

Для получения легких ДНПКМ рекомендуем использовать ПСМС с плотностью 0,30 г/см<sup>3</sup> МС-ВП-А9(4) с типом структуры СНС-1 и параметром  $\Theta$  от 0,50 до 0,60 об.д. В качестве смесительного оборудования целесообразно использовать двухшнековый экструдер. Плотность дисперсно-наполненных композиционных материалов в этом случае составляет 0,72–0,75 г/см<sup>3</sup>, а снижение массы – ~18–21% относительно исходного ПЭНП.

**Ключевые слова:** дисперсно-наполненные полимерные композиционные материалы, обобщенные параметры структуры, полые стеклянные микросферы, смешение, разрушение полых стеклянных микросфер

The paper presents data on the effect of the type of structure and processing method (rolling and extrusion) on the density of particulate-filled polymer composite materials (DFPCM) and the destruction of hollow glass spheres in a low-density polyethylene matrix.

To obtain light DNPCM, we recommend using PSMS with a density of 0.30 g/cm<sup>3</sup> (MS-VP-A9(4) with the SNS-1 structure type and the  $\Theta$  parameter from 0.50 to 0.60 vol. use a twin-screw extruder The density of particulate-filled composite materials in this case is 0.72–0.75 g/cm<sup>3</sup>, and the weight reduction is ~ 18–21% relative to the original LDPE.

**Keywords:** particulate-filled polymer composite materials, generalized structural parameters, hollow glass microspheres, mixing, destruction of hollow glass microspheres

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-11-12-8-12

Создание легких дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) с высоким модулем упругости и высокой прочностью всегда представляет интерес для конструкторов изделий разного назначения.

Для снижения плотности и массы в полимерные материалы вводят газообразные вещества с образованием пористой структуры закрытого типа – пенопласты, и открытого – пористые материалы, которые хорошо изучены и описаны в работах [1–8].

Таким способом получены уникальные ДНПКМ с плотностью до ~3 м<sup>3</sup>/кг (мипора – М), однако они обладают очень низкой прочностью и модулем упругости (сжатие, растяжение), что существенно ограничивает область их применения.

Использование для создания легких ДНПКМ полых сферических наполнителей различной природы (металлические, керамические и полимерные) позволяет решать многие технические проблемы, при этом прочность композитов остается на достаточно высоком уровне, а модуль упругости существенно возрастает [9–14].

Развитие отечественной промышленности производства стеклянных полых микросфер высокого качества и широкого ассортимента направлено на расширение производства инновационных легких полимерных композиционных материалов [16–18].

В работе [19] с использованием обобщенной модели структуры ДНПКМ были определены ее обобщенные и приведенные параметры, проведена классификация по структурному принципу, а также предложен алгоритм расчета составов и получения легких

полимерных композиционных материалов с полыми стеклянными микросферами (ПСМС).

В отличие от традиционных технологий получения и переработки ДНПКМ на основе высоковязких термопластов с жесткими прочными наполнителями, в материалах с полыми частицами при воздействии напряжений и скоростей сдвига наблюдаются процессы разрушения тонкой оболочки сфер, а также может происходить расслаивание системы (всплытие легких полых сфер). Все это приводит к нарушению структуры и изменению комплекса технологических и эксплуатационных свойств ДНПКМ.

В данной статье рассматриваются основные закономерности получения ДНПКМ с полыми стеклянными микросферами (ПСМС) с разными типами структур в условиях их смешения с высоковязким расплавом полиэтиленовой матрицы на вальцах и двухшнековом экструдере.

В качестве объектов исследования были выбраны отечественные полые стеклянные микросферы разных марок: МС-В-1л с  $\rho_{сф} = 0,215$  г/см<sup>3</sup>, МС-ВП-А9(2) с  $\rho_{сф} = 0,25$  г/см<sup>3</sup>, МС-ВП-А9(4) с  $\rho_{сф} = 0,30$  г/см<sup>3</sup>, МС-ВП-А9 с  $\rho_{сф} = 0,39$  г/см<sup>3</sup>, аппретированные АГМ-9 (АО «НПО Стеклопластик», Россия) и полимерная матрица – полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) марки SABIC LLDPE 218VJ с ПТР = 2,0 г/10 мин (Sabic, Саудовская Аравия).

В составы ДНПКМ не вводили модификаторы, функциональные и реологические добавки, смазки и поверхностно-активные соеди-

Таблица 1. Характеристики полых стеклянных микросфер.

№ п/п	Характеристики стеклянных полых микросфер	Стеклянные полые стеклосферы марки			
		МС-В-1л	МС-ВП-А9(2)	МС-ВП-А9(4)	МС-ВП-А9
1	Истинная плотность 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup> (ГОСТ 18995.1-73)	0,215	0,25	0,30	0,39
2	Насыпная плотность 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup> (ГОСТ 11035.1-93)	0,13	0,14	0,22	0,23
3	Истинная плотность стеклянной оболочки микросфер, 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	2,4	2,4	2,4	2,4
4	Форма частиц	сферическая	сферическая	сферическая	сферическая
5	Коэффициент формы частиц, ( $k_e$ )	2,5	2,5	2,5	2,5
8	Прочность полых микросфер (10% уровень разрушения), не менее, МПа (ГОСТ Р 57963-2017)	–	6,0	7,845	11,278
9	Содержание влаги, не более, % (ГОСТ Р 57964-2017)	–	0,3	0,3	0,3
10	Содержание аппарата АГМ-9 или А-1100, % (ГОСТ Р 57964-2017)	–	0,10–0,35	0,10–0,35	0,10–0,35

нения для проведения эксперимента, приближенного к модельным условиям.

Основные характеристики отечественных полых стеклянных микросфер приведены в таблице 1.

Для проектирования составов ДНПКМ с ПСМС и разными типами дисперсной структуры (разбавленные – РС, низко-наполненные – ННС, средне-наполненные (СНС-1 до предела текучести, СНС-2 – с пределом текучести) и высоконаполненные – ВНС) использовали алгоритм, приведенный в работе [19].

Экспериментально было определено значение максимальной упаковки для всех марок ПСМС (параметр  $\varphi_m$ ), которое составило ~0,62 об.д.

Обобщенный параметр дисперсной структуры  $\Theta$  (доля полимерной матрицы между частицами ПСМС в ДНПКМ) рассчитывали по формуле:

$$\Theta = (\varphi_m - \varphi_n) / \varphi_m, \text{ об.д.} \quad (1)$$

Содержание дисперсной фазы ( $\varphi_n$ ) для каждого типа структуры (РС, ННС, СНС и ВНС) согласно классификации ДНПКМ по структурному принципу определяли как:

$$\varphi_n = (1 - \Theta) \varphi_m, \text{ об.д.} \quad (2)$$

В таблице 2 приведены составы для всех типов дисперсной структуры ДНПКМ с ПСМС при постоянном значении параметра  $\varphi_m \approx 0,62$  об.д.

По уравнению (1) для ДНПКМ были рассчитаны значения обобщенного параметра  $\Theta$  при  $\varphi_m \approx 0,62$  об.д. и разных содержаниях ПСМС, что позволяет провести классификацию дисперсных систем по структурному принципу и представить зависимости различных свойств как функции от обобщенного параметра структуры  $\Theta$  (таблица 2).

Таблица 2. Тип структуры и содержание ПСМС в ДНПКМ с разным типом дисперсной структуры при постоянном значении  $\varphi_m$ .

Тип структуры ДНПКМ	Обобщенный параметр $\Theta$ , об.д.	Содержание ПСМС ( $\varphi_n$ , об.д.) при $\varphi_m \approx 0,62$ об.д.
РС	0,99–0,90	0,006–0,062
ННС	0,90–0,75	0,062–0,155
СНС-1	0,75–0,45	0,155–0,34
СНС-2	0,45–0,20	0,34–0,496
ВНС	0,20–0,0	0,496–0,62

Для проведения эксперимента были выбраны составы ДНПКМ с разными типами структур и ПСМС с различной плотностью (от 0,215 до 0,39 г/см<sup>3</sup>) и содержанием наполнителя: РС-ННС с  $\Theta = 0,90$  об.д. и  $\varphi_n = 0,062$  об.д.; СНС-1 с  $\Theta = 0,60$  об.д. и  $\varphi_n = 0,25$  об.д.; СНС-2 с  $\Theta = 0,40$  об.д. и  $\varphi_n = 0,38$  об.д.; ВНС с  $\Theta = 0,20$  об.д. и  $\varphi_n = 0,49$  об.д.

Полимерные композиционные материалы на основе полиэтилена марки SABIC LLDPE 218BJ, наполненные ПСМС марок МС-В-1л, МС-ВП-А9(4), МС-ВП-А9 получали на вальцах в жестких условиях смешения (температура первого валка – 160°С, второго – 150°С, диаметр валков – 80 мм, расстояние между валками – 0,02 мм, скорость вращения валков – 15 об/мин).

Полые стеклянные микросферы вводили непосредственно в расплав ПЭНП небольшими порциями и тщательно перемешивали.

Для получения ДНПКМ непрерывным методом смешения и определения воздействия рабочих органов экструзионного оборудования на процесс разрушения ПСМС использовали двушне-

ковый экструдер LTE16-40 (Сайнтифик, Таиланд) – отношение  $l/d = 25$ ,  $N_{об} = 150$  об/мин, диаметр фильеры  $d_f = 4$  мм,  $T_p = 220^\circ\text{C}$ .

В качестве дисперсно-наполненного полимерного материала для смешения на экструдере использовали составы на основе полиэтилена марки SABIC LLDPE 218BJ, наполненного ПСМС марок МС-ВП-А9(2) с  $\rho_{сф} = 0,25$  г/см<sup>3</sup> и МС-ВП-А9(4) с  $\rho_{сф} = 0,30$  г/см<sup>3</sup>.

Качество смешения оценивали по данным отклонения плотности (пористость) образцов ДНПКМ от расчетных значений. Плотность образцов определяли по ГОСТ 15139-69. Содержание ПСМС в ДНПКМ контролировали с использованием метода выжигания.

Для ДНПКМ с разным типом дисперсной структуры (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС) по данным плотности полимерной матрицы ( $\rho_n$ ) и ПСМС ( $\rho_{сф}$ ), а также содержания ( $\varphi_{сф}$ ) наполнителя можно рассчитать значение теоретической плотности полимерных композиционных материалов ( $\rho_{км}$ ) для всех исследованных составов и структур:

$$\rho_{км} = \varphi_{сф} \rho_{сф} + (1 - \varphi_{сф}) \rho_n \quad (3)$$

Пористость ДНПКМ рассчитывали по данным экспериментальной и расчетной плотности как:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_{экс}}{\rho_{км}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

где  $\Pi$  – пористость;  $\rho_{экс}$  – экспериментальная плотность, (г/см<sup>3</sup>);  $\rho_{км}$  – расчетная плотность, (г/см<sup>3</sup>).

О разрушения ПСМС в процессе смешения с ПЭНП на вальцах и экструдере судили по изменению плотности и пористости, полученных образцов.

На рис. 1 приведена зависимость плотности ДНПКМ с ПСМС марки МС-ВП-А9(2) плотностью 0,215 г/см<sup>3</sup> (вальцы) от обобщенного параметра  $\Theta$ .

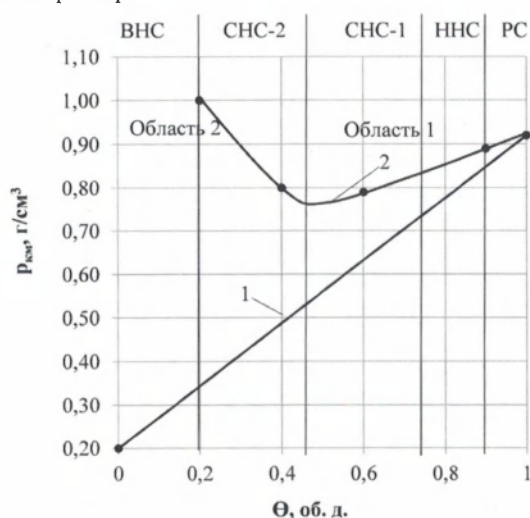


Рис. 1. Зависимость расчетной (1) и экспериментальной (2) плотности ДНПКМ (вальцы) на основе ПЭНП + ПСМС с плотностью 0,215 г/см<sup>3</sup> от обобщенного параметра  $\Theta$ .

На кривой 2 (рис. 1) можно выделить две характерные области: первая –  $\Theta$  от 1,0 до 0,45 об.д. и вторая –  $\Theta$  от 0,45 до 0,20 об.д. В первой области происходит снижение плотности ДНПКМ при введении ПСМС, а пористость образцов не превышает ~6%, а во второй – плотность ДНПКМ возрастает, что сопровождается разрушением ПСМС.

При введении самых легких ПСМС марки МС-ВП-А9(2) происходит максимальное снижение плотности ДНПКМ с 0,93 г/см<sup>3</sup> (плотность ПЭНП) до 0,76 г/см<sup>3</sup> (на ~18,5%), причем общая пористость снижается при уменьшении обобщенного параметра  $\Theta$  от 1,0 до 0,45 об.д. (рис. 1 первая область, кривая 2), что характерно для типов структур РС, ННС и СНС-1.

В области перехода структуры ДНПКМ от СНС-1 к СНС-2 ( $\Theta \leq 0,45$  об.д.) и ВНС ( $\Theta \leq 0,20$  об.д.) наблюдается резкий рост плотности ДНПКМ при введении ПСМС (с 0,76 до 1,0 г/см<sup>3</sup>), что указывает на катастрофическое разрушение полых стеклянных сфер в процессе смешения на вальцах с ПЭНП (вторая область, кривая 2).

Аналогичные исследования были проведены с ПСМС марок МС-ВП-А9(4) и МС-ВП-А9, различающихся плотностью –  $\rho_{сф} = 0,30$  г/см<sup>3</sup> и 0,39 г/см<sup>3</sup> соответственно.

На рис. 2 а, б приведены зависимости экспериментальной плотности ДНПКМ на основе ПЭНП + ПСМС с плотностью 0,30 (а) и 0,39 г/см<sup>3</sup> (б) от обобщенного параметра  $\Theta$ .

На рис. 2б приведена зависимость плотности ДНПКМ с ПСМС марки МС-ВП-А9 с максимальной плотностью  $\rho_{сф} = 0,39$  г/см<sup>3</sup> от обобщенного параметра  $\Theta$ .

С увеличением плотности ПСМС их прочность возрастает [20], и можно ожидать, что при смешении с высоковязкими расплавами термопластических полимеров в жестких условиях вальцевания такие полые сферы не будут разрушаться.

Так, при использовании в качестве наполнителя полых стеклянных микросфер марки МС-ВП-А9 с  $\rho_{сф} = 0,39$  г/см<sup>3</sup> разрушение ПСМС в жестких условиях смешения на вальцах практически не наблюдается, и отклонение плотности от аддитивного значения не превышает ~7% (рис. 2б).

При этом на кривой 2 нет разделения на два участка, как это было показано на рисунках 1 и 2а, и плотность ДНПКМ монотонно снижается с изменением типа структуры от РС до ВНС – от  $\Theta = 0,9$  до 0,20 об.д., а ее минимальное значение достигает ~0,67 г/см<sup>3</sup> при  $\Theta = 0,20$  об.д., что на 28% ниже плотности исходного ПЭНП.

Экспериментально установлено, что при использовании для создания легких ДНПКМ с ПСМС плотностью 0,20–0,30 г/см<sup>3</sup> при смешении на вальцах можно снизить  $\rho_{экс}$  на ~25% при условии формирования структуры типа СНС-1 с  $\Theta = 0,40–0,45$  об.д.

Совершенно очевидно, что более легкие ПСМС при смешении на вальцах разрушаются в большей степени, однако это происходит для всех ДНПКМ при формировании квазинепрерывного каркаса из дисперсных частиц при переходе структуры типа СНС-1 (до предела текучести) в СНС-2 (с пределом текучести) при  $\Theta \approx 0,40–0,45$  об.д.

Для плотных ПСМС ( $\rho_{сф} = 0,39$  г/см<sup>3</sup>) экспериментальная плотность  $\rho_{экс}$  ДНПКМ снижается с 0,93 до 0,67 г/см<sup>3</sup> (на ~28%) с уменьшением обобщенного параметра  $\Theta$  от 0,99 до 0,20 об.д. (кривая 2), и полые сферы не разрушаются. В этом случае с увеличением содержания ПСМС пористость образцов несколько возрастает, а плотность снижается во всем диапазоне составов и для всех типов структур ДНПКМ (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС).

Для получения легких высокотехнологичных литевых и экструзионных ДНПКМ на основе ПЭНП + ПСМС значение обобщенного параметра  $\Theta$  не должно быть менее 0,45 об.д. (тип структуры СНС-1).

Сравнивая полученные результаты по  $\rho_{экс}$  ПЭНП + ПСМС с разной плотностью 0,215, 0,30 и 0,39 г/см<sup>3</sup>, можно заключить, что наиболее целесообразно использовать для получения легких ДНПКМ полые стеклянные микросферы марки МС-ВП-А9(4) с  $\rho_{сф} = 0,30$  г/см<sup>3</sup>. В этом случае удается получить наиболее легкие ДНПКМ (с  $\Theta = 0,45$  об.д.) именно с ПСМС марки МС-ВП-А9 (4) с  $\rho_{сф} = 0,30$  г/см<sup>3</sup> – плотность составляет ~0,70 г/см<sup>3</sup>, а для полых сфер с  $\rho_{сф} = 0,39$  г/см<sup>3</sup> – плотность  $\rho_{экс} = 0,75$  г/см<sup>3</sup>.

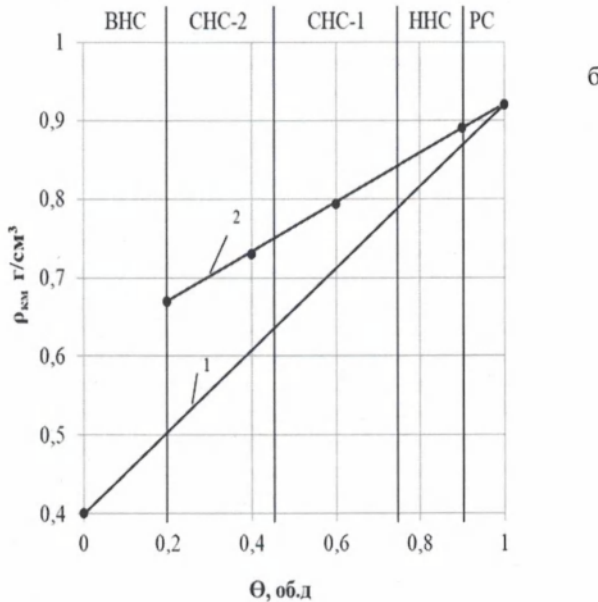
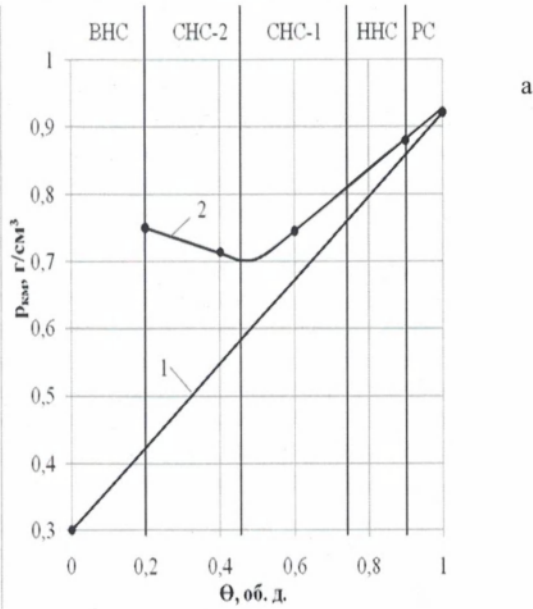


Рис. 2. Зависимость расчетной (1) и экспериментальной (2) плотности ДНПКМ, полученных на вальцах на основе ПЭНП + ПСМС с плотностью 0,30 (а) и 0,39 г/см<sup>3</sup> (б) от обобщенного параметра  $\Theta$ .

При использовании ПСМС марки МС-ВП-А9(4) с  $\rho_{сф} = 0,30$  г/см<sup>3</sup> минимальная плотность ДНПКМ составляет ~0,70 г/см<sup>3</sup> при  $\Theta \approx 0,45$  об.д. и снижается на ~25% относительно ПЭНП. Дальнейшее увеличение содержания ПСМС и уменьшение  $\Theta$  с 0,45 до 0,20 об.д. сопровождается ростом плотности, связанным с катастрофическим разрушением полых сфер, однако рост ее незначительный – с 0,70 до 0,75 г/см<sup>3</sup> (тип структуры СНС-2 и ВНС).

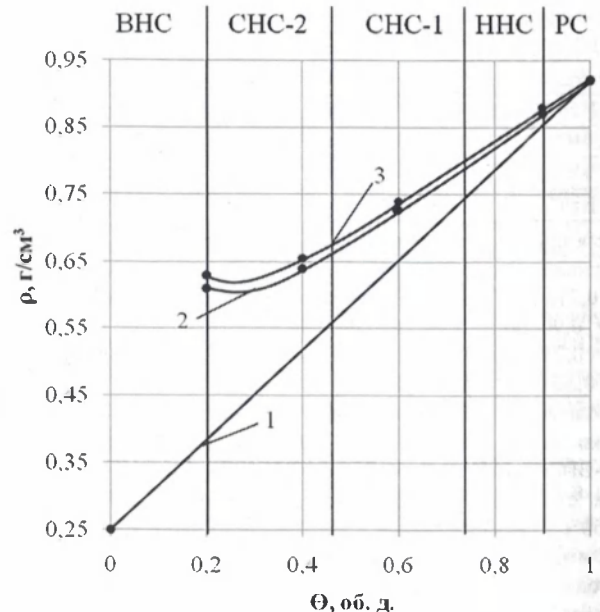


Рис. 3. Зависимость расчетной (1) и экспериментальной (2, 3) плотности ДНПКМ (экструдер) на основе ПЭНП + ПСМС с  $\rho_{сф} = 0,25$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho_{сф} = 0,30$  г/см<sup>3</sup> от обобщенного параметра  $\Theta$ .

В современном производстве ДНПКМ для смешения, как правило, используется непрерывная технология смешения в двухшнековых экструдерах.

На двухшнековом экструдере LTE16-40 были получены ДНПКМ на основе ПЭНП и ПСМС марок МС-ВП-А9(2) с  $\rho_{сф} = 0,25 \text{ г/см}^3$  и МС-ВП-А9(4) с  $\rho_{сф} = 0,30 \text{ г/см}^3$ , для которых на рис. 3 приведены зависимости плотности от обобщенного параметра  $\Theta$ .

Показано, что при смешении в двухшнековом экструдере при переходе от типа структуры СНС-1 к СНС-2 и ВНС (при  $\Theta = 0,20-0,45$  об.д.) полые стеклянные сферы практически не разрушаются в процессе переработки, и значения пористости не превышают 8%. Минимальная плотность ДНПКМ при введении ПСМС составляет: для МС-ВП-А9(2) –  $0,61 \text{ г/см}^3$  (при  $\Theta = 0,20$  об.д.), а для МС-ВП-А9(4) –  $0,63 \text{ г/см}^3$  (при  $\Theta = 0,20$  об.д.), что позволяет снизить плотность относительно ПЭНП на 34 и 32% соответственно.

Следует отметить, что при изменении типа структуры ДНПКМ от СНС-1 к СНС-2 и уменьшении обобщенного параметра  $\Theta \leq 0,45$  поверхность экструдата становится шероховатой и содержит дефекты. Для переработки таких ДНПКМ методом экструзии необходимо использовать процессинговые добавки и внешние смазки.

На рис. 4 приведены зависимости пористости ДНПКМ на основе ПЭНП + ПСМС от обобщенного параметра  $\Theta$ .

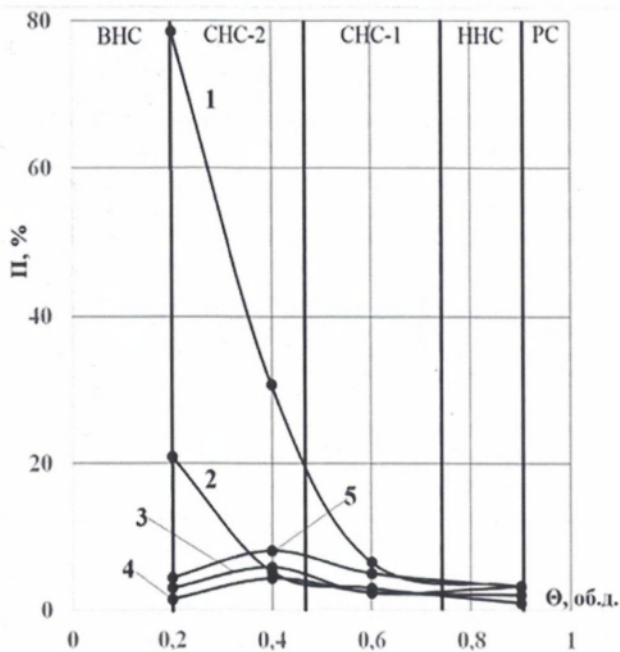


Рис. 4. Зависимость П для ДНПКМ на основе ПЭНП + ПСМС, полученных на вальцах (1–3) и двухшнековом экструдере (4, 5) от обобщенного параметра  $\Theta$ : 1 – МС-В-1л с  $\rho_{сф} = 0,215 \text{ г/см}^3$ ; 2 – МС-ВП-А9(4) с  $\rho_{сф} = 0,30 \text{ г/см}^3$ ; 3 – МС-ВП-А9 с  $\rho_{сф} = 0,39 \text{ г/см}^3$ ; 4 – МС-ВП-А9(2) с  $\rho_{сф} = 0,25 \text{ г/см}^3$ ; 5 – МС-ВП-А9(4) с  $\rho_{сф} = 0,30 \text{ г/см}^3$ .

Изменение пористости указывает на хорошее качество смешения и на разрушение ПСМС на вальцах (кривые 1–3) и в экструдере (кривые 4 и 5).

Следует отметить, что при изменении типа структуры ДНПКМ от СНС-1 к СНС-2 и уменьшении обобщенного параметра  $\Theta \leq 0,45$  поверхность экструдата становится шероховатой и содержит дефекты. Для переработки таких ДНПКМ методом экструзии необходимо использовать процессинговые добавки и внешние смазки.

Как было показано в работе [21] с увеличением содержания ПСМС и уменьшением обобщенного параметра  $\Theta \leq 0,45$  об.д. происходит резкое нарастание вязкости расплава ДНПКМ ~ 4-5 раз (от РС → СНС-2), а при достижении значения  $\Theta = 0,20$  об.д. (от РС → ВНС) – в ~10–15 раз, что вызывает существенные трудности при переработке.

Таким образом при разработке легких ДНПКМ, перерабатываемых методом литья под давлением необходимо выбирать составы с типом структуры СНС-1 и обобщенным параметром  $\Theta$  от 0,50 до 0,60 об.д., а для переработки методом экструзии – СНС-2 с  $\Theta =$  от 0,20 до 0,45 об.д.

При получении ДНПКМ в жестких условиях вальцевания на оболочку ПСМС оказывается более высокая нагрузка (сдвиговые напряжения), чем при экструзии [22–27], что приводит к разрушению полых сфер при формировании квазинепрерывного каркаса из дисперсных частиц в объеме полимерной матрицы и структуры СНС-2 ( $\Theta \approx 0,45$  об.д.).

В связи с этим, можно сделать вывод о том, что методом экструзии можно получать составы легких ДНПКМ с ПСМС со структурой СНС-2 и минимальной плотностью ~ $0,61 \text{ г/см}^3$  при  $\Theta < 0,40$  об.д. без разрушения ПСМС и снизить плотность материала на ~34%.

Для получения легких ДНПКМ рекомендуем использовать ПСМС с плотностью  $0,30 \text{ г/см}^3$  (МС-ВП-А9(4) с типом структуры СНС-1 и параметром  $\Theta$  от 0,50 до 0,60 об.д. В качестве смешительного оборудования целесообразно использовать двухшнековый экструдер. Плотность дисперсно-наполненных композиционных материалов в этом случае составляет –  $0,72-0,75 \text{ г/см}^3$ , а снижение массы составляет ~18–21% относительно исходного ПЭНП.

### Заключение

Впервые получены данные о влиянии типа дисперсной структуры (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС) и метода смешения (вальцы и двухшнековой экструдер) при получении ДНПКМ на основе ПЭНП + ПСМС на плотность композита и процесс разрушения полых стеклянных микросфер с разной начальной плотностью (от 0,215 до 0,39  $\text{г/см}^3$ ) в высоковязкой полиэтиленовой матрице.

Показано, что для получения высокотехнологичных легких ДНПКМ на основе ПЭНП + ПСМС ( $\Theta \approx 0,50-0,60$  об.д. и тип структуры СНС-1) как на вальцах, так и на двухшнековом экструдере следует использовать ПСМС марки МС-ВП-А9(2) с  $\rho_{сф} = 0,30 \text{ г/см}^3$ , при этом можно достичь минимальных значений плотности ДНПКМ равной ~ $0,7 \text{ г/см}^3$ , что ~ на 25% меньше, чем у исходного ПЭНП марки SABIC LLDPE 218BJ, и с пористостью не более 6–8%.

Установлено, что при разработке легких ДНПКМ, перерабатываемых методом литья под давлением, необходимо выбирать составы с типом структуры СНС-1 и обобщенным параметром  $\Theta$  от 0,50 до 0,60 об.д., а для экструзии – СНС-2 с  $\Theta$  от 0,20 до 0,45 об.д.

### Литература

1. Байков А.В. Численное моделирование упругого поведения синтактовых композитов на основе полых стеклянных микросфер при растяжении. / Байков А.В., Турусов Р.А., Трофимов А.Н., Плешков Л.В. // Проблемы прочности и пластичности. 2021, №1, С. 22–34.
2. Трофимов А.Н. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 1. О размерах промышленных полых стеклянных микросфер. / Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В., Стогова И.В. // Пластические массы. 2020, №11–12, С. 15–19.
3. Краев И.Д., Сорокин А.Е., Нырцов А.В., Шипин Н.О., Краева А.А., Титкова Ю.М. Пенопласты, предназначенные для обеспечения поглощения акустических волн в широком диапазоне частот // Труды ВИАМ. 2018. №1 (61) С. 82–91.
4. Куриленко А.В. Особенности шумопоглощающих свойств и акустические характеристики шумозащитных экранов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. №2. С.87–93.
5. Низамов Т.А. Синтез гидроксилсодержащих фурановых олигомеров и жестких пенополиуретанов на их основе // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2022. №85. С. 13–16.
6. Тарасов И.Ю., Христофорова И.А. Применение полимерных теплоизоляционных материалов в гражданском и промышленном строительстве // Современное строительство и архитектура. 2022. №2 (26). С. 4–7.
7. Шульдешов Е.М. Звукоизоляционные свойства авиационных теплозвукоизоляционных материалов // Труды ВИАМ. 2019. №12 (84). С. 37–44.
8. Заливин В.Г. Разработка композиций отверждаемых пен для тампонирувания скважин // Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2019. №3 (68). С. 336–348

9. Плешков Л.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 2. О взаимосвязи геометрии полых стеклянных микросфер и их потребительских свойств. / Плешков Л.В., Трофимов А.Н., Байков А.В., Смирнов А.А. // Пластические массы. №1–2, 2021. С. 33–37.
10. Додонов П.А. Статистический подход к описанию напряженного состояния микроструктуры сферопластика // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. №2 (400). С. 40–50.
11. Мишуров К.С., Паярель С.М., Курносое А.О., Боков В.В. Физико-механические свойства сферопластика марки ВПЗ-24 с температурой эксплуатации до 320°C // Труды ВИАМ. 2022. №4 (110). С. 52–60.
12. Додонов П.А. Эффективные свойства гетерогенного материала типа сферопластик при наличии пористости и поврежденной структуры // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. №1 (399). С. 65–74.
13. Федонюк Н.Н., Додонов П.А. Структурная модель деформирования и разрушения гетерогенных материалов типа сферопластика при действии гидростатического давления // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. №2 (396). С. 37–50.
14. Марамыгин А.В. Модифицированная эпоксидная композиция для изготовления теплозащитного покрытия // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2020. №63. С. 87–95.
15. Горенберг А.Я. / Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 3. О толщине стенок промышленных полых стеклянных микросфер. / Горенберг А.Я., Трофимов А.Н., Иванова-Мумжиева В.Г., Плешков Л.В., Байков А.В. // Пластические массы. 2021, №3–4, С. 32–36.
16. Трофимов А.Н. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 4. О кинетике разрушения полых стеклянных микросфер под действием гидростатического давления и методах повышения их прочности. / Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В. // Пластические массы. 2021, №5–6, С. 44–46.
17. Trofimov A.N. Hollow glass microspheres for high strength composite cores. / Trofimov A.N., Pleshkov L.V., Back Haslen // Reinforced Plastics. Volume 50, Issue 7, 2006, P. 44–50.
18. Трофимов А.Н., Симонов-Емельянов И.Д., Шалгунов С.И. Характеристики полых стеклянных микросфер и проектирование различных типов дисперсной структуры и составов легких полимерных композиционных материалов / В.И. Соколов, К.И. Харламова, Е. Р. Дергунова, А.А. Пыхтин // Известия Национальной академии наук Беларуси. 2023. №1.
19. Симонов-Емельянов И.Д. Расчет составов наполненных полимерных композиционных материалов с различными типами решеток и параметрами структур. // Пластические массы. 2020. №1–2. С. 4–7.
20. Трофимов А.Н., Зарубина А.Ю., Симонов-Емельянов И.Д. Структура, обобщенные параметры и реологические свойства эпоксидных сферопластиков // Пластические массы. 2014. №11–12. С. 3–8.
21. Кречетов Д.Д., Ковалева А.Н., Симонов-Емельянов И.Д. Реологические свойства дисперсно-наполненных термопластов // Пластические массы. 2020. №9–10. С. 19–22.
22. Клинков А.С., Соколов М.В., Полушкин Д.Л., Шашков И.В., Беляев П.С., Туляков Д.В. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом // Вестник ТГТУ. 2008. №4. С. 870–880.
23. Хайруллина Г.М., Енейкина Т.А., Ляпин Н.М., Хацринов А.И., Гатина Р. Ф. Проблемы получения тонкосводных дискообразных порохов вальцеванием сферических порохов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №8. С. 409.
24. Абдуллин И.Ш., Ибрагимов Р.Г., Зайцева О.В., Вишнеvский В.В., Осипов Н.В., Шараев Ю.В. Технология каландрования полимеров для изготовления тканей с мембранным покрытием // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №13. С. 102–109.
25. Макаров В.Г., Синельникова Р.М., Дюльдина М.В., Александров А.П. Изменение свойств стабилизированного полиэтилена высокой плотности в процессе теплового окисления // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2007. №6. С. 46–50.
26. Жаров А.А. Реакционная способность мономеров и других органических соединений в твердой фазе при высоком давлении и деформации сдвига // ВМС. Серия Б. 2004. №9. С. 1613–1634.
27. Лаас А.А., Рудаков Г.О., Пышноград Г.В., Кошелев К.Б. Структурно-феноменологическая реологическая модель для инженерных расчетов течений полимерных сред // Известия АлтГУ. 2022. №4 (126). С. 115–122.