

УДК 541.64:542.938:547.245

МЕХАНИКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ. ОТ ФРАКТАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ К МАКРОМАСШТАБУ

© 2011 г.

Ю.Г. Яновский

Институт прикладной механики РАН, Москва

iam@ipsun.ras.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Обсуждаются перспективы применения фрактального анализа для описания структуры и свойств дисперсно-наполненных нано- и микроразмерными частицами полимерных композитов. Большое внимание уделено таким специфическим для рассматриваемых сред вопросам, как структура и свойства межфазных слоев и агрегация дисперсного наполнителя в полимерной матрице. Даются качественная оценка и физическая трактовка причин изменения свойств (усиления) полимерных композитов на различных масштабных уровнях при введении дисперсного наполнителя.

Ключевые слова: наноструктурированные материалы, полимерные композиты, нано- и микроразмерные дисперсные частицы, структура, фрактальное описание, межфазные слои, усиление.

Согласно многочисленным исследованиям отечественных и зарубежных ученых, варьирование в определенных пределах механических и прочностных свойств композиционных материалов достигается путем их наполнения дисперсными частицами различной природы (технический углерод, силикаты, органические глины и др.). Такие материалы имеют периодическую структуру на наномасштабе, которая может быть охарактеризована, в частности, в рамках фрактального описания [1]. Существенное влияние при этом оказывают геометрические размеры частиц наполнителя. Известно, что эффект усиления композитов – улучшение тех или иных механических характеристик – напрямую связан именно с размерами частиц наполнителя, а в наномасштабе – с их удельной поверхностью.

Согласно [1], большинство наноразмерных частиц обладают фрактальностью поверхности, причем характеризующая ее фрактальная размерность d_n изменяется в относительно широких пределах – от 1.97 до 2.97. Как известно [2] в грубом приближении фрактальные оценки позволяют судить о шероховатости поверхностей наномасштабов. В [2, 3] было показано, что слабо усиливающие наполнители имеют низкие значения d_n (~2.00–2.26), усиливающие наполнители – средние значения ($d_n \approx 2.26$ –2.50), а суперусиливающие – высокие значения фрактальной размерности ($d_n \approx 2.50$ –2.98). Экспериментально также установлено, что повышение усиливающего эффекта хорошо согласуется с увеличением фракталь-

ной размерности (грубо говоря, повышением шероховатости) их поверхности.

В наномасштабной области размер частиц наполнителя играет определяющую роль в формировании механических и прочностных свойств наполненных на их основе композитов [2, 3]. При размерах частиц наполнителя более 100 нм их удельная поверхность изменяется слабо и эффект усиления от их присутствия в композитной матрице в большей степени зависит от физико-химической природы (активности) поверхности частиц.

Экспериментальные подтверждения и обоснования выводов, основанных на фрактальной концепции об усиливающей способности наноразмерных частиц наполнителей, на конкретных объектах, наполненных хорошо охарактеризованными дисперсными наполнителями различной природы, представляют исключительно важный этап создания обобщенной теоретико-экспериментальной концепции механизма усиления полимерных композитов дисперсными частицами. Проблема особенно актуальна для композитов конструкционного и функционального назначения, в частности, для материалов на основе эластомеров, например шинных резин. Именно прочностными свойствами последних определяется технический прогресс в ряде промышленно важных областей – автомобилестроении, авиационной и космической отраслях и др.

Отметим также, что экспериментальное изучение наноскопических структурных и механи-

ческих характеристик материалов, наполненных наноструктурными объектами, – важнейшая научная проблема. Традиционные методы исследования макромеханических свойств таких сред на разрывных машинах слабо отражают особенности наноструктуры материала в силу так называемого масштабного эффекта. Действительно, сравнение нанопрочностных и макропрочностных характеристик показывает их различие на многие десятичные порядки.

Автором с сотрудниками ИПРИМ РАН в ходе прямых экспериментов были изучены наноструктура и нано-, микро-, макромеханические свойства эластомерных композитов (прототипов шинных резин), наполненных хорошо охарактеризованными нано- и микрогабаритными частицами. Наполнители, также как и образцы эластомерных (бутадиен-стирольных) композитов, были изготовлены по оригинальным технологиям. Оригинальные экспериментальные результаты были получены с помощью комплекса современных методов (зондовая микроскопия, наноиндентирование, исследование макропрочности и т.п.). Это позволило детально охарактеризовать наноструктуру, нано-, микро- и макромеханические и прочностные свойства нано- и микрогабаритных объектов. Впервые для подобных эластомерных композитов проведена оценка влияния агрегации наночастиц в эластомерной матрице на наномеханические и прочностные свойства композита. Впервые получены прямые экспериментальные данные о параметрах межфазного слоя в наногабаритных объектах. Проведенный анализ показал, что молекулярная подвижность в межфазных областях практически заморожена, что приводит к высоким абсолютным значениям их температуры стеклования (типичным для стеклообразного состояния полимера) и высоким значениям их модуля упругости. Это позволяет рассматривать межфазные слои как армирующий элемент нанокомпозиата наряду с собственно наполнителем. Проведен сравнительный анализ механических и прочностных характеристик эластомерных композитов, определенных на различных масштабных уровнях: нано-, микро- и макроуровнях. Установлена роль масштабного фактора при деформировании подобного рода объектов. Показано, что в зависимости от схемы деформирования (нано-, микроиндентирование или разрывные испытания при растяжении макрообразцов) композит проявляет различные механические свойства, отличающиеся в сотни раз.

Экспериментальные данные, полученные на конкретных объектах, наполненных хорошо охарактеризованными дисперсными наноразмерными

наполнителями различной природы с узкой полидисперсностью, позволили сформулировать обобщенную теоретико-экспериментальную концепцию механизма усиления полимерных композитов наноразмерными наполнителями и установить управляющие этим механизмом нанопараметры.

Была установлена взаимосвязь между наноструктурой объектов и определяющими усиливающий и суперусиливающий эффекты параметрами. К числу последних были отнесены: размеры частиц (с диаметрами менее 100 и 50 нм соответственно), средние фрактальные размерности поверхности наполнителей, величины агрегатов наночастиц и характеристики их распределения в полимерной матрице, а также геометрические и наномеханические характеристики межфазных слоев на границе «полимерная композиционная матрица – наполнитель».

В рамках фрактального подхода объяснен механизм усиления полимерных композитов наночастицами. Установлены управляющие макросвойствами подобных сред наноструктурные параметры и предложены методы их оценки. Построены определяющие эффект усиления соотношения.

Можно считать доказанным тот факт, что эффект усиления эластомерных (гиперупругих) композитов наноразмерными частицами является истинным наноэффектом, который определяется только размером частиц исходного наногабаритного наполнителя. Агрегация наночастиц, всегда наблюдаемая в реальных материалах, лишь несколько ослабляет этот эффект, однако не препятствует его проявлению в целом. Теоретическое описание подобного эффекта, также как и пути управления определяющими его величину параметрами, с хорошей степенью адекватности можно построить в рамках фрактального формализма.

Список литературы

1. Avnir D., Farin D., Pfeifer P. Molecular fractal surfaces // *Nature*. 1984. Vol. 308, No 5959. P. 261–263.
2. Kozlov G.V., Yanovsky Yu.G., Zaikov G.E. Structure and properties of particulate – filled polymer composites. The fractal analysis. Iuc. NY: Nova Science Pblsh., 2010. 288 p.
3. Yanovsky Yu.G. et al. Scale factor by investigations of mechanical properties of composite materials filled with nanosized particles // *Intern. Journal of Nanomechanics, Science and Technology*. 2010. V. 1. No 3. P. 195–210.
4. Яновский Ю.Г. и др. Физическая модель поведения полимерных наноструктурированных композитов при наноиндентировании // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2010. Т. 16, №3. С. 445–453.

**THE MECHANICS OF NANO-STRUCTURED MATERIALS AND COMPOSITES.
FROM FRACTAL DESCRIPTION TO MACRO SCALE**

Yu. G. Yanovsky

The potential of applying the fractal analysis to the description of the structure and properties of polymer composites dispersedly-filled with nano- and micro-size particles is discussed. Much attention is paid to such important for above media problems as structure and properties of the inter-phase layers and aggregation of disperse filler particles in a polymeric composite matrix. Qualitative evaluations and physical interpretation of the alteration of the properties (reinforcement effect) of polymer composites filled with disperse particles at different scale levels is considered, taking into account the fractal parameters.

Keywords: nanostructural materials, polymer composites, nano- and microsize disperse particles, structure, fractal description, interphase layers, reinforcement.