

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОПОЛНИТЕЛЕЙ РАЗНЫХ ТИПОВ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

В.З. Алоев, З.М. Жирикова, М.А. Тарчокова

Владимир Закиевич Алоев, Заира Муссавна Жирикова*, Мемунат Адидовна Тарчокова

Кафедра технической механики и физики, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, ул. Ленина, 1В, Нальчик, Российская Федерация 360001

E-mail: aloev56@list.ru, zaira.dumaeva@mail.ru*

В работе проведен теоретический анализ эффективности применения нанополнителей разных типов для получения высокопрочных полимерных композитов. Выбраны три базовых вида наноразмерных неорганических нанополнителей: дисперсные наночастицы (0D - нанополнители), углеродные нанотрубки и нановолокна (1D-нанополнители) и органоглины, графен и т.п. (2D-наполнители). В качестве основного критерия эффективности применения нанополнителей использован относительный модуль упругости, т.е. степень усиления. В рамках перколяционной модели определены степени усиления нанокомпозитов для различных типов нанополнителей в зависимости от относительной объемной доли нанополнителей и межфазных областей. Показано, что межфазные области в полимерных нанокомпозитах трактуется как армирующий элемент структуры нанокомпозита. Для описания структуры поверхности частиц нанополнителя использована эффективная величина фрактальной размерности, которая служит определяющим фактором для относительной доли межфазных областей. При условии, что фрактальная размерность структурного каркаса частиц нанополнителя не может превышать фрактальную размерность объемлющего евклидова пространства, определена относительная доля межфазных областей, а через нее и максимальная степень заполнения для рассматриваемых типов нанополнителей. Результаты теоретической оценки предельного максимального значения фрактальной размерности частиц нанополнителя, проведенного в работе, показывают, что образование объемного каркаса частиц возможно только для анизотропных нанополнителей, а дисперсные частицы формируют цепочки, не изменяющие структуру полимерной матрицы по сравнению с матричным полимером. Обнаружено также, что для каждого типа нанополнителя существует предельная максимальная степень заполнения, определяющая в конечном итоге предельную максимальную степень усиления нанокомпозита. Указанные результаты позволяют сделать вывод о том, что наиболее эффективным для создания конструкционных полимерных нанокомпозитов является дисперсный нанополнитель.

Ключевые слова: полимерный нанокомпозит, дисперсный нанополнитель, углеродная нанотрубка, органоглина, степень усиления, фрактальная размерность, модуль упругости

EFFECTIVENESS OF USE OF NANO FILLERS OF DIFFERENT TYPES IN POLYMERIC COMPOSITES

V.Z. Aloyev, Z.M. Zhirikova, M.A. Tarchokova

Vladimir Z. Aloyev, Zaira M. Zhirikova*, M.A. Tarchokova

Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, Lenina st., 1B, Nalchik, 360001, Russia

E-mail: aloev56@list.ru, zaira.dumaeva@mail.ru*

The paper provides a theoretical analysis of the effectiveness of using different types of nanofillers to produce high-strength polymer composites. Three basic types of nanoscale inorganic nanofillers were selected: dispersed nanoparticles (0D-nanofillers), carbon nanotubes and nano-

fibers (1D-nanofillers), and organoclay, graphene, etc. (2D-fillers). The relative modulus of elasticity, i.e. the degree of amplification, is used as the main criterion for the effectiveness of nanofillers. Within the framework of the percolation model, the amplification levels of nanocomposites for different types of nanofillers are determined depending on the relative volume fraction of nanofillers and interfacial regions. It is shown that interfacial regions in polymer nanocomposites are treated as a reinforcing element of the nanocomposite structure. To describe the surface structure of nanofiller particles, an effective value of the fractal dimension is used, which serves as a determining factor for the relative proportion of interfacial regions. At a condition that the fractal dimension of the structural framework of nanofiller particles cannot exceed the fractal dimension of the enclosing Euclidean space, the relative proportion of interfacial regions and, through it, the maximum degree of filling for the types of nanofillers under consideration are determined. The results of the theoretical evaluation of the maximum limit value of the fractal dimension of nanofiller particles carried out in this work show that the formation of a bulk frame of particles is possible only for anisotropic nanofillers, and dispersed particles form chains that do not change the structure of the polymer matrix in comparison with the matrix polymer. It is also found that for each type of nanofiller, there is a limit maximum degree of filling, which ultimately determines the limit maximum degree of amplification of the nanocomposite. These results allow us to conclude that the most effective for creating structural polymer nanocomposites is a dispersed nanofiller.

Key words: polymeric nanocomposite, disperse nanofiller, carbon nanotube, organoclay, strengthening extent, fractal dimension, elastic modulus

Для цитирования:

Алоев В.З., Жирикова З.М., Тарчокова М.А. Эффективность использования нанонаполнителей разных типов в полимерных композитах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 4. С. 81–85

For citation:

Aloyev V.Z., Zhirikova Z.M., Tarchokova M.A. Effectiveness of use of nano fillers of different types in polymeric composites. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 4. P. 81–85

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные нанокомпозитные материалы вызывают повышенный интерес исследователей, связанный с широким применением нанокомпозитов в качестве конструкционных материалов.

Получение полимерных композитных материалов с требуемыми эксплуатационными характеристиками может быть достигнуто выбором исходного матричного полимера и модификацией его нанонаполнителями разного типа с целью направленного регулирования структуры и свойств.

Подробный анализ существующих в настоящее время неорганических нанонаполнителей для полимерных нанокомпозитов позволяет выделить три базовых вида: дисперсные наночастицы (0D-нанонаполнители), углеродные нанотрубки и нановолокна (1D-нанонаполнители) и органоглины, графен и т.п. (2D-нанонаполнители). Разработано огромное число полимерных нанокомпозитов на базе различных полимеров, указанных видов нанонаполнителей [1]. В настоящее время все еще существуют неоправданно оптимистические надежды (особенно для таких высокомодульных нанонаполнителей как УНТ и графен) относительно перспектив получения высокопрочных нанокомпозитов, в

силу двух своих специфических особенностей: высокой степени анизотропии отдельных исходных частиц и их высокого модуля упругости порядка 1–2 ТПа [2, 3].

Однако на практике часто наблюдается умеренное повышение модуля упругости полимерных нанокомпозитов E_n , при наполнении их углеродными нанотрубками или графеном. Так в работах [4, 5] показано, что введение оксида графена (ОГ) в полидиметилсилоксан (ПДМС) повышает E_n на ~70% по сравнению с матричным полимером при содержании ОГ ~3 масс. %. Теоретические расчеты модуля упругости E_n , выполненные в рамках микромеханических моделей, показали, что для нанокомпозита ПДМС/ОГ значение E_n на один-два порядка больше экспериментальных [4]. Указанные модели при расчете механических характеристик нанокомпозитов учитывают модуль упругости нанонаполнителя и предполагают взаимосвязь указанных выше характеристик. Однако в последнее время появились и другие модели усиления этих наноматериалов, не принимающих в расчет минимальный модуль упругости нанонаполнителя: перколяционная [6] и фрактальная [7]. Недостатком микромеханических моделей является также то, что они не учитывают такие критические для

композитов показатели как уровень межфазной адгезии и степень агрегации исходного нанонаполнителя.

В связи с этим, целью настоящей работы является теоретический анализ эффективности применения указанных выше нанонаполнителей для разработки конструкционных полимерных композитов, для которых основным критерием эффективности служит относительный модуль упругости, т.е. степень усиления.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Относительный модуль упругости (степень усиления) E_n/E_m полимерных наноматериалов в рамках перколяционной модели определяется соотношением [1, 8]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 11(\varphi_n + \varphi_{mf})^{1,7}, \quad (1)$$

где E_n и E_m – модули упругости нанокомпозита и матричного полимера, φ_n и φ_{mf} – относительные объемные доли нанонаполнителя и межфазных областей, соответственно. Следует отметить, что межфазные области в полимерных нанокомпозитах трактуются как армирующий (усиливающий) элемент структуры нанокомпозита [1, 9].

Это утверждение было доказано экспериментальными методами для нанокомпозитов бутадиенстирольный каучук/наношунгит [10, 11]. В рассматриваемом случае модуль упругости межфазных областей только на 20% ниже этого показателя для нанонаполнителя (шунгита), но в 6 раз больше, чем соответствующая характеристика матричного полимера. При таком подходе структура поверхности частиц нанонаполнителя приобретает особую важность. Указанная структура наиболее точно описывается ее фрактальной размерностью d_n , которая служит определяющим фактором для относительной доли межфазных областей φ_{mf} и степени усиления E_n/E_m [1]:

$$\varphi_{mf} = 0,61(d_n - 2) \quad (2)$$

$$\frac{E_n}{E_m} = 15 \left[1 - (d - d_n)^{\frac{1}{1,7}} \right] \quad (3)$$

где d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае $d = 3$).

Из формулы (3) следует увеличение относительного модуля упругости или степени усиления E_n/E_m при повышении размерности d_n , величину которой можно рассчитать теоретически [12].

Однако, в случае нанонаполнителей, имеющих высокую шероховатость (фрактальность) их поверхности и малые размеры нерегулярности их структуры, полимерная макромолекула, обладаю-

щая конечной жесткостью, не в состоянии воспроизвести указанные нерегулярности [7, 13] и макромолекула «воспринимает» эту поверхность как гораздо более гладкую. Поэтому в структурных оценках должна использоваться эффективная величина фрактальной размерности $d_n(d_n^{эф})$, определяемая по формуле [7]:

$$d_n^{эф} = 5 - d_n. \quad (4)$$

По своему физическому смыслу, указанная выше закономерность выражает корреляцию удельной поверхности нанонаполнителя S_u и поперечного сечения осаждаемых молекул σ [14]:

$$S_u \sim \sigma^{\frac{(2-d_n^{эф})}{2}} \quad (5)$$

Рассчитанные согласно формуле [1]

$$S_u = 410 \left(\frac{D_n}{2} \right)^{d_n - d} \quad (6)$$

значения d_n , а также формулам (2) и (3) величины $d_n^{эф}$ (таблица) позволяют сделать вывод, что соотношение (4) достаточно хорошо описывает взаимосвязь указанных размерностей.

Таблица

Характеристики основных типов полимерных нанокомпозитов

Table. Characteristics of the main types of polymeric nanocomposites

Нанонаполнитель	d_n	$d_n^{эф}$, уравнение (2)	$d_n^{эф}$, уравнение (3)	φ_n^{max}	$(E_n/E_m)^{max}$
Дисперсные наночастицы	2,60	2,20	2,23	2,33	12,0
Органоглина (эсфолированная)	2,78	2,30	2,34	0,246	7,23
Органоглина (интеркалированная)	2,78	2,15	2,13	0,374	7,21
Углеродные нанотрубки	2,73	2,27	2,33	0,239	6,76

Известно [7], что в полимерных композитах частицы (агрегаты частиц) наполнителя микронных размеров образуют структурный каркас с размерностью D_k , изменяющейся в пределах 2-3, который по существу представляет собой аналог решетки в компьютерном моделировании, в котором определяется конечная структура полимерной матрицы. Указанное явление определяет различие структур исходного матричного полимера и полимерной матрицы нанокомпозита. Показатели φ_{mf} и D_k взаимосвязаны между собой уравнением [7]:

$$\varphi_{mf} = \frac{D_k + 2,55d_0 - 7,10}{4,18}, \quad (7)$$

где d_0 – фрактальная размерность поверхности исходных (неагрегированных) частиц нанонаполни-

теля, принимаемая равной фрактальной размерности d_n поверхности агрегированных частиц нанонаполнителя.

Соотношение между φ_{mf} и φ_n для разных типов нанонаполнителя дает уравнение:

$$\varphi_{mf} = c\varphi_n \quad (8)$$

где c – некоторая константа равная 0,260 для дисперсных наночастиц с диаметром $D_n = 80$ нм, 1,910 и 0,955 – для эсфолиированной и интеркалированной органоглины, соответственно, и 1,86 – для УНТ [1].

Как известно [15], размерность любого реального фрактала не может превышать размерность объемлющего евклидова пространства. Следовательно, заменив в уравнении (7) величину φ_{mf} на $c\varphi_n$ и полагая $D_k = d = 3$, можно оценить максимальную степень наполнения φ_n^{\max} для рассматриваемых типов нанонаполнителя. Эти значения φ_n^{\max} приведены в таблице. Для дисперсно-наполненных нанокмозитов физически нереальная величина $\varphi_n^{\max} = 2,33$ ($\varphi_n < 1$) означает, что условие $D_k = 3$ для них недостижимо. Поскольку φ_n^{\max} определяется уравнением [1]:

$$\varphi_n^{\max} = 1 - \varphi_{mf} = 1 - 0,26\varphi_n^{\max}, \quad (9)$$

то это дает $\varphi_n^{\max} = 0,794$. Подстановка этого значения φ_n^{\max} в уравнение (7) позволяет получить предельное максимальное значение $D_k = 1,33$. Иначе говоря, дисперсные наночастицы в полимерной матрице не могут образовать объемный ($D_k \geq 2$) каркас, а формируют более или менее разветвленные «цепочки» – эффект, хорошо известный для дисперсно-наполненных нанокмозитов на основе каучуков (резин) [16]. Образование «цепочек» приводит к тому, что нанонаполнитель (любого типа) не изменяет структуру матричного полимера, и фрактальные размерности d_f структуры нанокмозита и исходного матричного полимера одинаковы [1].

Использование формул (1) и (8) позволяет оценить предельную степень усиления $(E_n/E_m)^{\max}$ при $\varphi_n = \varphi_n^{\max}$ для рассматриваемых типов нанонаполнителя. Значения $(E_n/E_m)^{\max}$, приведенные в таблице, демонстрируют, что максимально возможное для композитов вообще значение $(E_n/E_m)^{\max} = 12$ может быть достигнуто только для дисперсно-наполненных нанокмозитов, а для других классов полимерных нанокмозитов величина $(E_n/E_m)^{\max}$ существенно меньше 12 [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Микитаев А.К., Козлов Г.В., Заиков Г.Е. Полимерные нанокмозиты: многообразие структурных форм и приложений. М.: Наука. 2009. 278с.

Явления, возникающие при критерии $\varphi_n > \varphi_n^{\max}$, легко проследить на примере органоглины, используя сочетание уравнений (7) и (8). Полученные для эсфолиированной и интеркалированной органоглины коэффициенты $c = 0,955$ и 1,910, соответственно, выведены в рамках следующей трактовки [1]. При образовании агрегата (тактоида), состоящего из двух пластин нанонаполнителя, формируются два межфазных слоя на один тактоид вместо двух таких слоев на одну отдельную пластинку, что приводит к уменьшению c вдвое, при образовании «пачки», состоящий из трех пластин – уменьшению в три раза и т.п. С учетом постоянства правой части уравнения (7) (при $D_k = 3$), увеличение φ_n в его левой части означает снижение c ($\varphi_{mf} = c\varphi_n$), что определяет в рамках вышеприведенной трактовки агрегацию пластин органоглины [1].

Следует указать, что использование разного рода методик снижения степени агрегации нанонаполнителя (например, ультразвуковой обработки [18], использование поверхностно-активных веществ [19], смешивание компонент нанокмозитов во вращающемся электромагнитном поле [1] и др.) не изменяет приведенные выше оценки, что обусловлено значением $D_k \leq d$. В том случае, если D_k превысит размерность евклидова пространства d , реализуется рост плотности его агрегатов (тактоидов), поскольку он не помещается в указанном выше трехмерном пространстве [20].

ВЫВОДЫ

Таким образом, приведенные результаты показывают, что образование объемного каркаса частиц возможно только для анизотропных нанонаполнителей, а дисперсные частицы формируют цепочки, не изменяющие структуру полимерной матрицы по сравнению с матричным полимером. Обнаружено также, что для каждого типа нанонаполнителя существует предельная максимальная степень наполнения, определяющая в конечном итоге предельную максимальную степень усиления нанокмозита. Указанные результаты позволяют сделать вывод о том, что наиболее эффективным для создания конструкционных полимерных нанокмозитов является дисперсный нанонаполнитель.

REFERENCES

1. Mikitayev A.K., Kozlov G.V., Zaikov G.E. Polymeric nanocomposites: variety of structural forms and applications. M.: Nauka. 2009. 278 p. (in Russian).

2. Sun X., Sun H., Li H., Peng H. Developing polymer composite materials: carbon nanotubes or graphene? *Adv. Mater.* 2013. V. 25. N 37. P. 5153-5177. DOI: 10.1002/adma.201301926.
3. Елецкий А.В. Механические свойства углеродных нанотрубок. *УФН*. 2007. Т. 177. № 3. С. 223-274. DOI: 10.3367/UFNr.0177.200703a.0233.
4. Козлов Г.В., Долбин И.В. Усиление нанокомпозитов полимер/2D-нанонаполнитель: базовые постулаты. *Физика твердого тела*. 2019. Т. 61. № 6. С. 1488-1491. DOI: 10.21883/FTT.2019.08.47975.437.
5. Козлов Г.В., Долбин И.В., Никитин Л.Н. Структура оксида графена в полимерной матрице её влияние на степень усиления нанокомпозита. *Докл. акад. наук*. 2019. Т. 486. № 4. С.426-429.
6. Козлов Г.В., Алоев В.З. Теория перколяции в физико-химии полимеров. Нальчик.: Полиграфсервис и Т. 2005. 148 с.
7. Козлов Г.В., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композитов: фрактальный анализ. М.: Альянс-трансатом. 2008. 363 с.
8. Микитаев А.К., Козлов Г.В. Перколяционная модель усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки. *Физика и механика материалов*. 2015. Т. 22. № 2. С.101-106.
9. Козлов Г.В., Долбин И.В. Структурные аспекты усиления наноструктурированных композитов полимер/2D-нанонаполнитель. *Materials physics and mechanics*. 2017. Т. 32. № 1. С. 94-101. DOI: 10.18720/MPM.3212017_11.
10. Козлов Г.В., Яновский Ю.Г., Жирикова З.М., Алоев В.З., Карнет Ю.Н. Геометрия углеродных нанотрубок в среде полимерных композитных матриц. *Механика композиц. матер. и констр.* 2012. Т. 18. № 1. С. 131-153.
11. Яновский Ю.Г., Козлов Г.В., Карнет Ю.Н. Фрактальное описание значимых наноэффектов в среде полимерных композитов с наноразмерными наполнителями. Агрегация, межфазные взаимодействия, усиление. *Физич. мезомеханика*. 2012. Т. 15. № 6. С. 21-34.
12. Микитаев А.К., Козлов Г.В. Эффективность усиления полимерных нанокомпозитов дисперсными наночастицами. *Физика и механика материалов*. 2014. Т. 21. №1. С. 51-57.
13. Козлов Г.В., Шустов Г.Б. Структурный анализ реакционной способности саж. *Хим. технология*. 2006. Т. 7. № 1. С. 24-26.
14. Маламатов А.Х., Козлов Г.В., Микитаев М.А. Механизмы упрочнения полимерных нанокомпозитов. М.: РХТУ. 2006. 240 с.
15. Федер Е. Фракталы. М.: Мир. 1991. 248 с.
16. Козлов Г.В. Дисперсно-наполненные полимерные нанокомпозиты. Казань: Изд-во КНИТУ. 2012. 125 с.
17. Козлов Г.В., Жирикова З.М., Алоев В.З. Перспективы применения полимерных нанокомпозитов разных типов в качестве конструкционных материалов. *Нанотехнол.: наука и про-во*. 2011. № 6 (15). С. 57-62.
18. Рябенко А.Г. Проблемы прочности композитов с одностенными углеродными нанотрубками и пути их решения. Сб. Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 2007. P. 411-412.
19. Khabashesku V.N., Barrera E.V., Lobo R.F.M. Current research on nanotechnology. *Curr. Res. Nanotechnol.* 2007. V. 1. N 2. P. 165-182.
20. Микитаев А.К., Козлов Г.В. Описание степени усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки в рамках перколяционных моделей. *Физика твердого тела*. 2015. V. 57. N 5. P. 961-964.
2. Sun X., Sun H., Li H., Peng H. Developing polymer composite materials: carbon nanotubes or graphene? *Adv. Mater.* 2013. V. 25. N 37. P. 5153-5177. DOI: 10.1002/adma.201301926.
3. Elestkiy A.V. Mechanical characteristics of carbon nanotubes. *UFN*. 2007. V. 177. N 3. P. 223-274 (in Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0177.200703a.0233.
4. Kozlov G. V., Dolbin I.V. Strengthening of nanocomposites polymer / 2D - a nanofiller: basic postulates. *Fizika Tverd. Tela*. 2019. V. 61. N 6. P. 1488-1491 (in Russian). DOI: 10.21883/FTT.2019.08.47975.437.
5. Kozlov G.V., Dolbin I.V., Nikitin L.N. Structure of graphene oxide in polymeric a matrix its influence on extent of strengthening of a nanocomposite. *DAN*. 2019. V. 486. N 4. P. 426-429 (in Russian).
6. Kozlov G. V., Aloyev V.Z. The theory of a percolation in physical chemistry of polymers. Nalchik: Poligrafservis and T. 2005. 148 p. (in Russian).
7. Kozlov G.V., Yanovsky Yu.G., Karnet Yu.N. Structure and properties of the dispersed- filled polymeric composites: fractal analysis. M.: Alliance-transatom. 2008. 363 p. (in Russian).
8. Mikitayev A.K., Kozlov G.V. Percolation model of strengthening of nanocomposites polymer / carbon nanotubes. *Mater. Fizik. Mekhanik*. 2015. V. 22. N 2. P. 101-106 (in Russian).
9. Kozlov G. V., Dolbin I.V. Structural aspects of strengthening of the nanostructured composites polymer / 2D - a nanofiller. *Mater. Fizik. Mekhan.* 2017. V. 32. N 1. P. 94-101 (in Russian). DOI: 10.18720/MPM3212017_11.
10. Kozlov G.V., Yanovskiy Yu.G., Zhirikova Z.M., Aloyev V.Z., Karnet Yu.N. The geometry of carbon nanotubes in a polymer composite matrix environment. *Mekhanika Kompozits. Mater. Konstruks.* 2012. V. 18. N 1. P. 131-153 (in Russian).
11. Yanovsky Yu.G., Kozlov G.V., Karnet Yu.N. The fractal description of significant nanoeffects in the environment of polymeric composites with nanodimensional excipients. Aggregation, interfacial interactions, strengthening. *Phys. Mezomekhan.* 2012. V. 15. N 6. P. 21-34 (in Russian).
12. Mikitayev A.K., Kozlov G.V. Effectiveness of strengthening of polymeric nanocomposites disperse nanoparticles. *Mater. Fizik. Mekhanik*. 2014. V. 21. N 1. P. 51-57 (in Russian).
13. Kozlov G. V., Shustov G.B. Structure analysis of soot reactivity. *Khim. Tekhnol.* 2006. V. 7. N 1. P. 24-26 (in Russian).
14. Malamatov A.H., Kozlov G. V., Mikitayev M.A. Mechanisms of hardening of polymeric nanocomposites. M.: RHTU. 2006. 240 p. (in Russian).
15. Feeder E. Fractals. M.: Mir. 1991. 248 p. (in Russian).
16. Kozlov G.V. The dispersed- filled polymeric nanocomposites. Kazan: KNITU publishing house. 2012. 125 p. (in Russian).
17. Kozlov G.V., Zhirikova Z.M., Aloyev V.Z. The prospects of application of polymeric nanocomposites of different types as structural materials. *Nanotekhnol.: Nauka Prouzv.* 2011. N 6 (15). P. 57-62 (in Russian).
18. Ryabenko A.G. Strength problems of composites with single-wall carbon nanotubes and ways to solve them. Proceed. of International Conf. «Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials». Moscow. 2007. P. 411-412.
19. Khabashesku V.N., Barrera E.V., Lobo R.F.M. Current research on nanotechnology. *Curr. Res. Nanotechnol.* 2007. V. 1. N 2. P. 165-182.
20. Mikitayev A.K., Kozlov G.V. The description of extent of strengthening of nanocomposites polymer / carbon nanotubes within percolation models. *Fizika Tverd. Tela*. 2015. V. 57. N 5. P. 961-964 (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 05.11.2019
Принята к опубликованию (Accepted) 13.01.2020