

УДК 541.64: 539.2

Г.В. КОЗЛОВ¹, П.Г. РИЗВАНОВА², И.В. ДОЛБИН¹, Г.М. МАГОМЕДОВ²

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ НАНОПОЛНИТЕЛЯ В МАТРИЦЕ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Исследована степень жесткости агрегатов нанополнителя в полимерной матрице для трех основных классов нанокompозитов: дисперсно-наполненных, полимер/углеродных нанотрубок и полимер/графенов, т.е. наполненных 0D-, 1D- и 2D-нанополнителями. Показано, что независимо от типа нанополнителя структура его агрегатов физически строго характеризуется ее фрактальной размерностью. В свою очередь, реальный (действительный) модуль упругости агрегатов нанополнителя определяется двумя базовыми факторами: их структурой и жесткостью окружающей среды (полимерной матрицы). Подтверждена концепция, предполагающая, что степень усиления полимерных нанокompозитов контролируется структурой нанополнителя.

Ключевые слова: нанокompозит, полимерная матрица, нанополнитель, агрегат, фрактальная размерность, модуль упругости, степень усиления.

Введение

В настоящее время для описания модуля упругости полимерных нанокompозитов в основном применяются микромеханические модели, использующие номинальные характеристики компонент нанокompозита (например, модуль упругости матричного полимера и нанополнителя, степень анизотропии последнего и т.п. [1–3]. Однако позже было обнаружено, что реальный (действительный) модуль упругости нанополнителя в силу его агрегации может существенно (на порядки величины) отличаться от своего номинального значения. Например, авторы [4] показали, что модуль упругости углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокompозита равен (71 ± 55) ГПа при его номинальном значении ~ 1000 ГПа. Этот эффект следует принимать в расчет, особенно если считать корректным предположение авторов [5], что свойства нанокompозитов определяет структура нанополнителя, сформированная в полимерной матрице.

Кроме того, существует еще один аспект определения модуля упругости нанополнителя. Как и следовало ожидать, этот показатель $E_{\text{нан}}$ зависит от жесткости окружающей среды, т.е. полимерной матрицы, характеризуемой ее модулем упругости $E_{\text{м}}$. Впервые эта концепция была предложена в работе [6], где показано, что в случае линейных (цепочечных) структур наполнителя справедливо следующее соотношение:

$$E_{\text{нан}} = 11E_{\text{м}}. \quad (1)$$

Исходя из сказанного выше, цель настоящей работы – установить взаимосвязь между реальным модулем упругости нанополнителя, структурой его агрегатов и модулем упругости матричного полимера на примере типичных представителей трех основных классов полимерных нанокompозитов, наполненных дисперсными наночастицами, углеродными нанотрубками и графеном (0D-, 1D- и 2D-нанополнителями соответственно).

Эксперимент

Для дисперсно-наполненных нанокompозитов в качестве матричного полимера использован полипропилен (ПП) промышленного производства марки «Каплен» 01 030 со среднемолекулярной массой $(2-3) \cdot 10^5$ и индексом полидисперсности 4.5. В качестве нанополнителя применялся глобулярный нанокompозит (ГНУ) производства группы компаний «Объединенные системы» (г. Москва, Российская Федерация) с размером частиц 5–6 нм, удельной поверхностью $1400 \text{ м}^2/\text{г}$ и массовым содержанием 0.25–3.0 мас. %.

Нанокompозиты ПП/ГНУ получены смешиванием компонентов в расплаве на двухшнековом экструдере Thermo Haake модели Reomex RTW 25/42 производства ФРГ. Смешивание выполнено при температуре 463–503 К и скорости вращения шнека 50 об/мин в течение 5 мин. Образцы для испытаний получены методом литья под давлением на литьевой машине Test Sample Molding Apparate RR/TS MP фирмы «Ray-Ran» (Великобритания) при температуре 483 К и давлении 43 МПа.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>