



Получено: 14.12.2023 г. | Принято: 21.12.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.1.74.79>

Научная статья

ВЗАИМОСВЯЗЬ СВОЙСТВ И СТЕПЕНИ ДИСПЕРСИИ НАНОПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИМЕР/УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Л.Б.Атлуханова¹, к.п.н., доц., ORCID: 0000-0002-5341-3349

И.В.Долбин², к.х.н., ст. науч. сотр., доц., ORCID: 0000-0001-9148-2831 / i_dolbin@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе введен параметр степени дисперсии нанополнителя, количественно характеризующий уровень дисперсии последнего в наноккомпозитах полимер/углеродные нанотрубки. Этот параметр является функцией размера агрегатов нанополнителя и его содержания. Показана взаимосвязь уровня дисперсии нанополнителя и степени усиления, что дает возможность прогнозирования свойств рассматриваемых наноккомпозитов.

Ключевые слова: наноккомпозит, углеродные нанотрубки, дисперсия, степень усиления, кольцеобразные структуры

Для цитирования: Л.Б. Атлуханова, И.В. Долбин. Взаимосвязь свойств и степени дисперсии нанополнителя для наноккомпозитов полимер/углеродные нанотрубки. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 1. С. 74–79. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.1.74.79>

Received: 14.12.2023 | Accepted: 21.12.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.1.74.79>

Original paper

THE INTERCONNECTION OF PROPERTIES AND DISPERSION DEGREE OF NANOFILLER FOR NANOCOMPOSITES POLYMER/CARBON NANOTUBE

L.B.Atlukhanova¹, Cand. of Sci. (Pedagogical), Docent, ORCID: 0000-0002-5341-3349

I.V.Dolbin², Cand. of Sci. (Chemical), Associate Professor, Docent, ORCID: 0000-0001-9148-2831 / i_dolbin@mail.ru

Abstract. In present work, the parameter of the dispersion degree of nanofiller is introduced, which characterizes quantitatively the dispersion level of the latter in nanocomposites polymer/carbon nanotube. This parameter is a function of size of the nanofiller aggregate and content. The relationship between the dispersion level of the nanofiller and the reinforcement degree is shown, which makes it possible to predict the properties of the nanocomposites under consideration.

Keywords: nanocomposite, carbon nanotubes, dispersion, reinforcement degree, ring-like structures

For citation: L.B. Atlukhanova, I.V. Dolbin. The interconnection of properties and dispersion degree of nanofiller for nanocomposites polymer/carbon nanotube. NANOINDUSTRY. 2024. T. 17. No. 1. PP. 74–79. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.1.74.79>

¹ Дагестанский государственный медицинский университет, г. Махачкала, Россия / Dagestan State Medical University, Makhachkala, Russia

² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М.Бербекова, г. Нальчик, Россия / Kabardino-Balkarian State University named after H.M.Berbekov, Nalchik, Russia



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время хорошо известна важность процесса агрегации (и противоположного ему по физическому смыслу процесса диспергирования) нанонаполнителя для формирования свойств полимерных нанокомпозитов [1, 2]. Однако, исследование двух указанных взаимодополняющих процессов использует в основном методы электронной микроскопии, изучающие их на чисто качественном уровне [2]. Авторы [3] описали зависимость свойств полимерных нанокомпозитов, наполненных углеродными нанотрубками, от степени агрегации нанонаполнителя χ аналитически, используя следующее перколяционное соотношение:

$$\frac{E_H}{E_M} = 1 + 11 \left(\frac{\varphi_H}{\chi} \right)^{1,7}, \quad (1)$$

где E_H и E_M – модули упругости нанокомпозита и матричного полимера, соответственно (отношение E_H/E_M принято называть степенью усиления нанокомпозита), φ_H – объемное содержание нанонаполнителя.

Степень агрегации нанонаполнителя χ определена в работе [3] следующим образом:

$$\chi = \frac{\varphi_H}{\varphi_H + \varphi_{мф}}, \quad (2)$$

где $\varphi_{мф}$ – относительное содержание межфазных областей в нанокомпозите.

Цель настоящей работы – аналитическое определение степени дисперсии нанонаполнителя и ее взаимосвязи со структурой углеродных нанотрубок и макроскопическими свойствами нанокомпозита на примере нанокомпозитов эпоксиполимер/углеродные нанотрубки [4].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве нанонаполнителя использованы многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), полученные методом химического осаждения паров (CVD) в исследовательском институте нефтяной промышленности (Иран). Они имели наружный диаметр 10–50 нм, длину 1–3 мкм, и их массовое содержание в рассматриваемых нанокомпозитах варьировалось в интервале 0,25–10,0 масс.% [4].

Эпоксидная смола промышленного производства (ЭП) марки LY-5052 с низкой вязкостью и отвердитель марки HY-5052 применялись для формирования полимерной матрицы нанокомпозитов ЭП/МУНТ. Сначала МУНТ диспергировались в отвердителе обработкой ультразвуком в течение 30 мин. Процесс обработки ультразвуком выполнен импульсным методом

INTRODUCTION

The importance of the aggregation process (and the opposite physical meaning of the dispersion process) of nanofiller for formation of properties of polymer nanocomposites is now well known [1, 2]. However, the study of the two mentioned complementary processes uses mainly electron microscopy methods, studying them on a purely qualitative level [2]. The authors [3] described dependence of the properties of polymer nanocomposites filled with carbon nanotubes on the degree of nanofiller aggregation χ analytically, using the following percolation relation:

$$\frac{E_H}{E_M} = 1 + 11 \left(\frac{\varphi_H}{\chi} \right)^{1,7}, \quad (1)$$

where E_H and E_M are the elastic moduli of nanocomposite and matrix polymer, respectively (the ratio E_H/E_M is called the degree of nanocomposite reinforcement), and φ_H is the nanofiller volume content.

The degree of aggregation of nanofiller χ was determined in [3] as follows:

$$\chi = \frac{\varphi_H}{\varphi_H + \varphi_{мф}}, \quad (2)$$

where $\varphi_{мф}$ is the relative content of interfacial regions in the nanocomposite.

The aim of the present work is to analytically determine the dispersion degree of nanofiller and its relationship with the carbon nanotubes structure and macroscopic properties of nanocomposite on the example of epoxy polymer/carbon nanotubes nanocomposites [4].

RESEARCH METHODS

Multilayer carbon nanotubes (MCNTs) obtained by chemical vapour deposition (CVD) at the Petroleum Industry Research Institute (Iran) were used as nanofillers. They had an outer diameter of 10–50 nm, length of 1–3 μm and their mass content in the nanocomposites under consideration varied in the range of 0.25–10.0 wt% [4].

Low viscosity industrial epoxy resin (ER) grade LY-5052 and hardener grade HY-5052 were used to form the polymer matrix of EP/MCNT nanocomposites. Firstly, the MCNTs were dispersed in the hardener by ultrasonic treatment for 30 min. The ultrasonic treatment process was performed by pulse method at 60% of amplitude value to avoid overheating of the material. The epoxy resin and hardener were mixed with a ratio by weight of 100:30 and then the mixture was stirred at 900 rpm for 15 min. The mixture was then poured into metal moulds and cured at 333 K for 15 h [4].

Mechanical uniaxial tensile tests were performed using a Zwick/Roel apparatus at a temperature of 293 K and a slider speed of 1 mm/min. The specimens used were 168 mm long, 13 mm wide and 5 mm thick. The average value for five specimens was taken as the test result [4].



при 60 % амплитудной величины, чтобы избежать перегрева материала. Эпоксидная смола и отвердитель смешивались с отношением по массе 100 : 30, и затем смесь перемешивалась при 900 об/мин в течение 15 мин. Далее смесь выливалась в металлические формы и отверждалась при 333 К в течение 15 ч [4].

Механические испытания на одноосное растяжение выполнены с использованием прибора Zwick/Roel при температуре 293 К и скорости ползуна 1 мм/мин. Использованы образцы длиной 168 мм, шириной 13 мм и толщиной 5 мм. За результат испытаний принималась средняя величина для пяти образцов [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось выше, процессы агрегации и диспергирования нанонаполнителя являются противоположными по своему физическому смыслу, что позволяет определить степень дисперсии нанонаполнителя η_d следующим образом:

$$\eta_d = \frac{1}{\chi}. \quad (3)$$

Авторы [5] показали, что величина χ связана с показателем уровня межфазной адгезии b_α в полимерных наноккомпозитах согласно простому соотношению:

$$\chi = \frac{\varphi_c}{b_\alpha}, \quad (4)$$

где φ_c – порог перколяции нанонаполнителя в полимерной матрице, далее принимаемый равным 0,34±0,02 [5].

Сочетание уравнений (3) и (4) позволяет получить следующее уравнение для количественной оценки степени дисперсии нанонаполнителя η_d :

$$\eta_d = \frac{b_\alpha}{\varphi_c}. \quad (5)$$

Как хорошо известно [6], углеродные нанотрубки в полимерной матрице наноккомпозитов образуют кольцеобразные формирования, структурно аналогичные макромолекулярным клубкам разветвленных полимерных цепей. Такие кольцеобразные формирования являются специфическим способом агрегации любых сильно анизотропных одномерных наполнителей [7, 8]. Оценить радиус R_{yHT} указанных кольцеобразных формирований можно с помощью следующего уравнения [7]:

$$(2R_{\text{yHT}})^3 = \frac{\pi L_{\text{yHT}} r_{\text{yHT}}^2}{\varphi_n}, \quad (6)$$

RESULTS AND DISCUSSION

As mentioned above, the nanofiller aggregation and dispersion processes are opposite in their physical meaning, which allows us to determine the degrees of nanofiller dispersion η_d as follows:

$$\eta_d = \frac{1}{\chi}. \quad (3)$$

The authors [5] showed that the value of χ is related to the interfacial adhesion level indicator b_α in polymer nanocomposites according to a simple relationship:

$$\chi = \frac{\varphi_c}{b_\alpha}, \quad (4)$$

where φ_c is the percolation threshold of nanofiller in polymer matrix, further taken as 0.34±0.02 [5].

The combination of equations (3) and (4) yields the following equation to quantify the degree of dispersion of the nanofiller η_d :

$$\eta_d = \frac{b_\alpha}{\varphi_c}. \quad (5)$$

As is well known [6], carbon nanotubes in the polymer matrix of nanocomposites form ring-like formations structurally similar to macromolecular coils of branched polymer chains. Such ring-shaped formations are a specific way of aggregation of any strongly anisotropic one-dimensional fillers [7, 8]. The radius R_{yHT} of these ring-shaped formations can be estimated using the following equation [7]:

$$(2R_{\text{yHT}})^3 = \frac{\pi L_{\text{yHT}} r_{\text{yHT}}^2}{\varphi_n}, \quad (6)$$

where L_{yHT} and r_{yHT} are the length and outer radius of carbon nanotube, respectively, φ_n is the volume content of nanofiller.

Calculation of the parameters φ_n and b_α necessary for further description of the degree of dispersion can be performed using the following equations – for φ_n [9]:

$$\varphi_n = \frac{W_n}{\rho_n}, \quad (7)$$

where W_n and ρ_n are mass content and density of carbon nanotubes, the value of ρ_n for which is taken as 1500 kg/m³ [4].

The following percolation relationship was used to calculate the interfacial adhesion level b_α [5]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 11 (2,85 b_\alpha \varphi_n)^{1,7}. \quad (8)$$

Based on the above postulates, it should be assumed that the degree of dispersion η_d of carbon nanotubes in the polymer matrix of the nanocomposite will increase as the radius R_{yHT} of their ring-shaped formations increases and decrease as the content of nanofiller φ_n increases.



где $L_{\text{УНТ}}$ и $r_{\text{УНТ}}$ – длина и наружный радиус углеродной нанотрубки, соответственно, $\varphi_{\text{Н}}$ – объемное содержание нанонаполнителя.

Расчет необходимых для дальнейшего описания степени дисперсии параметров $\varphi_{\text{Н}}$ и b_{α} можно выполнить, используя следующие уравнения – для $\varphi_{\text{Н}}$ [9]:

$$\varphi_{\text{Н}} = \frac{W_{\text{Н}}}{\rho_{\text{Н}}}, \quad (7)$$

где $W_{\text{Н}}$ и $\rho_{\text{Н}}$ – массовое содержание и плотность углеродных нанотрубок, величина $\rho_{\text{Н}}$ для которой принята равной 1500 кг/м³ [4].

Для расчета уровня межфазной адгезии b_{α} применялось следующее перколяционное соотношение [5]:

$$\frac{E_{\text{Н}}}{E_{\text{м}}} = 1 + 11 (2,85 b_{\alpha} \varphi_{\text{Н}})^{1,7}. \quad (8)$$

Исходя из изложенных выше постулатов, следует предположить, что степень дисперсии $\eta_{\text{д}}$ углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокompозита будет расти по мере увеличения радиуса $R_{\text{УНТ}}$ их кольцеобразных формирований и снижаться по мере повышения содержания нанонаполнителя $\varphi_{\text{Н}}$. На рис.1 приведена зависимость степени дисперсии $\eta_{\text{д}}$ углеродных нанотрубок, определенной согласно уравнению (5), от комплексного показателя $(R_{\text{УНТ}}/\varphi_{\text{Н}})^{1/2}$ для нанокompозитов ЭП/МУНТ. Отметим, что такая форма комплексного показателя предполагает равноценное влияние параметров $R_{\text{УНТ}}$ и $\varphi_{\text{Н}}$ на степень дисперсии нанонаполнителя. Как следует из графика на рис.1, между параметрами $\eta_{\text{д}}$ и $(R_{\text{УНТ}}/\varphi_{\text{Н}})^{1/2}$ наблюдается линейная корреляция, которую можно аналитически выразить следующим уравнением:

$$\eta_{\text{д}} = 2,2 (R_{\text{УНТ}} / \varphi_{\text{Н}})^{1/2}, \quad (9)$$

где $R_{\text{УНТ}}$ задается в мкм.

Как показано ранее [5], степень дисперсии $\eta_{\text{д}}$ нанонаполнителя является функцией структуры его агрегатов, характеризующей их фрактальной размерностью D_{f} :

$$\eta_{\text{д}} = D_{\text{f}} / \varphi_{\text{Н}}^{1/2}. \quad (10)$$

Из сравнения уравнений (9) и (10) можно получить очень простую корреляцию между размерностью D_{f} и радиусом $R_{\text{УНТ}}$ кольцеобразных формирований углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокompозита:

$$D_{\text{f}} = 2,2 R_{\text{УНТ}}^{1/2}, \quad (11)$$

где радиус $R_{\text{УНТ}}$ снова дается в мкм.

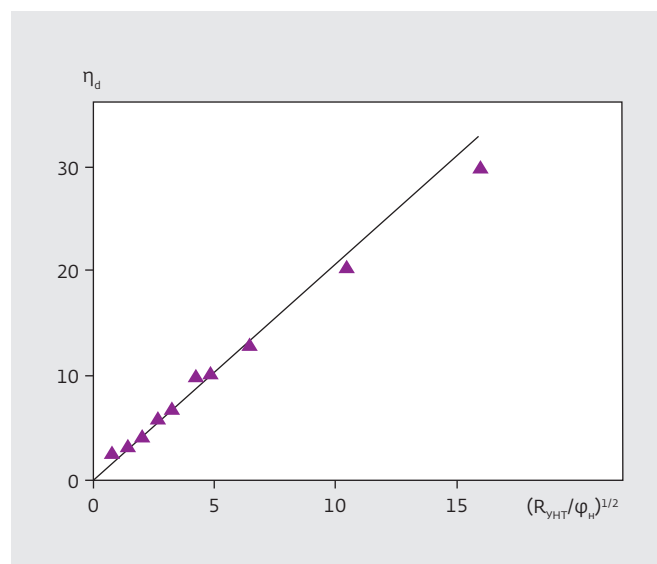


Рис.1. Соотношение степени дисперсии нанонаполнителя $\eta_{\text{д}}$ и комплексного показателя $(R_{\text{УНТ}}/\varphi_{\text{Н}})^{1/2}$ для нанокompозитов ЭП/МУНТ

Fig.1. The relationship of dispersion degree of nanofiller $\eta_{\text{д}}$ and complex characteristic $(R_{\text{CNT}}/\varphi_{\text{Н}})^{1/2}$ for nanocomposites EP/MCNT

Fig.1 shows the dependence of the dispersion degree $\eta_{\text{д}}$ of carbon nanotubes, determined according to equation (5), on the complex index $(R_{\text{УНТ}}/\varphi_{\text{Н}})^{1/2}$ for EP/MCNT nanocomposites. Note that this form of the complex index implies an equal influence of the parameters $R_{\text{УНТ}}$ and $\varphi_{\text{Н}}$ on the degree of dispersion of the nanofiller. As follows from the graph in Fig.1, a linear correlation is observed between the parameters $\eta_{\text{д}}$ and $(R_{\text{УНТ}}/\varphi_{\text{Н}})^{1/2}$, which can be expressed analytically by the following equation:

$$\eta_{\text{д}} = 2,2 (R_{\text{УНТ}} / \varphi_{\text{Н}})^{1/2}, \quad (9)$$

where $R_{\text{УНТ}}$ is given in μm .

As shown earlier [5], the dispersion degree of $\eta_{\text{д}}$ nanofiller is a function of the structure of its aggregates characterised by their fractal dimension D_{f} :

$$\eta_{\text{д}} = D_{\text{f}} / \varphi_{\text{Н}}^{1/2}. \quad (10)$$

From the comparison of equations (9) and (10), a very simple correlation between the dimension D_{f} and radius $R_{\text{УНТ}}$ of the ring-shaped formations of carbon nanotubes in the polymer matrix of the nanocomposite can be obtained:

$$D_{\text{f}} = 2,2 R_{\text{УНТ}}^{1/2}, \quad (11)$$

where $R_{\text{УНТ}}$ is given in μm .

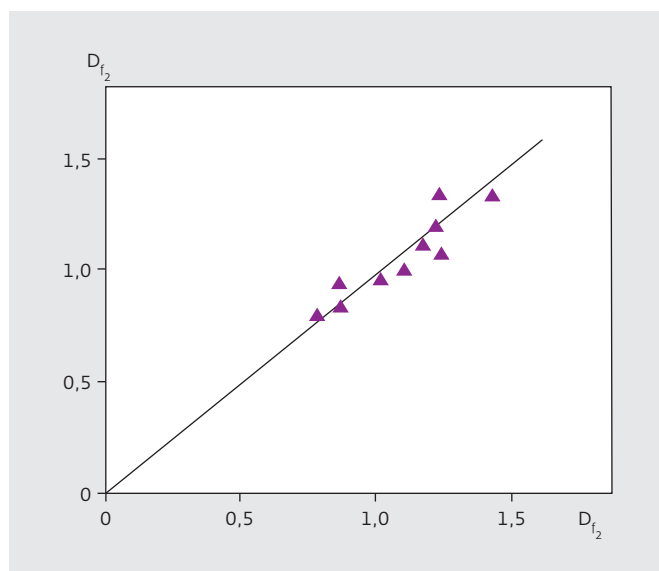


Рис.2. Сравнение рассчитанных согласно уравнениям (12) D_{f1} и (11) D_{f2} величин фрактальной размерности кольцеобразных формирований МУНТ для нанокомпозитов ЭП/МУНТ. Прямая линия показывает соотношение 1 : 1

Fig.2. The comparison of calculated according to the equations (12) D_{f1} and (11) D_{f2} values of fractal dimensions of MCNT annular formations for nanocomposites EP/MCNT. The straight line shows the relationship 1 : 1

Альтернативным способом определения размерности D_f является следующее уравнение [10]:

$$\frac{E_H}{E_M} = 1 + 17D_f^2\varphi_H. \quad (12)$$

На рис.2 приведено сравнение размерностей кольцеобразных формирований МУНТ, рассчитанных согласно уравнению (12) D_{f1} и (11) D_{f2} для рассматриваемых нанокомпозитов. Как следует из этого сравнения, указанные способы дают близкие значения D_f (среднее расхождение между D_{f1} и D_{f2} составляет 8,3 %).

Сочетание уравнений (1) и (3) позволяет получить следующий вариант перколяционного соотношения для оценки степени усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки:

$$\frac{E_H}{E_M} = 1 + 11(\eta_d\varphi_H)^{1,7}. \quad (13)$$

Далее сочетание уравнений (6), (9) и (13) дает возможность прогнозировать степень усиления E_H/E_M нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки как функцию геометрии углеродных нанотрубок, то есть их длины и наружного диаметра. На рис.3 приведено сравнение рассчитанных указанным способом и полученных экспериментально зависимостей $E_H/E_M(\varphi_H)$ для нанокомпозитов ЭП/

An alternative way to determine dimension of D_f is the following equation [10]:

$$\frac{E_H}{E_M} = 1 + 17D_f^2\varphi_H. \quad (12)$$

Fig.2 shows a comparison of the dimensions of ring-shaped MCNT formations calculated according to equation (12) D_{f1} and (11) D_{f2} for the considered nanocomposites. As follows from this comparison, the mentioned methods give close values of D_f (the average discrepancy between D_{f1} and D_{f2} is 8.3%).

The combination of equations (1) and (3) allows us to obtain the following version of the percolation relation for evaluating the degree of reinforcement of polymer/carbon nanotube nanocomposites:

$$\frac{E_H}{E_M} = 1 + 11(\eta_d\varphi_H)^{1,7}. \quad (13)$$

Further, the combination of equations (6), (9) and (13) makes it possible to predict the enhancement degree of E_H/E_M of polymer/carbon nanotube nanocomposites as a function of the geometry of carbon nanotubes, i.e., their length and outer diameter. Fig.3 shows a comparison of the calculated by the above method and experimentally obtained dependences of $E_H/E_M(\varphi_H)$ for nanocomposites EP/MCNT, which showed a good agreement between theory and experiment (their average discrepancy is 4%, which is approximately equal to the experimental error in determining this parameter). This correspondence serves to confirm the correctness of the theoretical treatment proposed in this work.

CONCLUSIONS

Thus, in the present work a parameter (degree of dispersion of nanofiller) quantitatively characterising the process of its dispersion is proposed. It is shown, that dispersion degree is a function of the size (radius) of ring-like formations of carbon nanotubes in the polymer matrix of nanocomposite or alternatively their fractal dimension, as well as the content of nanofiller. An analytical relation determining dependence of the properties (in the considered case – the reinforcement degree) of the nanocomposite on the dispersion level of the nanofiller is proposed. The obtained theoretical treatment allows predicting the polymer/carbon nanotube nanocomposites properties.

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.



МУНТ, которое показало хорошее соответствие теории и эксперимента (их среднее расхождение составляет 4%, что примерно равно погрешности эксперимента при определении этого параметра). Указанное соответствие служит подтверждением корректности предложенной в настоящей работе теоретической трактовки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в настоящей работе предложен параметр (степень дисперсии нанонаполнителя), количественно характеризующий процесс его диспергирования. Показано, что степень дисперсии является функцией размера (радиуса) кольцеобразных формирований углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокомпозита или альтернативно их фрактальной размерности, а также содержанием нанонаполнителя. Предложено аналитическое соотношение, определяющее зависимость свойств (в рассматриваемом случае – степени усиления) нанокомпозита от уровня дисперсии нанонаполнителя. Полученная теоретическая трактовка позволяет прогнозирование свойств нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки.

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. Šupova M., Martynkova G.S., Barabaszova K. Effect of nanofillers dispersion in polymer matrices: a review // Sci. Adv. Mater. 2011. V. 3. No. 1. PP. 1–25.
2. Kim H., Abdala A.A., Macosko C.W. Graphene/polymer nanocomposites // Macromolecules. 2010. V. 43. No. 16. PP. 6515–6530.
3. Козлов Г.В., Долбин И.В. Особенности процесса агрегации наполнителя в нанокомпозитах полимер-углеродные нанотрубки // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 2. С. 125–129.
4. Omid M., Rokni H., Milani A.S., Seehaler R.J., Arasteh R. Prediction of the mechanical characteristics of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using a new form of the rule of

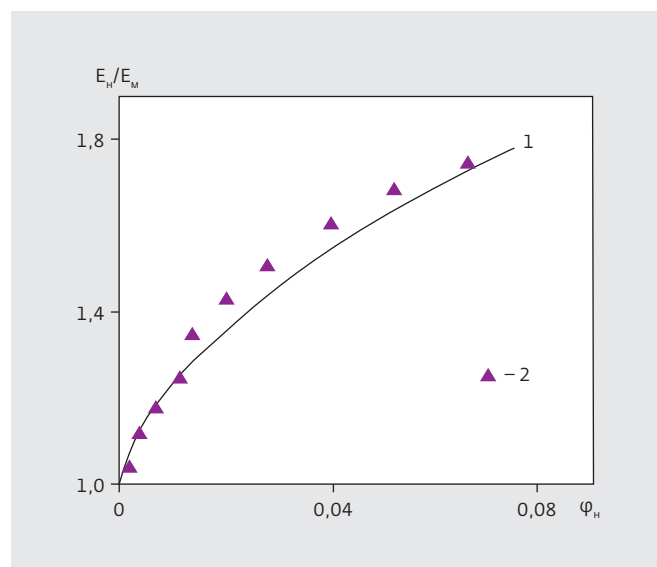


Рис.3. Сравнение рассчитанной согласно уравнению (13) (1) и полученной экспериментально (2) зависимостей степени усиления E_n/E_m от объемного содержания нанонаполнителя ϕ_n для нанокомпозитов ЭП/МУНТ

Fig.3. The comparison of calculated according to the equations (12) (1) and experimentally obtained (2) dependences of reinforcement degree E_n/E_m on volume contents of nanofiller ϕ_n for nanocomposites EP/MCNT

mixtures // Carbon. 2010. V. 48. No. 11. PP. 3218–3228.

5. Атлуханова Л.Б., Козлов Г.В. Физикохимия нанокомпозитов полимер-углеродные нанотрубки. М.: Изд-во "Спутник+", 2020. 292 с.
6. Schaefer D.W., Justice R.S. How nano are nanocomposites? // Macromolecules. 2007. V. 40. No. 24. PP. 8501–8517.
7. Bridge B. Theoretical modeling of the critical volume fraction for percolation conductivity of fibre-loaded conductive polymer composites // J. Mater. Sci. Lett. 1989. V. 8. No. 2. PP. 102–103.
8. Lim G., Ahn K., Bok S., Nam J., Lim B. Curving silver nanowires using liquid droplets for highly stretchable and durable percolation networks // Nanoscale. 2017. V. 9. No. 26. PP. 8938–8941.
9. Sheng N., Boyce M.C., Parks D.M., Rutledge G.C., Abes J.I., Cohen R.E. Multiscale micromechanical modeling of polymer/clay nanocomposites and the effective clay particle // Polymer. 2004. V. 45. No. 3. PP. 487–506.
10. Козлов Г.В., Ризванова П.Г., Долбин И.В., Магомедов Г.М. Определение модуля упругости нанонаполнителя в матрице полимерных нанокомпозитов // Известия ВУЗов. Физика. 2019. Т. 62. № 1. С. 112–116.



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosfera.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru