**Реологические свойства дисперсно-наполненных термопластов
с разным типом структур при температурах переработки**
**Rheological properties of dispersion-filled thermoplastics
with different types of structures at various processing temperatures**

Д.Д. КРЕЧЕТОВ, А.Н. КОВАЛЕВА, И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ

D.D. KRECHETOV, A.N. KOVALEVA, I.D. SIMONOV-EMELIANOV

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова)

MIREA – Russian Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov)

simonov@mitht.ru

В статье приводятся результаты исследования реологических характеристик дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) на основе ПЭНП и стеклянных шариков марки ШСО-30 в широком диапазоне температур переработки. Впервые реологические свойства дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов рассмотрены с позиций формирования дисперсной фазы с разным типом решеток, функционального деления полимерной матрицы ($\varphi_{\text{п}} = \Theta + B + M$) и построения дисперсных систем с разными типами структур (РС, ННС, СНС, ВНС) в терминах обобщенных параметров (Θ , $a_{\text{ср}}/d$). Такой подход позволяет прогнозировать и описывать реологические свойства для всех ДНПКМ с различными типами дисперсных структур, с использованием дисперсной фазы (наполнителя) с известными геометрическими размерами (d), плотностью упаковки (параметр $k_{\text{уп}}$ и $\varphi_{\text{м}}$) на основе данной полимерной матрицы. Установлено влияние температуры на технологию переработки ДНПКМ с разными типами структур в изделия методом литья под давлением.

Ключевые слова: дисперсный наполнитель, полиэтилен, полимерный композиционный материал, структура, реологические свойства, вязкость, температура

The article presents the results of a study of the rheological characteristics of dispersion-filled polymer composite materials (DFPCM) based on LDPE and glass balls of the ШСО-30 brand in a wide range of processing temperatures. For the first time, the rheological properties of dispersion-filled polymer composite materials are considered from the standpoint of the formation of the dispersed phase with different types of lattices, functional division of the polymer matrix ($\varphi_{\text{p}} = \Theta + B + M$) and the construction of dispersed systems with different types of structures (DS, LFS, MFS, HFS) in terms of generalized parameters (Θ , a_{mid}/d). This approach allows us to predict and describe the rheological properties for all DFPCMs with different types of dispersed structures, using a dispersed phase (filler) with known geometric dimensions (d), packing density (parameter k_{packing} and φ_{m}) based on this polymer matrix. The influence of temperature on the processing technology of DFPCM with different types of structures into products by injection molding has been established.

Keywords: dispersed filler, polyethylene, polymer composite material, structure, rheological properties, viscosity, temperature

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-19-22

Широкое использование полимерных композиционных материалов на основе термопластов требует постоянного повышения эффективности их переработки и качества выпускаемой продукции.

Введение в термопласты дисперсных наполнителей сопровождается формированием разных типов структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ), в зависимости от параметров структуры изменяется комплекс как технологических, так и эксплуатационных свойств [1].

Известно, что с введением твердого дисперсного наполнителя в термопластичную полимерную матрицу повышается вязкость и ухудшаются условия переработки ДНПКМ в изделия различными методами [2, 3].

Для улучшения перерабатываемости ДНПКМ методами литья под давлением, экструзией и другими методами в научно-технической литературе предлагается повышать температуру расплава в среднем на $\sim 15\text{--}20^\circ\text{C}$ по отношению к полимеру [4]. Такой эмпирический подход к назначению условий переработки всех наполненных термопластов никак не связан с параметрами и типом структуры ДНПКМ, их вязкостью и не гарантирует получения качественных изделий с разной толщиной стенки, особенно тонкостенных.

В научно-технической литературе отсутствуют данные по влиянию температуры переработки на реологические свойства расплавов ДНПКМ с разными типами дисперсной структуры. Вероятно,

для каждого типа структуры ДНПКМ следует рекомендовать свою температуру переработки с учетом термостабильности расплава полимера.

Ранее в работе [5] на количественном уровне по обобщенному параметру Θ была проведена классификация всех дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) по основным типам структуры:

- разбавленные – РС с $\Theta \geq 0,90$ об.д.;
- низко-наполненные – ННС с $0,90 \geq \Theta \geq 0,75$ об.д.;
- средне-наполненные – СНС с $0,75 \geq \Theta \geq 0,20$ об.д.;
- СНС-1 – до предела текучести с $0,75 \geq \Theta \geq 0,45$ об.д.;
- СНС-2 – с пределом текучести с $0,45 \geq \Theta \geq 0,20$ об.д.;
- высоконаполненные – ВНС с $0,20 \geq \Theta \geq 0,0$ об.д.

Для описания структуры и классификации ДНПКМ использовали модели и комплекс обобщенных и приведенных параметров, которые учитывают построение как решетчатых структур гетерогенных систем, так и деление полимерной матрицы (связующего) на три функциональные составляющие [6]:

$$\varphi_{\text{п}} = \Theta + B + M$$

Построение решетчатых гетерогенных структур характеризовали координационным числом (параметр Z) и плотностью упаковки ($k_{\text{уп}}$), а в качестве обобщенных параметров для описания структуры ДНПКМ использовали: обобщенный геометрический приведенный параметр $a_{\text{ср}}/d$ ($a_{\text{ср}}$ – среднестатистическое расстояние

между дисперсными частицами с диаметром d) и параметр Θ – доля полимерной фазы-матрицы (связующего) для формирования прослойки между дисперсными частицами.

В работе [7] нами были приведены данные по реологическим характеристикам расплавов ДНПКМ на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и стеклянных шариков марки ШСО-30 для разных типов дисперсных структур при постоянной температуре переработки.

Впервые была установлена связь вязкости расплавов ПЭНП + ШСО-30 с типом дисперсной структуры (разбавленные – РС, низко-наполненные – ННС, средне-наполненные – СНС (СНС-1 – до предела текучести и СНС-2 – с пределом текучести) и высоконаполненные системы – ВНС) и обобщенными параметрами структур (a_{cp}/d , Θ).

Однако вопрос о компенсации повышения вязкости в результате введения дисперсного наполнителя в полимер за счет повышения температуры переработки остается открытым.

В настоящей статье представлены данные по реологии ДНПКМ на основе ПЭНП и стеклянных шариков марки ШСО-30 разных составов, типов дисперсной структуры (РС, ННС, СНС и ВНС) в широком диапазоне температур переработки (180–280°C) и интервале скоростей и напряжений сдвига, что позволяет получить реальные данные для определения температурных условий переработки.

В качестве обобщенных параметров ДНПКМ рассматриваются: обобщенный геометрический параметр a_{cp}/d (a_{cp} – среднестатистическое расстояние между дисперсными частицами с диаметром d) и обобщенный параметр Θ , об.д. – доля полимерной фазы-матрицы (связующего) для формирования прослойки между дисперсными частицами.

Прослойка полимерной матрицы между твердыми частицами наполнителя определяет деформируемость и текучесть дисперсно-наполненной системы. Обобщенные параметры a_{cp}/d и Θ рассчитывали по известным формулам:

$$a_{cp}/d = (\varphi_m/\varphi_n)^{1/3} - 1 \text{ и } \Theta = (\varphi_m - \varphi_n)/\varphi_m$$

где φ_m и φ_n – максимальная доля наполнителя в ДНПКМ и содержания наполнителя соответственно.

Ниже приведены результаты исследования реологических характеристик дисперсных систем на примере термопластичного полимера – полиэтилена низкой плотности марки 10803-020 (фирма ОАО «Казаньоргсинтез», Россия) с ПТР = 1,3 г/10 мин и стеклянных шариков марки ШСО-30 (фирма ЗАО «Русстек», Россия) с диаметром частиц ~30 мкм.

Составы ДНПКМ с разными типами структур рассчитывали согласно алгоритму, приведенному в работе [5], при известном значении диаметра частиц $d \approx 30$ мкм. Максимальное содержание (упаковка) для стеклошариков определяли по трем методикам [8], и его значение составляло $\varphi_m \approx 0,50$ об.д.

Составы ДНПКМ на основе ПЭНП + ШСО-30 с разными типами дисперсной структуры приведены ниже: РС – с содержанием наполнителя – φ_n (об.д.) – 0,01 об.д.; ННС – 0,05 об.д.; СНС-1 – 0,12 об.д.; СНС-1 – 0,2 об.д.; СНС-2 – 0,27 об.д.; СНС-2 – 0,32 об.д.; СНС-2 – 0,37 об.д. и ВНС – 0,39 и 0,44 об.д.

Композиции разного состава и типа дисперсной структуры на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) марки 10803-020 со стеклянными шариками марки ШСО-30 получали на пластогра-

фе «Брабендер» с объемом камеры 100 см³ при температуре 220°C, в течение 10 мин при скорости вращения роторов 60 об/мин.

В таблице 1 приведены данные по составам, типам решеток и обобщенным параметрам структуры ДНПКМ с разным типом дисперсной структуры.

Реологические характеристики (вязкость) дисперсных систем на основе ПЭНП + ШСО-30 разных типов структур и составов определяли на приборе ИИРТ и капиллярном вискозиметре LCR7000 (фирма Dynisco, США) в широкой области скоростей и напряжений сдвига при различных температурах: 180, 200, 220, 240, 260 и 280°C.

Ограничения по температуре переработки (не более 280°C) связаны с началом процесса термоокислительной деструкции расплава ПЭНП марки 10803-020 (рис. 1 а).

Зависимость вязкости расплава ПЭНП марки 10803-020 от температуры приведена на рис. 1б, а энергия активации вязкого течения составляет $E_{акт} \approx 56$ кДж/моль. Повышение температуры переработки на 100°C со 180 до 280°C снижает вязкость ПЭНП в ~6 раз, что является эффективным параметром регулирования технологических режимов формования изделий с разной толщиной стенки.

Рис. 1. Зависимость времени термостабильности (а) и эффективной вязкости (б) расплава ПЭНП марки 10803-020 от температуры.

Согласно термогравиметрическим исследованиям (при скорости нагрева 5 град./мин), интенсивное разложение ПЭНП марки 10803-020 начинается при ~300°C.

Для описания реологических характеристик ДНПКМ на основе ПЭНП + ШСО-30 использовали эффективную ($\eta_{эфф}$) и относительную вязкость $\eta_{отн} = \eta_{км}/\eta_{п}$ (где $\eta_{км}$ и $\eta_{п}$ – вязкость ДНПКМ и полимера-матрицы соответственно).

На рис. 2 представлены зависимости $\eta_{эфф}$ и $\eta_{отн}$ для ДНПКМ в интервале температур переработки полиэтилена (180–280°C) в традиционных координатах от объемной доли наполнителя φ_n .

Значение вязкости ПЭНП + ШСО-30 при 180 и 280°C изменяется с увеличением содержания наполнителя с 360 до 9000 Па·с и с 60 до 1500 Па·с соответственно (в ~25 раз). При введении до 0,20 об.д. наполнителя вязкость дисперсной системы возрастает в ~2 раза, а далее наблюдается ее резкий рост в ~12,5 раза.

Повышение температуры со 180 до 280°C сопровождается снижением вязкости, причем в области высоких концентраций наполнителя (более 0,20 об.д.) – в ~6 раз.

Таблица 1. Тип решетки, составы, структуры и обобщенные параметры ДНПКМ.

№ п/п	Тип структуры ДНПКМ	Содержание ШСО-30 (φ_n), об.д.	Тип решетки	Параметры решетки		Обобщенные параметры структуры	
				Z	$k_{уп}$	a_{cp}/d	Θ , об.д.
1	РС	0,01	ГР	< 1	< 0,076	5,3	0,98
2	ННС	0,05	БК	1	0,076	2,3	0,90
	ННС	0,12	БК	2	0,16	1,2	0,75
3	СНС-1	0,20	ТР	3	0,255	0,7	0,60
	СНС-1	0,27	ТР	4	0,34	0,45	0,45
4	СНС-2	0,32	ТР	–	–	0,32	0,35
	СНС-2	0,37	ТР	5	0,43	0,21	0,25
5	ВНС	0,39	КР	6	0,52	0,17	0,20
	ВНС	0,44	КР	6	0,52	0,09	0,10
	ВСН	0,5	КР	6	0,52	0,0	0,0

Рис. 2. Зависимость $\eta_{\text{эфф}}$ (а) и $\eta_{\text{отн}}$ (б) ДНПКМ на основе ПЭНП + ШСО-30 от объемной доли ШСО-30 при разных температурах: 1 – 180°C; 2 – 200°C; 3 – 220°C; 4 – 240°C; 5 – 260°C; 6 – 280°C.

Полученные данные по зависимости вязкости наполненной системы от содержания наполнителя при разных температурах невозможно связать с параметрами и типом гетерогенной структуры ДНПКМ (РС, ННС, СНС и ВНС) и установить их связь с реологическими свойствами.

В связи с этим полученные зависимости вязкости ДНПКМ были перестроены в координатах обобщенных параметров (a_{CP}/d и Θ), которые одновременно учитывают размер, форму, упаковку и содержание дисперсной фазы, а также функциональное построение полимерной матрицы.

В зависимости от среднего расстояния между частицами в дисперсной системе и обобщенного геометрического параметра a_{CP}/d вязкость ее будет изменяться.

На рис. 3 приведены зависимости эффективной и относительной вязкости для систем ПЭНП + ШСО-30 при разных температурах от геометрического обобщенного параметра структуры a_{CP}/d .

Рис. 3. Зависимость $\eta_{\text{эфф}}$ (а) и $\eta_{\text{отн}}$ (б) ДНПКМ на основе ПЭНП + ШСО-30 от приведенного обобщенного параметра a_{CP}/d при разных температурах: 1 – 180°C; 2 – 200°C; 3 – 220°C; 4 – 240°C; 5 – 260°C; 6 – 280°C.

С уменьшением приведенного параметра a_{CP}/d вязкость дисперсной системы возрастает, и на кривых наблюдаются характерные точки перегибов.

На кривых можно выделить три характерные области (I, II, III) изменения вязкости, что указывает на зависимость вязкости от структурных параметров дисперсных систем.

Классификация дисперсных систем по структурному принципу была проведена по обобщенному параметру Θ , и на рис. 4 показаны зависимости эффективной и относительной вязкости для систем ПЭНП + ШСО-30 при разных температурах от обобщенного параметра структуры Θ , что позволяет представить реологические данные для дисперсных систем с различными типами структур (РС, ННС, СНС и ВНС).

Вязкость ДНПКМ на основе ПЭНП + ШСО-30 при введении наполнителя и уменьшении значения обобщенного параметра Θ с 1,0 до 0,10 об.д. возрастает в ~25 раз по сравнению с вязкостью ПЭНП, как при температуре переработки 180°C, так и при 280°C.

Рис. 4. Зависимость $\eta_{\text{эфф}}$ (а) и $\eta_{\text{отн}}$ (б) ДНПКМ на основе ПЭНП + ШСО-30 от обобщенного параметра Θ при разных температурах: 1 – 180°C; 2 – 200°C; 3 – 220°C; 4 – 240°C; 5 – 260°C; 6 – 280°C.

Для описания зависимости относительной вязкости ДНПКМ при разных температурах от обобщенного параметра структуры Θ нами предложено уравнение (1), которое хорошо работает для всех типов структур ДНПКМ (от РС до ВНС):

$$\eta_{\text{КМ}}/\eta_{\text{П}} = \eta_{\text{отн}} = \exp\left(\frac{1-\Theta}{1-\Phi_{\text{н}}}\right)^2 \quad (1)$$

Представленные на рис. 4 реологические данные при различных температурах впервые можно отнести к разным типам структур ДНПКМ (РС, ННС, СНС и ВНС).

Так, в области разбавленных систем (РС) с $1,0 \geq \Theta \geq 0,90$ об.д. вязкость ДНПКМ (при $\Theta = 0,98$ об.д. и $\Phi_{\text{н}} = 0,01$ об.д.) практически не изменяется по сравнению с вязкостью ПЭНП. Частицы жесткого наполнителя в РС находятся на достаточно большом расстоянии друг от друга, не образуют решетчатых структур (гипотетическая решетка с параметрами – $Z \leq 1$ и $k_{\text{уп}} \leq 0,076$) и практически не оказывают влияния на изменение вязкости расплавов.

При переходе в область структур, характерных для низко-наполненных систем (ННС) с $\Theta \rightarrow 0,90$, $a_{\text{CP}}/d = 2,6$ и $\Phi_{\text{н}} = 0,04$ об.д. начинает формироваться структура бесконечного кластера ($Z = 1$ и $k_{\text{уп}} = 0,076$) и вязкость расплава возрастает, однако ее значение увеличивается всего на ~10–20% в зависимости от температуры.

В области низко-наполненных систем (ННС) с $0,90 \geq \Theta \geq 0,75$ об.д. при переходе от гипотетической решетки (ГР) к бесконечному кластеру (БК) с $Z = 1-2$ и $k_{\text{уп}} = 0,076-0,16$, $a_{\text{CP}}/d = 2,2-1,2$ и $\Phi_{\text{н}} = 0,05-0,12$ об.д. вязкость ДНПКМ возрастает в 1,3–1,6 раз при 180°C и в 1,1–1,4 раз при 280°C по отношению к вязкости полимерной матрицы.

Такое изменение вязкости для РС и ННС практически не оказывает существенного влияния на процессы переработки дисперсных систем в изделия и легко компенсируется повышением температуры всего на 5–10°C

На рис. 4 для типа дисперсной структуры СНС наблюдается переход от линейной зависимости вязкости расплава в сторону ее резкого экспоненциального возрастания.

В области средне-наполненных систем СНС с $Z = 3-5$, $k_{\text{уп}} = 0,255-0,43$ и $0,75 \geq \Theta \geq 0,20$ об.д., $a_{\text{CP}}/d = 1,2-0,17$ и $\Phi_{\text{н}} = 0,12-0,39$ об.д. при переходе от структуры бесконечного кластера (БК) к первой тетраэдрической решетке (ТР) построения дисперсной фазы наблюдается более значительное изменение вязкости ДНПКМ в ~1,6–15 раз при разных температурах переработки.

Причем для СНС-1 (до предела текучести) с $Z = 3-4$ и $k_{\text{уп}} = 0,255-0,34$ и $0,75 \geq \Theta \geq 0,45$ об.д., $a_{\text{CP}}/d = 1,2-0,45$ и $\Phi_{\text{н}} = 0,12-0,27$ об.д. вязкость возрастает в ~1,6–5 раз, а с появлением предела текучести и переходом структуры ДНПКМ к СНС-2 (с $Z = 4-5$ и $k_{\text{уп}} = 0,34-0,43$ и $0,45 \geq \Theta \geq 0,20$ об.д., $a_{\text{CP}}/d = 0,45-0,17$ и $\Phi_{\text{н}} = 0,27-0,39$ об.д.) она увеличивается в 5–15 раз.

Такое повышение вязкости дисперсных систем связано с увеличением числа касаний частиц жесткого наполнителя в единице объема, плотности упаковки, уменьшением доли полимерной матрицы между частицами и перестройкой структуры – от бесконечного кластера к тетраэдрической и кубической решетке.

Таблица 2. Составы, обобщенные параметры, тип структуры ДНПКМ на основе ПЭНП + ШСО-30 ($\phi_m = 0,5$ об.д., $d = 30$ мкм) и их вязкостные характеристики.

Составы, обобщенные параметры структуры ДНПКМ					Вязкость расплава ДНПКМ, Па·с		
φ _н , об.д.	θ, об.д.	a _{ср} /d	Координационное число Z	Плотность упаковки k _{уп}	T, °С		
					180	220	280
ПЭНП марки 10803-020							
—	—	—	—	—	360	190	60
Разбавленные ДНПКМ (РС) θ ≥ 0,9 об.д.							
0,01	0,98	5,3	< 1	< 0,076	360	190	60
Низконаполненные ДНПКМ (ННС) 0,9 ≥ θ ≥ 0,75 об.д.							
0,05	0,9	2,3	1	0,076	460	230	70
0,12	0,75	1,2	2	0,16	570	290	85
Средненаполненные ДНПКМ (СНС) 0,75 ≥ θ ≥ 0,20 об.д.							
СНС-1- 0,75 ≥ θ ≥ 0,45 об.д. (до предела текучести)							
0,2	0,6	0,7	3	0,255	910	470	140
0,27	0,45	0,45	4	0,34	1660	860	260
СНС-2 – 0,45 ≥ θ ≥ 0,2 об. д. (с пределом текучести)							
0,32	0,35	0,32	—	—	2510	1310	400
0,37	0,25	0,21	5	0,43	4230	2210	685
Высоконаполненные ДНПКМ (ВНС) 0,20 ≥ θ ≥ 0 об. д.							
0,39	0,2	0,17	6	0,52	5300	2780	900
0,44	0,10	0,09	—	—	9030	4740	1490

Формирование при $\theta \leq 0,45$ об.д. квазинепрерывного каркаса из дискретных частиц наполнителя в объеме полимерной матрицы приводит к появлению предела текучести и резкому увеличению (до 15 раз) вязкости наполненных систем (СНС-2).

Для высоконаполненных ДНПКМ (ВНС) с кубической решеткой (КР) и упаковкой дисперсных частиц при $Z = 6-8$ и $k_{уп} = 0,52-0,68$ и $0,20 \geq \theta \geq 0,0$ об.д., $a_{cp}/d \rightarrow 0$ и $\phi_n \rightarrow \phi_m$ об.д. вязкость продолжает возрастать (в 15–25 раз) и достигает своего максимума.

В таблице 2 представлены обобщенные экспериментальные данные по исследованию реологических характеристик ДНПКМ с различными типами структур (РС, ННС, СНС и ВНС) при разных температурах.

Как было указано выше, в результате повышения температуры переработки со 180 до 280°C вязкость ДНПКМ можно снизить только в ~6 раз по отношению к расплаву полимерной матрицы, и поэтому компенсировать рост вязкости в 15–25 раз для структур СНС-2 и ВНС с $\theta < 0,45$ об.д. не удастся (по отношению к полимерной матрице).

Для типов структур РС, ННС и СНС-1 с $\theta > 0,45$ об.д. таких проблем не возникает, и технолог достигает результата путем повышения температуры переработки в пределах 180–280°C, с учетом температуры деструкции и времени термостабильности расплава ДНПКМ.

Для получения качественных изделий методом литья под давлением с толщиной стенки от 0,5–5 мм на современных термопластавтоматах значение эффективной вязкости расплавов полимеров или ДНПКМ можно принять равным ~1000 Па·с [4].

Тогда для компенсации повышения вязкости расплавов ДНПКМ свыше 1000 Па·с следует повышать температуру переработки для структур типа СНС-1, СНС-2 и ВНС:

– для СНС-1 и СНС-2 с $\theta \geq 0,45$ об.д., $a_{cp}/d \geq 0,45$ и $\phi_n \leq 0,27$ об.д. – на ~ 40°C (со 180 до 220°C);

– для СНС-2 с $\theta = 0,35$ об.д., $a_{cp}/d = 0,32$ и $\phi_n = 0,32$ об.д. – на ~ 60°C (со 180 до 240°C);

– для СНС-2 с $\theta = 0,25$ об.д., $a_{cp}/d = 0,21$; $\phi_n = 0,37$ об.д. – на ~ 80°C (со 180 до 260°C);

– для ВНС с $\theta = 0,2$ об.д., $a_{cp}/d = 0,17$ и $\phi_n = 0,39$ об.д. – на ~ 100°C (со 180 до 280°C).

– для ВНС с $\theta = 0,10$ об.д., $a_{cp}/d = 0,09$ и $\phi_n = 0,44$ об.д. следовало бы повысить температуру расплава ДНПКМ до ~300°C (на 120°C), однако это представляется нецелесообразным в связи с началом термоокислительной деструкции полимера.

Высоковязкие расплавы полимеров с низкой термостабильностью и создание ДНПКМ с типом структур СНС и ВНС на их основе могут представлять значительные трудности в технологии переработки и получения изделий различными методами.

Снижение вязкости таких полимерных композиционных материалов достигается путем варьирования технологических параметров – повышением температуры переработки и давления (прессование) или изменением состава ДНПКМ (введение реологических добавок, смазок, пластификаторов и т.д.).

Заключение

Таким образом, впервые реологические свойства дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов рассмотрены с позиций формирования дисперсной фазы с разным типом решеток, функционального деления полимерной матрицы ($\phi_n = \theta + B + M$) и построения дисперсных систем с разными типами структур (РС, ННС, СНС, ВНС) в терминах обобщенных параметров (θ , a_{cp}/d).

Такой подход позволяет прогнозировать и описывать реологические свойства для всех ДНПКМ с различными типами дисперсных структур, с использованием дисперсной фазы (наполнителя) с известными геометрическими размерами (d), плотностью упаковки (параметр $k_{уп}$ и ϕ_m) на основе данной полимерной матрицы.

Установлено влияние температуры на технологию переработки ДНПКМ с разными типами структур в изделия методом литья под давлением.

Представленные данные имеют общий теоретический характер и могут быть использованы при создании композиционных материалов с различными типами дисперсной структуры с матрицами разной природы (металлической, керамической и полимерной).

Литература

1. Полимерные композиционные материалы. Состав. Структура. Свойства. Под ред. акад. А.А. Берлина, гл. 7 «Технология получения дисперсно-наполненных пластических масс» / И.Д. Симонов-Емельянов. – СПб.: Профессия, 2009. – С. 314–354.
2. Кербер М.Л., Буканов А.М., Кандырин Л.Б. и др. // Физические и химические процессы при переработке полимеров. — СПб: Научные основы и технологии, 2013. – 314 с., ил.
3. Малкин А.Я., Леонов А.И. / Реология – концепции, методы, приложения – СПб: Профессия, 2007. – 557 с.
4. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. / Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. // Л.: Химия, 1983.
5. 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.
6. Симонов-Емельянов И.Д. / Построение структур в дисперсно-наполненных полимерах и свойства композиционных материалов // Пластические массы. – 2015. – № 9–10. – С. 29–36.
7. Кречетов Д.Д., Симонов-Емельянов И.Д. / Структура, обобщенные параметры и реологические свойства дисперсно-наполненных термопластов. // Материаловедение. – 2020. – № 9. – С. 38–44.
8. Симонов-Емельянов И.Д., Шембель Н.Л., Прокопов Н.И., Ушакова О.Б., Гервальд А.Ю., Суриков П.В., Марков А.В., Пашкин И.И. / Сборник «Методы технологических свойств наполнителей и полимерных материалов» // М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2014. – 130 с.