



Получено: 5.09.2022 г. | Принято: 13.09.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.346.353>

Научная статья

РОЛЬ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦ В УПРОЧНЕНИИ ИМИ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

В.В.Сызранцев¹, к.ф.-м.н., директор НИЦ "Нанотехнологии и наноматериалы", ORCID: 0000-0001-5388-8224 / vvveliga@mail.ru

Аннотация. Проведено сравнительное исследование упрочнения отвержденной эпоксидной смолы наночастицами SiO₂ и Al₂O₃, полученных различными методами. Показана связь между силой центров на поверхности частиц, величиной их фрактальной размерности и толщиной создаваемого ими межфазного слоя.

Ключевые слова: Наночастицы, полимерный нанокомпозит, поверхностные центры, синтез наночастиц, фрактальная размерность

Для цитирования: В.В. Сызранцев. Роль структуры поверхности наночастиц в упрочнении ими эпоксидной смолы. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 6. С. 346–353. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.346.353>

Received: 5.09.2022 | Accepted: 13.09.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.346.353>

Original paper

THE ROLE OF THE SURFACE STRUCTURE OF NANOPARTICLES IN THEIR HARDENING OF EPOXY RESIN

V.V.Syzrantsev¹, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Director of SRC "Nanotechnologies and nanomaterials", ORCID: 0000-0001-5388-8224 / vvveliga@mail.ru

Abstract. A comparative study of the hardening of the cured epoxy resin with SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles obtained by various methods has been carried out. The relationship between the strength of the centres on the surface of the particles, the value of their fractal dimension, and the thickness of the interfacial layer they create is shown.

Keywords: Nanoparticles, polymer nanocomposite, surface centers, nanoparticle synthesis, fractal dimension

For citation: V.V.Syzrantsev. The role of the surface structure of nanoparticles in their strengthening of epoxy resin. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 6. PP. 346–353. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.346.353>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимеры используются во многих отраслях промышленности, включая биомедицину, батареи, керамику, композиты, магнетизм, упаковку для электроники, твердое топливо и клеи. Включение различных наполнителей [1, 2]

INTRODUCTION

Polymers are now used in many industries, including biomedicine, batteries, ceramics, composites, magnetism, electronics packaging, solid fuels and adhesives. The inclusion of various fillers [1, 2] can significantly modify such properties as mechanical strength

¹ Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия / Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia



может значительно изменить такие свойства, как механическая прочность [3, 4], термо- [5] и электропроводность [6], термическая стабильность [7], магнитные характеристики [8, 9], огнестойкость [10, 11] и др. Свойства таких композитов зависят от размера, формы, природы частиц, взаимодействия между их составляющими, распределения частиц в матрице.

Специфика наночастиц состоит в том, что их поверхность обладает значительным количеством активных центров, которые зависят от условий и метода синтеза частиц. Упрочняющие эффекты могут наблюдаться при использовании одних и тех же наночастиц в сочетаниях с различными матрицами или различных наночастиц с одной и той же матрицей. Было показано, что разные методы синтеза формируют поверхности наночастиц с различными свойствами при сохранении фазового состава материала [12, 13]. Также была показана связь между типами поверхностных центров, их силой и взаимодействием наночастиц с дисперсионной средой. В частности, наблюдалась значительная разница в силе активных центров для исследованных образцов, которая отразилась на реологии наножидкостей на основе эпоксидной смолы и воды.

Процесс модификации композита наночастицами можно разделить на химический и механический аспекты. Под механическим взаимодействием подразумевается влияние частиц на структуру матрицы жестких связей, ее морфологию и локальную плотность, а под химическим (структурным) – увеличение количества химических связей, вызванное внесением частиц.

Ярким примером этого являются два типа поверхности, обусловленные соответствующими активными группами: гидрофильными и гидрофобными. Гидрофильные OH-группы являются полярными и способны образовывать водородные связи при наличии таких же групп в смеси. Как известно, эпоксидная смола не обладает такими группами и является гидрофобной, но при отверждении происходит разрыв эпоксидных групп с образованием сшивок и свободных OH-групп. Кроме этого, ряд отвердителей могут работать непосредственно через OH-группы, включая их в процесс образования связей. Гидрофобные CH-группы относятся к тому же классу соединений, что и молекулы смолы. С одной стороны, это должно способствовать более качественному смешиванию наночастиц и смолы. С другой стороны, такие группы не являются активными в процессе отверждения, то есть наличие гидрофобного нанопорошка не дает дополнительных химических связей и не должно влиять на протекание процесса отверждения. Таким образом, гидрофобные частицы влияют на эпоксидный композит как

[3, 4], thermal [5] and electrical conductivity [6], thermal stability [7], magnetic characteristics [8, 9], fire resistance [10, 11] and other properties. The properties of such composites depend on the size, shape, nature of the particles, interaction between their constituents, and distribution of the particles in the matrix.

The specificity of nanoparticles is that their surface has a significant number of active centres, which depend on the conditions and method of particle synthesis. Strengthening effects can be observed using the same nanoparticles in combinations with different matrices or different nanoparticles with the same matrix. Different synthesis methods have been shown to form nanoparticle surfaces with different properties while maintaining the phase composition of the material [12, 13]. The relation between the types of surface centres, their strength and interaction of nanoparticles with the dispersion medium was also shown. In particular, there was a significant difference in the strength of active centres for the samples studied, which was reflected in the rheology of epoxy and water based nanofluids.

The process of composite modification by nanoparticles can be divided into chemical and mechanical aspects. Mechanical interaction refers to the effect of particles on the structure of the rigid bonding matrix, its morphology and local density, and chemical (structural) interaction refers to the increase in the number of chemical bonds caused by the introduction of particles.

A prime example of this effect are two types of surface due to the respective active groups: hydrophilic and hydrophobic. Hydrophilic OH-groups are polar and can form hydrogen bonds in the presence of the same groups in the mixture. It is known that epoxy resin does not have such groups and is hydrophobic, but during curing the epoxy groups are broken to form cross-links and free OH-groups. In addition, a number of hardeners can work directly through the OH-groups by incorporating them in the bonding process. The hydrophobic CH groups belong to the same class of compounds as the resin molecules. On the one hand, this should contribute to better mixing of nanoparticles and resin. On the other hand, such groups are not active in the curing process, i.e. the presence of hydrophobic nanopowders does not initiate additional chemical bonds and should not affect the curing process. Thus, hydrophobic particles affect the epoxy composite as solid particles introduced into the resin matrix without explicit chemical interaction with it. For hydrophilic nanopowders there is both chemical and mechanical interaction with the resin.

твердые частицы, занесенные в матрицу смолы без явного с ней химического взаимодействия. А для гидрофильного нанопорошка имеет место как химическое, так и механическое взаимодействие со смолой.

Для учета измененной морфологии композитного материала в окрестности границ "частица – полимер" используется модель материала со сферическими и цилиндрическими включениями с учетом межфазного слоя, масштабных и адгезионных эффектов (модифицированный метод Эшелби) [14]. Параметры этого межфазного слоя (его размер, модуль упругости и сила адгезии к твердой фазе) определяются эффектом присутствующих на поверхности наночастиц активных центров, например, изменения стехиометрии реакции вследствие изменения плотностей реагентов, которые могут сильно отличаться в зависимости от способа их производства [12, 13] и распределения частиц по размерам. Расчеты показали [15], при исключении влияния поверхностного слоя (взаимодействия "наполнитель – матрица"), модуль Юнга не зависит от размера частиц наполнителя при сохранении той же объемной концентрации. При учете поверхностного слоя, уменьшение размера наполнителя вызывало увеличение модуля Юнга. Такое поведение, вероятно, связано с увеличением объемной доли поверхностной фазы, если размер включения уменьшается при сохранении его концентрации.

Целью данной работы является сравнительный анализ упрочняющего эффекта наночастиц SiO_2 и Al_2O_3 различных методов синтеза на отвержденную эпоксидную смолу.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл.1 приведены свойства использованных наночастиц.

В эксперименте применялась эпоксидная смола ЭД20 (PolyMax (Россия)). После допирования в нее наночастиц суспензию подвергали ультразвуковому воздействию в течение 30 мин в УЗ-ванне "Сапфир" (Россия) в качестве меры по деагломерации частиц. После этого добавляли отвердитель ПЭПА в соотношении 1:10 к массе смолы. Отверждение проходило в течение 24 ч при комнатной температуре.

Для оценки механических характеристик использовался метод инструментального индентирования на комплексе наномеханических испытаний "Наноскан-4D" (Тиснум, Россия). Эксперименты по индентированию проводились с использованием нанотвердомера "НаноСкан-3D", предназначенного для измерений твердости материалов по шкалам индентирования, модуля упругости и еще ряда параметров, в том числе описанных в ГОСТ Р 8.748-2011. Модуль упругости и твердость

To take into account the altered morphology of the composite material in the vicinity of the particle-polymer boundary, a material model with spherical and cylindrical inclusions with interfacial layer, scale and adhesion effects (modified Eshelby method) [14]. The parameters of this interfacial layer (its size, elastic modulus and adhesion force to the solid phase) are determined by the effect of active centres present on the nanoparticle surface, e.g., changes in the reaction stoichiometry due to changes in the reactant densities, which may vary greatly depending on the way of its production [12, 13] and particle size distribution. Calculations have shown [15] that by excluding the influence of the surface layer (filler-matrix interaction), the Young's modulus is independent of the filler particle size while maintaining the same bulk concentration. When the surface layer is taken into account, a decrease in the filler size caused an increase in the Young's modulus. This behavior is probably due to an increase in the volume fraction of the surface phase if the size of the inclusion decreases while maintaining its concentration.

The aim of this work is to compare the strengthening effect of SiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles of different synthesis methods on cured epoxy resin.

RESEARCH METHODS

Table 1 shows properties of the nanoparticles used.

ED20 epoxy resin (PolyMax, Russia) was used in the experiment. After doping it with nanoparticles, the suspension was subjected to ultrasound for 30 minutes in a Sapphire ultrasonic bath (Russia) as a particle deagglomeration measure. The PEPA hardener was then added in a ratio of 1:10 to the resin mass. Curing took place for 24 hours at room temperature.

The method of instrumental indentation on Nanoscan-4D nanomechanical testing complex (Tisnum, Russia) was used to assess the mechanical characteristics. Indentation experiments were carried out using NanoScan-3D nanohardness meter designed to measure hardness of materials by indentation scales, modulus of elasticity and a number of parameters, including those described in GOST R 8.748-2011. Modulus of elasticity and hardness were determined using the Oliver-Farr method. The method consists in selecting the parameters of a power function describing the experimental dependence of the indentation depth and contact area on the applied force, and calculating the hardness and modulus of elasticity from these data. The microhardness of the cured resin was determined at $70 \times 70 \mu\text{m}$. A series of pinholes were made on the surface (3×3) with a force of 0.03 N. The depth of the indentation was $\sim 2 \mu\text{m}$.



Таблица 1. Сравнительные характеристики частиц [13, 16]

Table 1. Comparative characteristics of the particles [13, 16]

Материал Material	Тип наночастиц Type of particles	Метод синтеза Method of synthesis	Средний диаметр, <d>, нм Average dia., nm	Увеличение концентрации частиц за счет присоединенного слоя в ЭД-20 (раз) Increase of particle concentration due to attached layer in ED-20 (times)	Фрактальная размерность Fractal dimension
SiO ₂	As	Пирогенный Pyrogenic	22,7	10,73	2,21
	Ls	Жидкофазный метод Liquid phase method	28,2	5,09	2,64
	Ts	Испарение электронным пучком Electron beam evaporation	24,3	6,59	2,1
	Ps	Плазмахимический Plasma chemical	23,8	7,41	2,25
Al ₂ O ₃	Aa	Пирогенный Pyrogenic	27,7	2,96	2,57
	La	Жидкофазный метод Liquid phase method	27,2	1,03	2,88
	Ta	Испарение электронным пучком Electron beam evaporation	34,3	2,5	2,43
	Ea	Электровзрыв проволочки Electric wire explosion	64,3	2,12	2,91

определяли по методике Оливера – Фарра. Данная методика состоит в подборе параметров степенной функции, описывающей экспериментальную зависимость глубины погружения индентора и площади контакта от приложенной силы, и расчете твердости и модуля упругости по указанным данным. Микротвердость отвержденной смолы определялась на участке 70×70 мкм. Была выполнена серия уколов по поверхности (3×3) с усилием 0,03 Н. Глубина индентирования составила ~2 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Различие эффекта гидрофильного (Ts) и гидрофобного порошка (Tsf) на эпоксидную смолу продемонстрировано на рис.1. Видно, что при достижении максимума модуля Юнга добавка структурного влияния имеет значительную величину, по сравнению с механическим влиянием.

На рис.2 и 3 представлены экспериментальные зависимости модуля Юнга отвержденной смолы от концентрации наночастиц. Из полученных

RESULTS AND DISCUSSION

The difference in the effects of hydrophilic (Ts) and hydrophobic powder (Tsf) on epoxy is demonstrated in Fig.1. It can be seen that when the maximum of the Young's modulus is reached, the added structural influence has a significant magnitude compared to the mechanical influence.

Fig.2 and 3 show the experimental dependencies of the Young's modulus of cured resin on the concentration of nanoparticles. From the data obtained it is evident that the maximum of the Young's modulus of composites is located at different nanoparticle concentrations. That is, the particle-resin interaction has different significance for the particles obtained by different synthesis methods. The intensity of interaction introduced by nanoparticles coincides with the assumptions obtained in [13], i.e. it is due to the strength of surface centres formed during nanoparticle synthesis. The fastest hardening effect in silicon dioxide is produced by As particles with strong Lewis acid centres. And

данных видно, что максимум модуля Юнга композитов расположен при разных концентрациях наночастиц. То есть взаимодействие "частица – смола" имеет разное значение для частиц, полученных различными методами синтеза. Интенсивность взаимодействия, вносимого наночастицами, совпадает с предположениями, полученными в [13], то есть она обусловлена силой поверхностных центров, образованных при синтезе наночастиц. Наиболее быстро эффект упрочнения среди диоксида кремния создают частицы As, имеющие сильные Льюисовские кислотные центры. А наиболее слабый, замедленный эффект показывают частицы Ls, поверхность которых обладает только Бренстедовскими основными центрами. Эффективность взаимодействия "частица – смола" может быть определена по увеличению концентрации частиц за счет присоединенного слоя (табл.1), вычисленному по увеличению вязкости, соответствующей наножидкости [16].

Аналогичная ситуация возникает и для образцов, содержащих наночастицы оксида алюминия. Частицы Aa, имея более активную поверхность [13], быстрее упрочняют композит, чем прочие частицы. А частицы La, имея самую пассивную поверхность, упрочняют композит при самой большой концентрации частиц. Таким же образом может быть прослежена эффективность взаимодействия "частица – смола" через увеличение концентрации частиц за счет присоединенного слоя (табл.1) [16].

В работах [17, 18] представлен метод расчета упрочнения полимера дисперсными частицами. Там учитывается величина межфазного слоя "матрица – наполнитель", а также сила взаимодействия между частицами и полимером через толщину межфазного слоя и фрактальную размерность частиц. В зависимости от вариации этих параметров коэффициент упрочнения полимера может вести себя так, как представлено на рис.2 и 3. Однако необходимо учитывать, что межфазные слои соседних частиц при определенной их концентрации могут перекрываться, частицы могут агломерировать и т.д. Кроме того, при изменении метода синтеза частиц, а значит активности их поверхности, может варьироваться интенсивность взаимодействия между частицами и средой. Это в комплексе может влиять на взаимодействие "частица – среда" и, соответственно, на прочность композитов.

На основании полученных результатов была выведена зависимость между интенсивностью взаимодействия "частица – смола", определяемая концентрацией максимума модуля Юнга и фрактальной размерностью, вычисленной в [13] (рис.4).

Видно, что максимум взаимодействия между частицами и средой не соответствует максимуму фрактальной размерности. Вероятно, что близкое

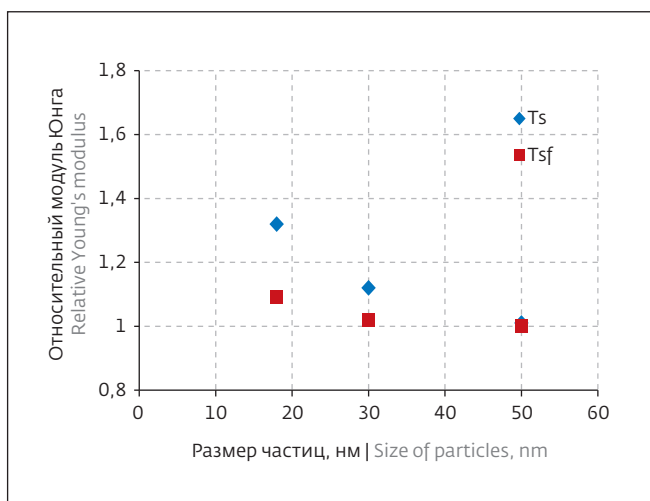


Рис.1. Зависимости относительного модуля Юнга для композитов с гидрофильными частицами Ts и гидрофобными частицами Tsf от их размера

Fig.1. Dependences of the relative Young's modulus for composites with hydrophilic particles Ts and hydrophobic particles Tsf on their size

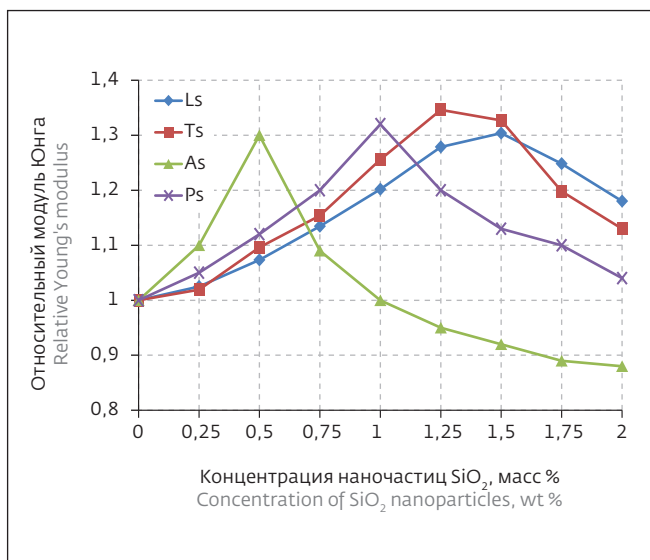


Рис.2. Зависимости относительного модуля Юнга для композитов на основе смолы ЭД-20 с наночастицами диоксида кремния от их концентрации

Fig.2. Dependences of the relative Young's modulus for composites based on ED-20 resin with silica nanoparticles on their concentration

the weakest delayed effect is shown by Ls particles which surface has only Brensted main centres. The efficiency of particle-resin interaction can be determined by the increase in particle concentration due to the attached layer (see Table 1) calculated from



к идеальному значению фрактальной размерности соответствует наночастицам, которые уже не способны на сильное взаимодействие. Здесь можно провести аналогию с конденсацией молекул на кластер при синтезе наночастиц. При достижении кластером формы метастабильного изомера вероятность конденсации на него новых молекул резко падает, так как вакантные места исчезают и начинается рост новых кластеров. Здесь так же получается, что менее идеальная структура оказывается более активной при взаимодействии с дисперсной средой. Наиболее активными являются частицы: среди образцов SiO_2 с $D=2,2$, а среди образцов Al_2O_3 с $D = 2,55$.

ВЫВОДЫ

Было показано, что концентрации максимумов модуля Юнга композита зависят от активности поверхности наночастиц, которая определяется их методом синтеза.

Активность поверхности может быть отражена через толщину присоединенного к частице слоя полимера, вызывая увеличение объемной концентрации дисперсной фазы. Прослежена взаимосвязь между величиной фрактальной размерности наночастиц и их концентрацией в композите при максимуме упрочнения.

В рамках серийного производства для контроля качества и при разработке технологических процессов оказывается необходимо учитывать метод синтеза наночастиц и дополнительно контролировать стабильность распределения частиц по размерам и величины фрактальной размерности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на оборудовании НИЦКП Нанотехнологии и наноматериалы" ГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, при поддержке ЦКП "Механика" (ИТПМ им. С.А.Христиановича СО РАН).

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Rueda M.M., Auscher M.C., Fulchiron R., Périé T., Martin G., Sonntag P., Cassagnau P. Rheology and applications of highly filled polymers:

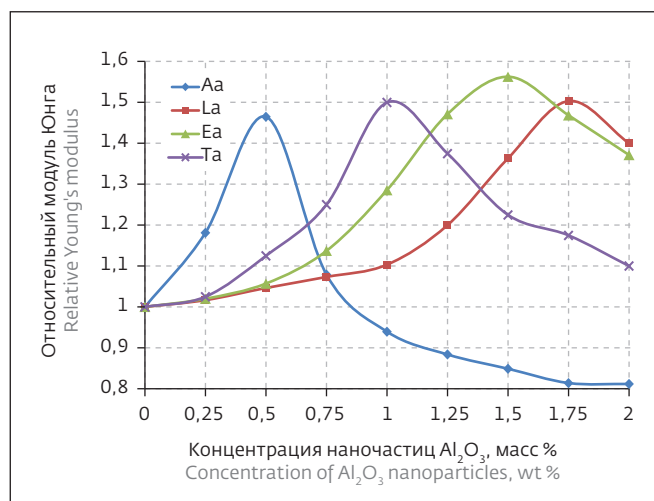


Рис.3. Зависимости относительного модуля Юнга для композитов на основе смолы ЭД-20 с наночастицами оксида алюминия от их концентрации

Fig.3. Dependences of the relative Young's modulus for composites based on ED-20 resin with alumina nanoparticles on their concentration

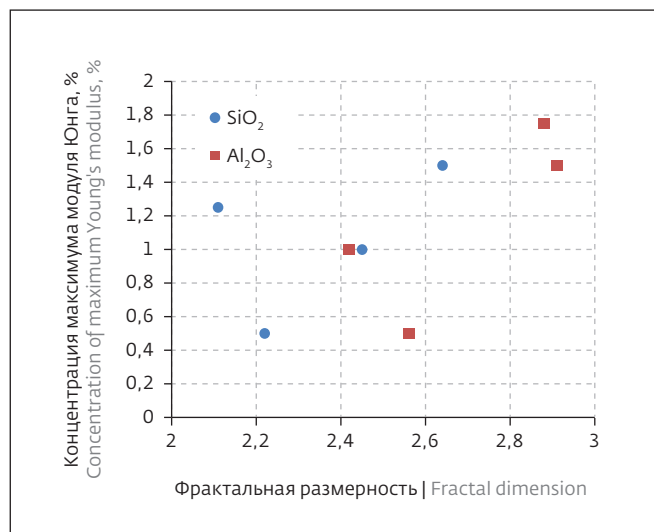


Рис.4. Корреляция фрактальной размерности и концентрации наночастиц в максимуме модуля Юнга композита

the increase in viscosity corresponding to nanofluid [16].

A similar situation occurs for samples containing aluminium oxide nanoparticles. Aa particles, having more active surface [13], harden the composite faster than other particles. The La particles having the most passive surface harden the composite at the highest particle concentration. In the same way the



- A review of current understanding // *Progress in Polymer Science* 2017. V. 66. PP. 22-53.
2. **Bailey E.J., Winey K.I.** Dynamics of polymer segments, polymer chains, and nanoparticles in polymer nanocomposite melts: A review // *Progress in Polymer Science* 2020. V. 105. P. 101242.
 3. **Liang J.Z.** Reinforcement and quantitative description of inorganic particulate-filled polymer composites // *Composites Part B* 2013. V. 51. PP. 224-32.
 4. **Mohandesi A.J., Refahi A., Meresht S.E., Berenji S.** Effect of temperature and particle weight fraction on mechanical and micromechanical properties of sand-polyethylene terephthalate composites: a laboratory and discrete element method study // *Composites Part B*, 2011. V. 42. PP. 1461-467.
 5. **Takahashi S., Imai Y., Kan A., Hotta Y., Ogawa H.** Dielectric and thermal properties of isotactic polypropylene/hexagonal boron nitride composites for high-frequency applications // *J. Alloys Compounds* 2014. V. 615. PP. 141-145.
 6. **Tanaka T., Kozako M., Okamoto K.** Toward high thermal conductivity nanomicro epoxy composites with sufficient endurance voltage. *J Int Councl Electr Eng* 2012. V. 2. PP. 90-98.
 7. **Bikiaris D.** Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part II: an overview on thermal decomposition of polycondensation polymers // *Thermochim Acta* 2011. V. 523. PP. 25-45.
 8. **Peinado F., Medel E., Silvestre R., Garcia A.** Open-grade wearing course of asphalt mixture containing ferrite for use as ferromagnetic pavement // *Composites Part B* 2014. V. 57. PP. 262-268.
 9. **Hunyek A., Sirisathitkul C.** Electromagnetic and dynamic mechanical properties of extruded cobalt ferrite-polypropylene composites // *Polym Plast Technol Eng* 2011. V. 50. PP. 593-598.
 10. **Olalla B., Carrot C., Fulchiron R., Boudimbou I., Peuvrel-disdier E.** Analysis of the influence of polymer viscosity on the dispersion of magnesium hydroxide in a polyolefin matrix. *Rheol Acta* 2011. V. 51. PP. 235-247.
 11. **Mills S.L., Lees G.C., Liauw C.M., Lynch S.** Dispersion assessment of flame retardant filler/polymer systems using a combination of X-ray mapping and multifractal analysis // *Polym Test* 2002. V. 21. PP. 941-947.
 12. **Bardakhanov S.P., Vasiljeva I.V., Kuksanov N.K., Mjakin S.V.** Surface functionality features of nanosized silica obtained by electron beam evaporation at ambient pressure // *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2010, no. 241695, p. 5.
 13. **Сызранцев В.В.** Анализ вариации свойств поверхности наночастиц SiO₂ и Al₂O₃, полученных разными методами // *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2022. Т. 24. № 3.

effectiveness of particle-resin interaction can be traced through the increase of particle concentration due to the attached layer (see Table 1) [16].

In [17, 18] a method of calculating polymer hardening by dispersed particles is presented. It takes into account the size of the matrix-filler interfacial layer as well as the interaction force between the particles and the polymer through the thickness of the interfacial layer and the fractal dimension of the particles. Depending on the variation of these parameters, the polymer hardening coefficient can behave as illustrated in Fig.2 and 3. However, it must be taken into account that the interfacial layers of neighbouring particles may overlap at a certain concentration, the particles may agglomerate, etc. In addition, when the method of particle synthesis is changed, same as the activity of their surface, the intensity of interaction between the particles and the medium may vary. The combination of these factors can affect the particle-medium interaction and, consequently, the strength of the composites.

Based on the obtained results, the relationship between intensity of the particle-resin interaction determined by the concentration of maximum Young's modulus and the fractal dimension calculated in [13] (Fig.4) was obtained.

It is observed that the maximum of interaction between particles and medium does not correspond to the maximum of fractal dimensionality. It is likely that close to ideal value of fractal dimension corresponds to nanoparticles which are no longer capable of strong interaction. An analogy can be drawn here with the condensation of molecules onto a cluster in the synthesis of nanoparticles. When a cluster reaches the form of a metastable isomer, the probability of condensation of new molecules on it falls dramatically because vacancies disappear and new clusters start growing. Here, too, it happens that a less-than-ideal structure turns out to be more active in its interaction with the dispersed medium. The most active are particles: in SiO₂ samples with D=2.2, and in Al₂O₃ samples with D=2.55.

CONCLUSIONS

It has been shown that concentrations of the maximums of the composite's Young's modulus depend on the surface activity of the nanoparticles, which is determined by their synthesis method.

The surface activity can be reflected through the thickness of the polymer layer attached to the particle, causing an increase in the volume concentration of the dispersed phase. The relationship between the fractal dimension of



14. Lurie S., Volkov-Bogorodsky D., Zubov V., Tchkova N. Advanced theoretical and numerical multi-scale modeling of cohesion/adhesion interactions in continuum mechanics and its applications for filled nanocomposites // Computational Mater. Science, 2009. V. 45, no. 3. PP. 709–714.
15. Черноус С.В., Шилько Д.А., Панин С.В. Анализ механического поведения дисперсно-армированного нанокompозита. Метод расчета эффективных упругих характеристик // Физическая мезомеханика, 2010. V. 13, no. 4. PP. 85–90.
16. Syzrantsev V.V., Arymbaeva A.T., Zavjalov A.P., Zobov K.V. The nanofluids' viscosity prediction through particle-media interaction layer // Materials Physics and Mechanics. 2022. V. 48, no. 3. PP. 386–396.
17. Козлов Г.В., Долбин И.В. Взаимосвязь эффективности и степени агрегации нанонаполнителя в полимерных нанокompозитах // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. V. 24, no. 1. PP. 45–50, <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9054>
18. Микитаев А.К., Козлов Г.В. Структурная модель прочности нанокompозитов Полиметилметакрилат / функционализированные углеродные нанотрубки // Materials Physics and Mechanics 2015. V. 24. PP. 187–193.

the nanoparticles and their concentration in the composite at the maximum hardening has been traced.

Within the framework of serial production and for quality control and development of technological processes it is necessary to take into account the method of nanoparticles synthesis and, additionally, control the stability of particle size distribution and fractal dimension value.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out on the equipment of SC Nanotechnologies and Nanomaterials” of GSOTU named after acad. M.D. Millionshchikov, with the support of SRC “Mechanics” (Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS)

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal’s website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Юрген Бёккер
СПЕКТРОСКОПИЯ

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 528 с., ISBN 978-5-94836-220-5

Цена 760 руб.

Спектроскопия как средство описания атомов, ионов и молекул с помощью типовых длин волн, измеряемых при возбуждении, принадлежит сегодня к важнейшим и самым распространенным методам инструментальной аналитики. Специальные измерительные устройства, в том числе абсорбционные и эмиссионные спектрометры, обеспечивают точное определение количественного и качественного состава газообразных, жидких и твердых веществ.

В книге дается обзор разных методов атомной и молекулярной спектрометрии и рассматриваются многие аналитические проблемы, решаемые в лабораториях промышленных предприятий, в естественнонаучных и технических учреждениях, а также проблемы изучения и защиты объектов окружающей среды. В книге представлена широкая гамма существующих методов исследования, а также перечень приборов с руководством по их применению.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru