

# Высокотехнологичные легкие литые полимерные композиционные материалы с полыми стеклянными микросферами на основе термопластов

## Thermoplastics-based high-tech lightweight injection-molding polymer composites filled with hollow glass microspheres

*И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, А.Н. ТРОФИМОВ<sup>2</sup>, Д.А. ЕРМОЛАЕВ<sup>1</sup>,  
Д.А. ТРОФИМОВ<sup>2</sup>, С.И. ШАЛГУНОВ<sup>2</sup>, А.А. ЮРКИН<sup>1</sup>, А.А. ПЫХТИН<sup>1</sup>,  
К.И. ХАРЛАМОВА<sup>1</sup>, Ю.А. САВИЦКАЯ<sup>1</sup>, С.С. ЗАЙЦЕВ<sup>1</sup>*  
*I.D. SIMONOV-EMELIANOV<sup>1</sup>, A.N. TROFIMOV<sup>2</sup>, D.A. ERMOLAEV<sup>1</sup>,  
D.A. TROFIMOV<sup>2</sup>, S.I. SHALGUNOV<sup>2</sup>, A.A. YURKIN<sup>1</sup>, A.A. PYKHITIN<sup>1</sup>,  
K.I. KHARLAMOVA<sup>1</sup>, YU.A. SAVITSKAYA<sup>1</sup>, S.S. ZAYTSEV<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 имени Н.Н. Трофимова», г.о. Солнечногорск, п.г.т. Андреевка, Московская обл., Россия

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia

<sup>2</sup> NPO Stekloplastik named after N.N. Trofimov JSC, Solnechnogorsk, Andreevka, Moscow Region, Russia

kharlamki@gmail.com

Рассмотрен алгоритм проектирования литых высокотехнологичных составов дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) с пониженной плотностью и массой изделий при введении полых стеклянных микросфер (ПСМС).

Впервые приведены зависимости реологических характеристик для высокотехнологичных ДНПКМ на основе термопластов в координатах параметров решеток (координационное число  $Z_i$ ) и дисперсной структуры (обобщенный параметр  $\Theta$ ).

Показаны возможности регулирования снижения плотности ДНПКМ с ПСМС и установлены рациональные типы, параметры решеток и дисперсной структуры для получения легких высокотехнологичных полимерных композиционных материалов на основе термопластичных матриц.

*Ключевые слова:* наполненные термопласты, наполнители, упаковка дисперсных частиц, структура, реологические свойства, плотность

An algorithm for designing high-tech injection-molding compositions of dispersed-filled polymer composite materials (DFPCMs) with reduced density and weight of products with the introduction of hollow glass microspheres (HGMS) is considered.

For the first time, the dependencies of the rheological characteristics of high-tech thermoplastic-based DFPCMs are presented in terms of lattice parameters (coordination number  $Z_i$ ) and dispersed structure parameters (generalized parameter  $\Theta$ ).

The possibilities for controlling the density reduction of DFPCMs with HGMS are demonstrated, and rational types along with the parameters of the lattice and dispersed structure for producing lightweight, high-tech polymer composite materials based on thermoplastic matrices have been established.

*Keywords:* filled thermoplastics, fillers, packing of dispersed particles, structure, rheological properties, density

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-06-61-66

Создание легких полимерных композиционных материалов (ПКМ) всегда представляет существенный интерес, так как снижение плотности материала и веса изделий для некоторых областей техники является основным фактором их эксплуатации [1].

Известно много различных методов получения легких полимерных композиционных материалов (ПКМ) с разным содержанием газовой фазы (плотность воздуха составляет 0,00128 г/см<sup>3</sup>). Расчеты показывают, что плотность полимеров изменяется в пределах от 0,85 до 1,5 г/см<sup>3</sup> (для фторопласта – 2,2 г/см<sup>3</sup>), и ее можно снизить до 0,03–0,05 г/см<sup>3</sup>, т.е. примерно в 50 раз (самый легкий ПКМ – Мипора). Однако содержание газовой фазы в ПКМ существенно зависит от метода ее введения в полимер и технологии переработки в изделие.

Основным недостатком получения легких ПКМ с газовой фазой (пенопласты, поропласты) является снижение модуля упругости, прочности и деформации.

С разработкой технологии получения отечественных полых стеклянных микросфер на АО «НПО Стеклопластик» с высоким уровнем характеристик, которые практически не уступают зарубежным аналогам, этот вопрос решается практически [2–5, 6].

Цель статьи – разработка алгоритма получения легких, высокотехнологичных наполненных полимерных термопластов различной природы с полыми стеклянными микросферами и расчета основных параметров и типов структуры, определения основных критериев и ограничений для проектирования наиболее рациональных составов литых ПКМ.

Предлагаемый алгоритм практически осуществляет переход к цифровизации проектирования составов ПКМ с заданными технологическими и эксплуатационными характеристиками дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) на основе различных полимерных матриц [7–9].

На первом этапе работы следует выбрать исходные компоненты для получения легких литых ПКМ (техническое задание) и определить основную характеристику – плотность, как для исходных компонентов ( $\rho_n$  и  $\rho_p$ ), так и для проектируемых составов ( $\rho_{км}$ ) ДНПКМ, по известному уравнению [10]:

$$\rho_{км} = \varphi_n \rho_n + (1 - \varphi_n) \rho_p \quad (1)$$

где  $\rho_n$  и  $\rho_p$  – плотность наполнителя и полимера соответственно;  $\varphi_n$  – объемная доля наполнителя.

В табл. 1 приведены основные характеристики полых стеклянных микросфер (ПСМС) разных марок с различной плотностью, толщиной стенки, распределением частиц по размерам, которые выпускаются по ТУ 6-48-91-92 в АО «НПО Стеклопластик» (Россия).

Полые микросферы представляют собой твердый, жесткий высокомодульный наполнитель, который не изменяет своей шарообразной формы и характеристик в технологическом процессе получения ДНПКМ на основе термопластичной полимерной матрицы.

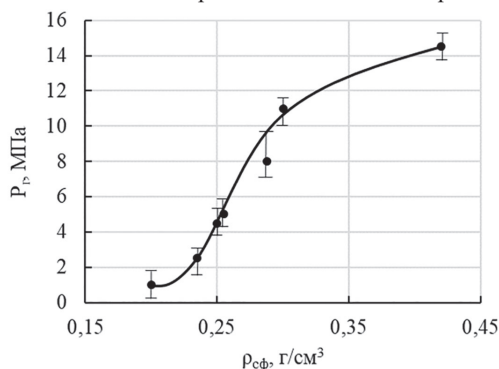


Рис. 1. Зависимость гидростатической прочности ( $P_g$ ) ПСМС от плотности полых сфер.

Плотность ПСМС находится в интервале от 0,18 до 0,42 г/см<sup>3</sup> при практически постоянном среднем диаметре микросфер 40–50 мкм. Прочность ПСМС зависит от их плотности, диаметра

и толщины оболочки, которая составляет примерно до 10% от внешнего диаметра полый сферы. С уменьшением плотности ПСМС их прочность снижается, что может приводить к их разрушению в процессе смешения в рабочих узлах машин при получении ДНПКМ, а также при литье изделий под высоким давлением.

На рис. 1 приведена зависимость гидростатической прочности ПСМС разных марок от их плотности (ГОСТ Р 57963–2017). С уменьшением плотности прочность ПСМС закономерно снижается.

Исходя из данных рис. 1, для создания ДНПКМ целесообразно использовать ПСМС марки МС-ВП-А9 (4) и МС-ВП-А9 (5) с плотностью 0,30 и 0,42 г/см<sup>3</sup>.

Экспериментально установлено, что полые сферы с плотностью менее 0,25 г/см<sup>3</sup> начинают разрушаться в процессе смешения при получении композиционного материала различными методами, при этом прочность ПСМС, которую определяют по ГОСТ Р 57963–2017, составляет менее 5 МПа.

Существующие возможности по изменению плотности ДНПКМ на основе полимерной матрицы с плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup> при введении ПСМС с плотностью от 0,10 до 0,42 г/см<sup>3</sup> представлены на рис. 2 и 3 в различных координатах.

На втором этапе работы для построения всех возможных составов с разными типами структуры ДНПКМ необходимо определить значение максимальной плотности упаковки ( $k_{уп,м}$ ) для реального наполнителя, в нашем случае ПСМС [10].

Максимальная плотность упаковки ( $k_{уп,м}$ ) шарообразных ПСМС определяет их максимально возможное содержание (параметр  $\varphi_m$ )

Таблица 1. Характеристики полых стеклянных микросфер, выпускаемых согласно номенклатуре АО «НПО Стеклопластик».

№ п/п	Характеристики ПСМС	Стеклянные полые микросферы марки						
		МС-В-1л	МС-ВП-А9 (1л)	МС-ВП-А9 (2л)	МС-В-2л	МС-ВП-А9 (3)	МС-ВП-А9 (4)	МС-ВП-А9 (5)
1	Истинная плотность ПСМС 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup> (ГОСТ 18995.1–73)	0,200	0,233	0,244	0,250	0,287	0,300	0,420
2	Насыпная плотность 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup> (ГОСТ 11035.1–93)	0,13	0,13	0,15	0,12	0,17	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	2,4	2,4	2,4
4	Толщина стеклянной оболочки микросфер, мкм	–	–	7	7	7	7	11
5	Доля стеклянной оболочки в объеме полый микросферы, об. %	7,3	9,1	9,6	10,2	11,1	12,4	17,4
6	Доля газа в объеме полый микросферы, об. %.	90,1	90,9	87,4	87,6	87,6	87,6	82,6
7	Отношение доли газа в оболочке к доле стеклянной оболочки полый микросферы	11	10	10,5	9	8	7	5
8	Форма частиц	сферическая	сферическая	сферическая	сферическая	сферическая	сферическая	сферическая
9	Коэффициент формы частиц ( $k_e$ )	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
10	Средний диаметр частиц, мкм	50	50	50	50	45	40	40
11	Параметр $\varphi_m$ , об.д. по кривой уплотнения	0,60	0,60	0,62	0,62	0,62	0,64	0,64
12	Гидростатическая прочность полых микросфер (10 % уровень разрушения) не менее, МПа (ГОСТ Р 57963–2017)	1,125	2,943	4,903	5,125	7,845	11,278	14,71
13	Критическое давление для полых стеклянных микросфер (по кривой уплотнения), МПа	1,0	2,7	2,9	3,0	–	7,5	8,5
14	Содержание влаги, не более, % (ГОСТ Р 57964–2017)	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
15	Показатель pH водной вытяжки	8	8	8	8	8	8	8

в ДНПКМ, тип решетки и дисперсной структуры, которые влияют на комплекс технологических и эксплуатационных характеристик [8, 9].

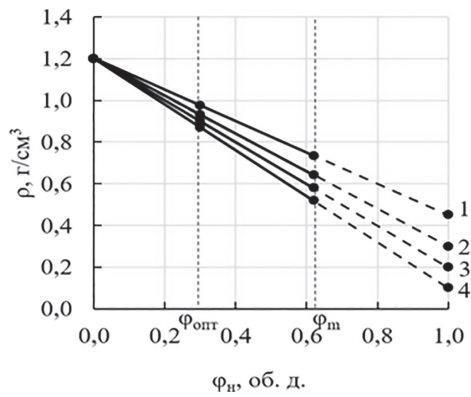


Рис. 2. Зависимость плотности ДНПКМ на основе полимера с плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup> и ПСМС с плотностью 0,42 (1), 0,3 (2), 0,2 (3) и 0,1 г/см<sup>3</sup> (4) при  $\phi_m = 0,62$  об.д. от содержания ПСМС.

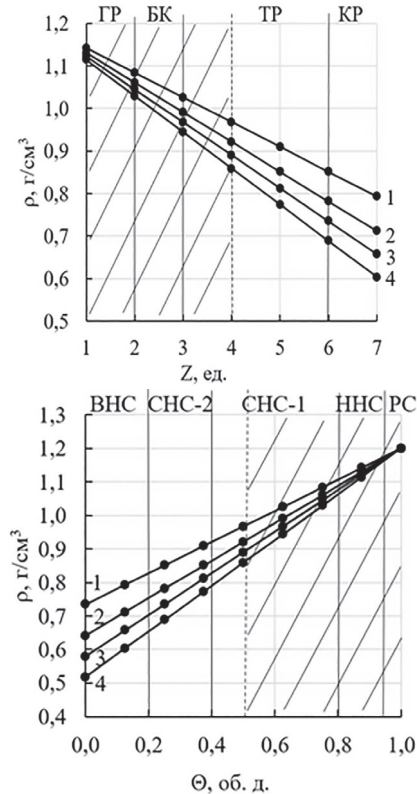


Рис. 3. Зависимость плотности ДНПКМ на основе полимера с плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup> и ПСМС с плотностью 0,42 (1), 0,3 (2), 0,2 (3) и 0,1 г/см<sup>3</sup> (4) при  $\phi_m = 0,62$  об.д. от координационного числа  $Z_i$  и типа решетки (а) и от обобщенного параметра дисперсной структуры  $\theta$  и типа дисперсной структуры (б).

Таблица 2. Содержание ПСМС с  $k_{уп,м} (\phi_m) = 0,62$  об.д. для построения различных типов решеток с  $Z_i$  от 8 до 1 и дисперсной структуры ДНПКМ.

Тип решетки	Координационное число $Z_m$ и $Z_i$ , ед.	Содержание ПСМС, $\phi_m$ и $\phi_n$ , об.д.	Обобщенный параметр $\theta$ , об.д.	Тип дисперсной структуры ДНПКМ
Кубическая (КР) объемно-центрированная	8	0,620	0,0	Высоконаполненная (ВНС)
				ВНС
				ВНС
плотная	7	0,540	0,129	ВНС
хаотическая	6	0,465	0,250	ВНС
Тетраэдрическая (ТР)	5, 4, 3	0,387, 0,310, 0,232	0,375, 0,500, 0,625	Среднезаполненная (СНС)
				СНС-2
				СНС-1
Бесконечный кластер (БК)	2	0,155	0,75	Низконаполненная ННС
Гипотетическая решетка (ГР)	$\leq 1$	$\leq 0,0775$	$\leq 0,875$	Разбавленная РС

Примечание: СНС-2 – среднезаполненные системы с пределом текучести; СНС-1 – среднезаполненные системы до предела текучести

Теоретическое значение  $k_{уп,м}$  для шаров, которое используется в теории Шкловского–Де Жена для построения дисперсных структур с разными типами решеток, равно 0,68, что соответствует объемно-центрированной кубической упаковке частиц (тип решетки) в объеме при максимальном координационном числе  $Z_m = 8$ . С уменьшением значения  $Z_i$  от 8 до 1 изменяется тип решетки и, соответственно, содержание ПСМС и состав ДНПКМ [11, 12].

Максимальная плотность упаковки ПСМС разных марок с различной плотностью, определенная экспериментально по разработанным методикам [10], практически составила от 0,60 до 0,64 об.д. (среднее значение  $k_{уп,м} = \phi_m = 0,62$  об.д.). При уплотнении ПСМС под давлением (кривые уплотнения) были получены значения максимальной плотности упаковки частиц (параметры  $k_{уп,м}$  и  $\phi_m$ ), а также зависимость критического давления для полых стеклянных микросфер (по кривой уплотнения [13]) от плотности микросфер (рис. 4). Вид кривой хорошо коррелирует с данными по гидростатической прочности, полученными при испытании по ГОСТ Р 57963–2017 (рис. 1), что подтверждает выбор ПСМС с плотностью от 0,30 до 0,42 г/см<sup>3</sup> для проектирования составов легких ДНПКМ.

Полученное максимальное значение содержания ПСМС ( $\phi_m = 0,62$  об.д.) ограничивает максимально возможное снижение плотности монолитного ДНПКМ: для сфер с плотностью 0,10 г/см<sup>3</sup>  $\rho_{км} = 0,52$  г/см<sup>3</sup> (снижение плотности примерно на 58%); при 0,20 г/см<sup>3</sup>  $\rho_{км} = 0,58$  г/см<sup>3</sup> (снижение плотности на 52%); при 0,30 г/см<sup>3</sup>  $\rho_{км} = 0,62$  г/см<sup>3</sup> (снижение плотности на 48%); при 0,42 г/см<sup>3</sup>  $\rho_{км} = 0,72$  г/см<sup>3</sup> (снижение плотности около 40%).

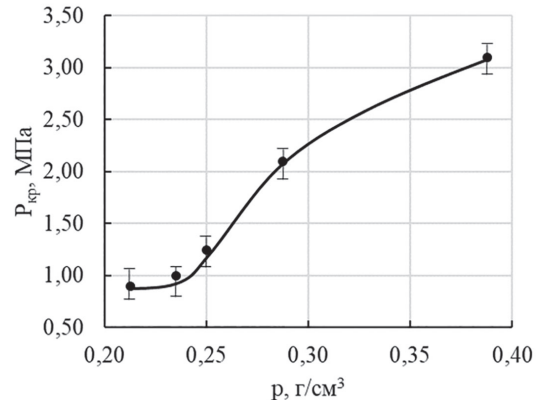


Рис. 4. Зависимость критического давления при сжатии ПСМС в процессе уплотнения под давлением от плотности полых сфер.

В работе [7] установлена связь максимального и текущего содержания дисперсной фазы в ДНПКМ с координационным числом  $Z_i$  и типом решетки с одной стороны, а с другой – с обобщенным параметром  $\theta$  дисперсионной среды (полимерная матрица) в ДНПКМ [8, 9].

Третий этап работы заключается в расчете всех возможных составов монолитных ДНПКМ на основе термопластов с ПСМС с известным значением максимальной плотности упаковки ПСМС ( $\phi_m = 0,62$  об.д.) по формулам [8, 9]:

– для заданного типа решетке:

$$\varphi_n = \varphi_m \times Z_i / Z_m \quad (2)$$

– для заданного типа дисперсной структуры:

$$\varphi_n = (1 - \Theta) \varphi_m \quad (3)$$

где  $Z_i$  – координационное число для заданного типа решетки, которое меняется от 7 до 1;  $Z_m$  – максимальное координационное число для объемно-центрированной кубической решетки, равное 8;  $\Theta$  – доля полимерной матрицы (связующего) в ДНПКМ для раздвижки полых сфер на расстояние  $a_{ср}$ .

Следует отметить, что значения содержания ПСМС, рассчитанные по формулам (2) и (3), полностью совпадают.

В табл. 2 приведены расчетные данные по составам, типам решеток и дисперсной структуры для всех возможных ДНПКМ на основе термопластов и ПСМС (при среднем значении  $k_{уп.м}$  ( $\varphi_m$ ) = 0,62 об.д.).

Тип решетки (КР, ТР, БК и ГР) и дисперсной структуры (ВНС, СНС-2, СНС-1, ННС и РС) определяют как технологические, так и эксплуатационные свойства ДНПКМ. Эти типы структур связаны между собой: КР→ВНС, ТР→СНС-2 и СНС-1, БК→ННС и ГР→РС.

Для максимального снижения плотности монолитного ДНПКМ с ПСМС и массы изделия необходимо ввести в состав как можно больше дисперсного полого наполнителя, но, как установлено экспериментально, для ПСМС – не более 0,62 об.д. (первое ограничение).

На четвертом этапе работы следует учитывать, что проектируются составы ДНПКМ с ПСМС для переработки методом литья под давлением, и значение вязкости расплава должно соответствовать данному технологическому процессу (второе ограничение).

Течение и реологические свойства ДНПКМ зависят от вязкости полимерного связующего ( $\eta_n$ ) и его доли, заключенной между твердыми частицами дисперсного наполнителя (обобщенный параметр  $\Theta$ ).

Твердые частицы наполнителя в процессе течения сами не деформируются, а только сдерживают развитие деформации полимерного связующего (расплава термопласта). Этот процесс зависит от значения координационного числа  $Z_i$  и приводит к росту эффективной вязкости ДНПКМ ( $\eta_{км}$ ).

В зависимости от содержания твердых частиц, типа и параметров структуры решетки вязкость расплава ДНПКМ существенно изменяется.

Резкий рост вязкости практически для всех ДНПКМ (для всех твердых наполнителей и различных термопластичных полимерных матриц) происходит при координационном числе  $Z_i \geq 4$ , когда формируется тетраэдрическая непрерывная решетка из контактирующих частиц наполнителей в объеме, а у наполненной системы появляется предел текучести и обобщенный параметр принимает значение  $\Theta \leq 0,45$  об.д. [15, 16].

При течении (сдвиговые напряжения) такая непрерывная структура из дисперсных частиц наполнителя разрушается, и на это расходуется достаточная энергия, что сопровождается ростом вязкости. В этом случае ТР с  $Z_i = 4$  входит в состав средненаполненной структуры ДНПКМ типа СНС-1 с  $\Theta \approx 0,50$  об.д. (для ПСМС), которая начинает трансформироваться в тип СНС-2 с появлением предела текучести и ростом вязкости.

На рис. 5 приведены обобщенные зависимости относительной вязкости ( $\eta_{отн} = \eta_{км} / \eta_n$ ) расплавов ДНПКМ с разными типами решеток и дисперсной структуры в зависимости от координационного числа ( $Z_i$  при  $Z_m = 8$ ) и обобщенного параметра  $\Theta$ .

Анализ типов структуры, реологических свойств и перерабатываемости ДНПКМ методом литья под давлением показал [17, 18], что литьевые высокотехнологичные полимерные композиционные материалы можно получить при следующих параметрах: тип решетки – ГР, БК и ТР с  $Z_i \leq 4$ ; тип дисперсной структуры – РС, ННС и СНС-1 с обобщенным параметром  $\Theta \geq 0,50$  об.д. (второе ограничение).

С увеличением количества ПСМС в объеме и числа контактов между ними (координационное число  $Z_i > 4$ ) наблюдается их агломерация и разрушение при смешении.

Высоконаполненные (ВНС) и средненаполненные типа СНС-2 с пределом текучести ДНПКМ с ПСМС можно перерабатывать в

изделия методом экструзии (до  $\Theta \approx 0,30$  об. д.) или пресс-литьем, или прессованием ( $\Theta \rightarrow 0$ ) с ограничением по давлению прессования.

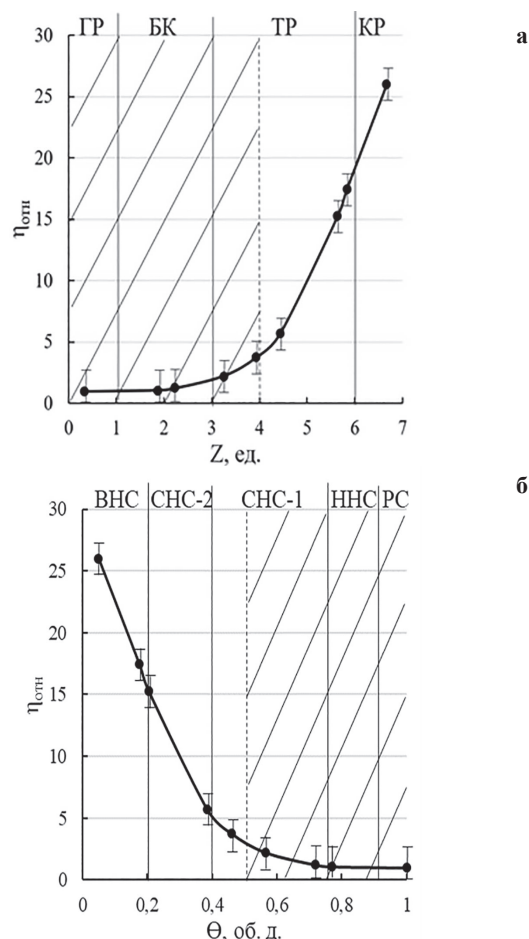


Рис. 5. Зависимость относительной вязкости системы АБС + ПСМС от координационного числа  $Z_i$  и типа решетки (а) и от обобщенного параметра  $\Theta$  и типа дисперсной структуры (б). Заштрихована область высокотехнологичных составов ДНПКМ.

Однако в этих случаях необходимо в состав ДНПКМ с такой структурой (ВНС и СНС-2) вводить ПАВ, аппреты и реологические (функциональные) добавки для улучшения их перерабатываемости. Влияние ПАВ, аппретов и реологических добавок (смазки, пластификаторы и др.) на текучесть хорошо изучено и представлено в научно-технической и патентной литературе [20], при этом практически отсутствуют данные о параметрах, типах решеток, дисперсной структуры и классификации ДНПКМ по структурному принципу, что требует проведения дальнейших комплексных исследований в этой области.

Таким образом, критическим (лимитирующим) параметром для получения легких литьевых высокотехнологичных ДНПКМ с пониженной плотностью и массой изделий является вязкость, которая зависит от координационного числа  $Z_i$  и обобщенного параметра  $\Theta$  и определяет перерабатываемость методом литья под давлением.

Количество ПСМС с  $k_{уп.м}$  ( $\varphi_m$ ) = 0,62 об.д. в структуре литьевых высокотехнологичных ДНПКМ с ТР с  $Z_i = 4$  и дисперсной структурой с  $\Theta = 0,50$  об.д. соответствует  $\varphi_n = 0,31$  об.д.

Расчет плотности ДНПКМ на основе полимера с плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup> (в качестве примера) и ПСМС с плотностью 0,42 и 0,30 г/см<sup>3</sup> по формуле (1) показал, что достигается значение  $\rho_{км} = 0,952$  и 0,921 г/см<sup>3</sup> соответственно. В этом случае снижение массы изделий из высокотехнологичных литьевых ДНПКМ составляет при использовании ПСМС с плотностью 0,3 г/см<sup>3</sup> – 23% и для 0,42 г/см<sup>3</sup> – 20% соответственно.

Основные направления дальнейшего развития работ для получения легких высокотехнологичных ДНПКМ с ПСМС направлены на:

- получение прочных полых стеклянных микросфер с пониженной плотностью (менее 0,15 г/см<sup>3</sup>);
- получение ПСМС с диаметрами частиц от 5 до 10 мкм;

**Таблица 4. Значение плотности ДНПКМ с ПСМС разной начальной плотности и максимальной упаковки частиц.**

Тип решетки и $Z_i$	Плотность ПСМС, г/см <sup>3</sup>	Плотность ДНПКМ (г/см <sup>3</sup> ) и снижение массы изделия (%) при различных значениях $\varphi_m$ для ПСМС, об. д.					Параметр $\theta$ , об. д.	Тип структуры ДНПКМ
		0,62	0,68	0,75	0,80	0,84		
ТР с $Z_i = 4$	0,10	0,86 (28)	0,82 (31)	0,78 (35)	0,76 (36)	0,72 (40)	0,50	СНС-1
	0,20	0,89 (26)	0,86 (28)	0,82 (31)	0,80 (33)	0,76 (36)		
	0,30	0,92 (23)	0,88 (26)	0,86 (28)	0,84 (30)	0,80 (33)		
	0,42	0,95 (21)	0,91 (24)	0,90 (25)	0,88 (26)	0,86 (28)		

*Примечание:* в скобках указано снижение плотности ДНПКМ по отношению к исходному полимеру (в %).

– получение плотных составов дисперсных частиц и увеличение максимальной плотности их упаковки  $k_{уп.ми}(\varphi_m) > 0,62$  об.д.

Получение прочных (более 5–8 МПа) легких ПСМС с низкой плотностью (менее 0,15 г/см<sup>3</sup>) по стабильной технологии является достаточно сложной технической проблемой, которая пока не решена в мировой практике.

Полые стеклянные микросферы с диаметром до 5–10 мкм в промышленности получают, однако толщина их оболочки уменьшается при снижении диаметра, что не обеспечивает достаточной прочности самих ПСМС.

Для создания так называемых «плотных» составов с высоким значением максимальной плотности упаковки частиц ПСМС (прерывистая и непрерывная гранулометрия), необходимо получить микросферы с различными размерами и распределением частиц по размерам [14, с. 129].

В результате, например, можно получить двухфракционные плотные составы ПСМС с диаметрами частиц, различающимися примерно в 6 раз, и с максимальной плотностью упаковки до 0,84 об.д., вместо 0,62 об.д. для рассматриваемых ПСМС (увеличение на 26%).

Содержание ПСМС с разным значением максимальной плотности упаковки частиц ( $k_{уп.ми}$  и  $\varphi_m$ ) для получения легких высокотехнологичных ДНПКМ с  $Z_i = 4$  и дисперсной структурой с  $\theta = 0,50$  об.д. составляет:

Значение $\varphi_m$ , об. д.	0,62	0,68	0,75	0,80	0,84
Содержание ПСМС, об.д.	0,31	0,34	0,375	0,40	0,42

Максимальное содержание ПСМС плотного состава увеличивается с 0,31 до 0,42 об.д., т.е. примерно на 26%, что способствует получению более легких высокотехнологичных ДНПКМ.

В табл. 3 приведены расчетные значения по снижению плотности ДНПКМ и массы изделий с использованием ПСМС разной плотности ( $\rho_n$ ) и максимальной плотностью упаковки ( $\varphi_m$ ).

**Таблица 3. Плотность ДНПКМ с ПСМС разной плотности и различной максимальной упаковкой.**

Плотность ПСМС, г/см <sup>3</sup>	Плотность ДНПКМ ( $\rho_{км}$ , г/см <sup>3</sup> ) при разной максимальной упаковке ПСМС, $\varphi_m$ , об.д.				
	0,62	0,68	0,75	0,80	0,84
0,10	0,52 (58%)	0,43 (64%)	0,36 (70%)	0,32 (73%)	0,26 (78%)
0,20	0,58 (52%)	0,51 (58%)	0,44 (63%)	0,40 (66%)	0,35 (71%)
0,30	0,65 (48%)	0,58 (52%)	0,52 (56%)	0,47 (61%)	0,44 (63%)
0,42	0,72 (40%)	0,66 (45%)	0,60 (50%)	0,57 (52%)	0,52 (56%)

*Примечание:* в скобках указано снижение плотности ДНПКМ по отношению к исходному полимеру (в %).

Однако получить данные по максимальному снижению плотности и массы изделий (табл. 3) для литевых изделий из ДНПКМ с ПСМС с разной плотностью и различными максимальными значениями упаковки сфер не удастся.

В табл. 4 приведены расчетные данные по снижению плотности легких литевых высокотехнологичных ДНПКМ на основе ПСМС с оптимальной структурой (ТР с  $Z_i = 4$  и СНС-1 с  $\theta = 0,50$  об.д.) при различной упаковке полых сфер.

При снижении плотности ПСМС примерно в 4,2 раза (с 0,42 до 0,10 г/см<sup>3</sup>) плотность ДНПКМ при разной постоянной максимальной плотности упаковки сфер (параметр  $\varphi_m$ ) уменьшится всего на 6–12%.

Максимального снижения плотности высокотехнологичных литевых ДНПКМ около 40% можно достичь при введении в термопласты новых ПСМС с плотностью примерно 0,10 г/см<sup>3</sup> и с максимальной упаковкой частиц  $\varphi_m \approx 0,84$  об.д.

Реально для ПСМС с плотностью 0,30–0,42 г/см<sup>3</sup> при использовании плотных составов ( $\varphi_m = 0,84$  об.д.) плотность ДНПКМ можно снизить на 28–33%, т.е. всего на 7–10% больше, чем для существующих полых микросфер с  $\rho_n = 0,30$  г/см<sup>3</sup> и  $\varphi_m = 0,62$  об.д.

Такой подход заслуживает внимания. Однако экономические затраты на получение ПСМС малых диаметров и составление плотных составов с разными диаметрами полых сфер в этом случае неоправданно высоки.

В промышленности наиболее целесообразным является получение ПСМС с плотностью 0,30 г/см<sup>3</sup> с регулируемым распределением частиц по размерам с целью увеличения  $k_{уп.м}(\varphi_m) > 0,62$  об.д. в результате создания плотного состава по непрерывной гранулометрии до  $k_{уп.м}(\varphi_m) 0,70–0,75$  об.д.

Использование ПСМС с  $\rho_n = 0,30$  г/см<sup>3</sup> и  $\varphi_m = 0,70–0,75$  об.д. позволит снизить плотность и массу изделий из литевых высокотехнологичных ДНПКМ на основе термопластов на 26–28% и решить ряд задач специальной техники.

В АО «НПО Стеклопластик им. Н.Н. Трофимова» работы в этом направлении продолжаются. Это существенно расширит возможности применения новых высококачественных полых стеклянных микросфер с высокой плотностью упаковки.

Представленный подход к анализу построения структуры легких высокотехнологичных ДНПКМ и алгоритм проектирования типов и параметров структур с комплексом заданных свойств являются фундаментальной основой для создания легких, с пониженной массой, изделий из ДНПКМ + ПСМС и внедрения цифровизации в область конструирования полимерных композиционных материалов с заданными свойствами.

Работа выполняется в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Соглашение от 31.03.2025 №075-15-2025-020, федеральный проект «Университеты для поколения лидеров» национального проекта «Молодежь и дети»).

### Литература

1. Trofimov A.N., Pleshkov L.V., Haslen Back. Hollow glass microspheres for high strength composite cores. // Reinforced Plastics. Vol. 50, Issue 7. 2006. P. 44–50. DOI:10.1016/S0034-3617(06)71074-8.
2. Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В., Стогова И.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 1. О размерах промышленных полых стеклянных микросфер // Пластические массы. 2020. №11–12. С. 15–19. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-15-19.
3. Плешков Л.В., Трофимов А.Н., Байков А.В., Смирнов А.А. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 2. О взаимосвязи геометрии полых стеклянных микросфер и их потребительских свойств // Пластические массы. 2021. №1–2. С. 33–37. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-33-37.
4. Горенберг А.Я., Трофимов А.Н., Иванова-Мумжиева В.Г., Плешков Л.В., Байков А.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 3. О толщине стенок промышленных полых стеклянных микросфер // Пластические массы. 2021. №3–4. С. 32–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-32-36.
5. Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 4. О кинетике разрушения полых стеклянных микросфер под действием гидростатического давления и методах повышения их прочности // Пластические массы. 2021. №5–6. С. 44–46. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-44-46.

6. Байков А.В., Турусов Р.А., Трофимов А.Н., Плешков Л.В. Численное моделирование упругого поведения синтактовых композитов на основе полых стеклянных микросфер при растяжении // Проблемы прочности и пластичности. 2021. №1. С. 22–34. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-1-22-34.
7. Симонов-Емельянов И.Д. Параметры решетки и структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с регулируемым комплексом свойств. // Конструкции из композиционных материалов» 2019. №3. С. 37–46. EDN PEGJTQ.
8. Резниченко Д.С., Симонов-Емельянов И.Д. Построение гетерогенной структуры из дисперсных частиц наполнителя в виде решеток для создания наполненных полимерных материалов // Пластические массы. 2025. № 2. С. 10–15. DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-10-15.
9. Симонов-Емельянов И.Д., Резниченко Д.С. Структура полимерной матрицы в дисперсных системах и обобщенная классификация полимерных композиционных материалов по типам структур // Пластические массы. 2025. №4. С. 26–31. DOI: 10.35164/0554-2901-2025-04-26-31.
10. Симонов-Емельянов И.Д. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов // СПб: Профессия. 2024. 280 с. ISBN 978-5-91884-134-1.
11. Харламова К.И., Симонов-Емельянов И.Д. / Максимальная плотность упаковки дисперсных частиц – основа для моделирования структуры полимерных композиционных материалов с заданной структурой и свойствами // Пластические массы. 2025. №4. С. 61–66. DOI: 10.35164/0554-2901-2025-04-61-66.
12. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // Успехи физических наук. 1975. Т. 117, вып. 3. С. 401–435. DOI: 10.3367/UFN.0117.197511a.0401.
13. Де Жен П.–Ж. Идеи скейлинга в физике полимеров / пер. с англ. под ред. И.М. Лифшица. М.: Мир. 1982. 368 с.
14. Симонов-Емельянов И.Д., Пыхтин А.А. Кривая уплотнения порошкообразных наполнителей и расчет составов дисперсно-наполненных полимерных композитов с разной структурой и свойствами // Материаловедение. 2020. №6. С. 37–44. DOI: 10.31044/1684-579X-2020-0-6-37-44.
15. Симонов-Емельянов И.Д., Суриков П.В. Обобщенная зависимость вязкости дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с разными типами структур // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57. №4. С. 445–453. DOI: 10.31857/S0040357123040115
16. Фам К.З., Суриков П.В. Реологические свойства расплавов дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе полиэтилена, содержащего стеклянные микрошарики // Материалы конференции «Полимеры в стратегии научно-технического развития РФ. «ПОЛИМЕРЫ–2020»» Москва. 9–13 ноября 2020. С. 136. EDN: SLHGPK.
17. Симонов-Емельянов И.Д., Кречетов Д.Д., Харламова К.И. / Проектирование составов и типов структур литевых дисперсно-наполненных термопластов с хорошей перерабатываемостью и высокой прочностью // Пластические массы. 2021. №5–6. С. 10–12. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-10-12.
18. Кречетов Д.Д., Симонов-Емельянов И.Д. Структура, обобщенные параметры и реологические свойства дисперсно-наполненных термопластов // Материаловедение. 2020. №9. С. 38–44. DOI: 10.31044/1684-579X-2020-0-9-38-44.
19. Кречетов Д.Д., Ковалева А.Н., Симонов-Емельянов И.Д. Реологические свойства дисперсно-наполненных термопластов с разным типом структур при различных температурах переработки // Пластические массы. 2020. №9–10. С. 19–22. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-19-22.
20. Цвайфель Х., Маер Р.Д., Шиллер М. Добавки к полимерам. Справочник / перевод с англ. 6-го изд. (Plastic Additives Handbook), под. ред. В. Б. Узденского, А. О. Григорова. / СПб.: Профессия. 2016. 1088 с. ISBN: 978-5-91884-008-5.