

УДК 62-216.53

DOI: 10.30987/article_5b71326c992bf9.46166968

И.А. Нотин, аспирант

(ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет))

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)

E-mail: inotin@ya.ru

Повышение эффективности подготовительного этапа изготовления деталей машин из дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов

Рассмотрен вопрос прогнозирования прочностных характеристик дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов (ДУПКМ) на этапе подготовки производства изделий машиностроения, что позволяет сократить временные и материальные затраты. Прочностные характеристики ДУПКМ рассмотрены с точки зрения энергетической концепции и оценены путем определения удельных энергетических характеристик материала на основе данных о его составе. В качестве основы для определения значения удельных энергетических характеристик было принято положение об образовании ориентированного слоя полимера вблизи границы раздела «наполнитель – полимер», который вносит основной вклад в формирование прочностных свойств ДУПКМ.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненные полимерные композиционные материалы; прочностные характеристики; композиционные материалы; машиностроение.

I.A. Notin, Post graduate student

(FSBEI HE Bauman State Technical University of Moscow (National Research University),
Building 1, 5, 2-d Baumanskaya, Moscow, 105005)

Preparatory stage effectiveness increase in manufacturing machinery of dispersed-strengthening polymeric composites

A prediction matter of dispersed-strengthened polymeric composites strength characteristics at the pre-production stage of engineering parts has been considered which allows decreasing time and material costs. Strength characteristics of dispersed-strengthened polymeric composites (DSPC) have been considered from the view point of power concept and estimated through the definition of specific power characteristics of material on the basis of data of its composition. As a basis for the definition of the value of specific power characteristics there was assumed a condition for the formation of a directed polymeric layer close to the “extender-polymer” boundary which contributes a basic share into formation of DSPC strength characteristics.

Keywords: dispersed-strengthened polymeric composites; strength characteristics; composites; mechanical engineering.

В настоящее время в машиностроении наблюдается устойчивая тенденция к использованию полимерных композиционных материалов в качестве альтернативы традиционным конструкционным материалам, что связано с их высокими удельными характеристиками. Известно, что дисперсно-упрочненные полимерные композиционные материалы (ДУПКМ) находят все более широкое приме-

нение в таких областях как изготовление станков и механизмов, оснований насосного оборудования и т.д., где в настоящее время распространен серый чугун. Актуальной проблемой при производстве деталей машин из ДУПКМ является трудоемкость подготовительного этапа производства, связанного с необходимостью подбора рационального состава материала, обеспечивающего требуе-

мый уровень прочности.

В рамках действующих производств процесс подбора рационального состава имеет бессистемный характер и вырождается в метод проб и ошибок, что приводит к большим временным и материальным затратам. В этой связи представляет особый интерес вопрос теоретической оценки прочностных характеристик ДУПКМ заданной композиции.

Оценка прочностных характеристик ДУПКМ на основе данных о его составе

Известно, что в поверхностных слоях полимеров формируется ориентированный слой, состоящий из макромолекул, расположенных ортогонально к поверхности раздела фаз, о чем заявляли ряд авторов [1 – 3] и что было позже подтверждено исследованиями Грищенко А.Е. [4]. Данное явление обуславливается взаимодействием полярных групп твердого тела и полимера. О ключевой роли данного ориентированного слоя в формировании адгезионного соединения заявляли Фридрихсберг Д.А. [5] и Ребиндер П.А. [6].

Прочность ДУПКМ обеспечивается за счет формирования и смыкания ориентированного слоя полимера вблизи границы раздела «наполнитель – полимер» с образованием так называемой пленочной фазы [7], исходя из чего

можно утверждать, что при достижении степени наполнения, при которой медианное расстояние между частицами h будет меньше удвоенного значения толщины ориентированного слоя h_k , будет наблюдаться максимум прочностных характеристик для данной композиции частиц вследствие адгезионного взаимодействия между частицами.

На основании вышеуказанных положений при построении принципов расчета свойств ДУПКМ будем исходить из энергетической концепции формирования связей между отдельными элементами этой материальной системы. Таким образом, удельный показатель адгезионной энергии может являться критерием оценки прочностных характеристик материала и позволяет производить сравнительный анализ ДУПКМ с различными составами с целью определения рационального состава ДУПКМ для конкретного изделия.

Рассмотрим систему из двух частиц наполнителя, находящихся в связующем, величина сближения между которыми $h \leq 2h_k$ (рис.1). Для случая ДУПКМ на основе кварцевого наполнителя было принято допущение о сферичности частиц наполнителя, а также о случайной плотной упаковке частиц в элементарной ячейке, которое основано на гипотезах, выдвинутых в работе [8].

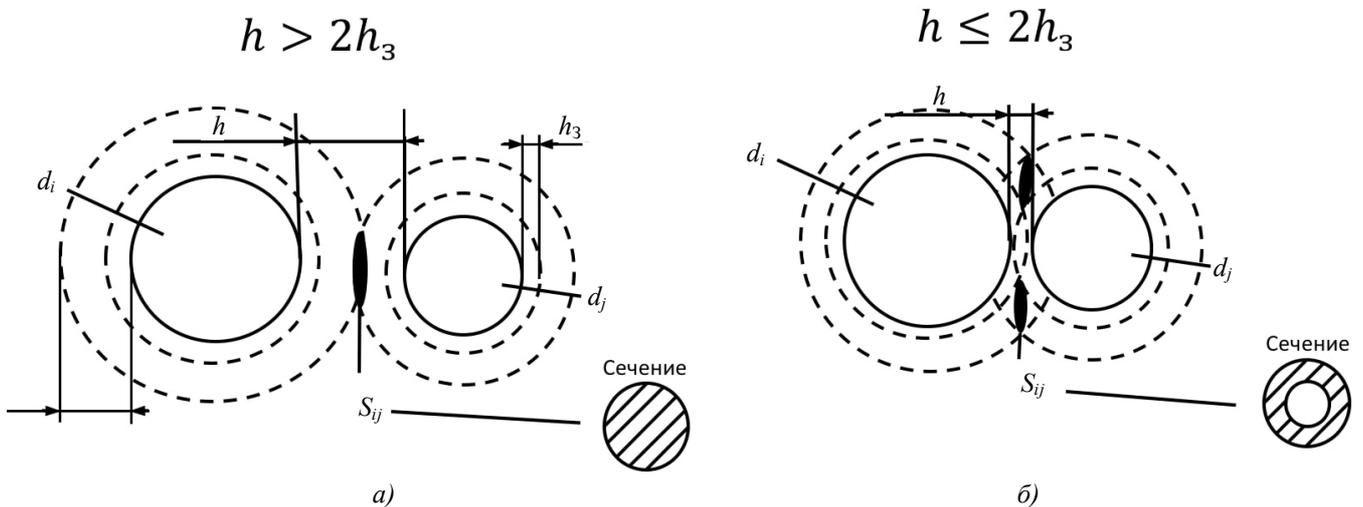


Рис. 1. Система из двух частиц наполнителя в случае: а – величины сближения $h > 2h_3$; б – величины сближения $h \leq 2h_3$

В данном случае происходит смыкание ориентированных слоев с образованием системы «наполнитель ориентированный – слой-наполнитель». С целью сравнительной оценки энергетических составляющих адгезионного взаимодействия подобных систем можно оценить энергию адгезионного взаимодействия

путем нахождения произведения работы адгезии для пары материалов «наполнитель – полимер» и площади окружности, образующейся в результате пересечения областей с ориентированным слоем полимера:

$$W_{ij} = W_a S_{ij}. \tag{1}$$

Адгезионное взаимодействие полимера и наполнителя W_a может быть оценено через работу адгезии согласно выражению [11]:

$$W_a = \gamma(1 - \cos\theta), \quad (2)$$

где γ – поверхностное натяжение; θ – краевой угол смачивания.

$$S_{ij}(h) = \begin{cases} 0, & h > 2h_k \\ \pi \left(\frac{(r_i + h_k)(r_j + h_k)}{r_i + r_j + h} \right)^2, & 2h_k \geq h > 2h_3 \\ \pi \left(\left(\frac{(r_i + h_k)(r_j + h_k)}{r_i + r_j + h} \right)^2 - \left(\frac{(r_i + h_3)(r_j + h_3)}{r_i + r_j + h} \right)^2 \right), & h \leq 2h_3 \end{cases}, \quad (3)$$

где h – расстояние между частицами; h_k – толщина ориентированного слоя полимера; h_3 – размер глобулы полимера; r_i – радиус i -й частицы; r_j – радиус j -й частицы.

Определение общей адгезионной энергии для пар частиц наполнителя в рамках представительного объема позволяет перейти к удельному показателю адгезионной энергии:

$$W_{уд} = \frac{\sum W_{ij}}{V_{пр.яч.}}, \quad (4)$$

где $V_{пр.яч.}$ – объем представительной ячейки.

Данный подход согласуется с результатами

Стоит, однако, отметить, что ориентированный слой полимера не способен образовываться при сближении частиц до критического расстояния, которое можно принять равным размерам глобул для данного полимера. С учетом данного факта площадь адгезионного взаимодействия может определяться следующей системой уравнений:

исследований Гарди и Ноттеджа, которые показали, что прочность адгезионного соединения напрямую зависит от смачивающей способности связующего.

На основе предложенного подхода был разработан алгоритм, позволяющий численно определять энергетические характеристики ДУПКМ при различных вариантах состава материала (рис. 2).

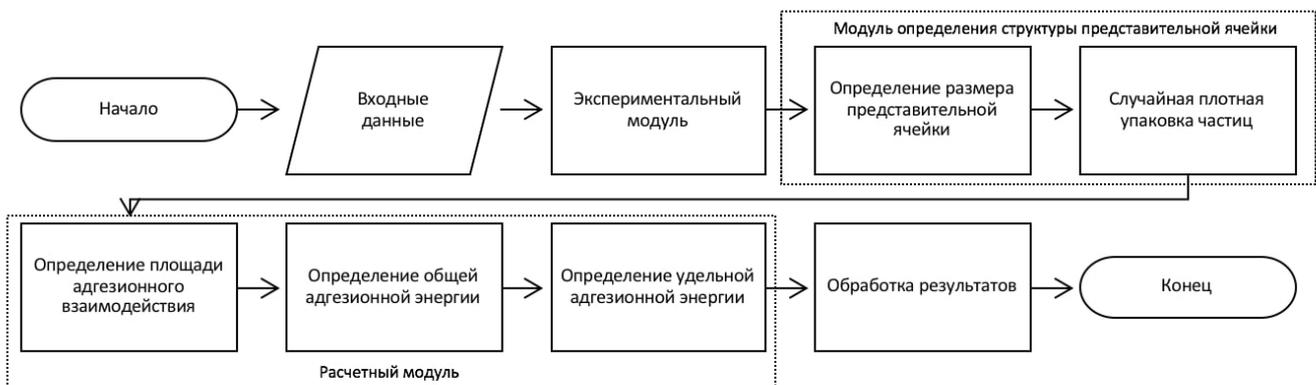


Рис. 2. Алгоритм расчета энергетических характеристик ДУПКМ

В качестве входных данных алгоритма используются данные о гранулометрическом составе наполнителя, степени наполнения, структуре представительного объема и типе связующего. Структурно данный алгоритм строится из трех модулей: экспериментального модуля, модуля определения структуры представительного объема и расчетного модуля.

В рамках экспериментального модуля определяются численные значения следующих

физических констант: краевого угла смачивания θ и поверхностного натяжения γ согласно стандартизированным методикам (ГОСТ 7934.2-74 и ГОСТ 20216 соответственно). На основании полученных данных определяется численное значение работы адгезии W_a согласно выражению (2).

Модуль определения структуры представительного объема позволяет смоделировать структуру представительного объема рассматриваемого ДУПКМ. Данный модуль состоит

из двух основных блоков: блока определения размера представительной ячейки и блока случайной упаковки частиц наполнителя.

Блок определения размера представительной ячейки осуществляет циклическое расширение начальной ячейки с заданным шагом до момента выполнения условия попадания математического ожидания степени наполнения текущей серии заполнения ячейки в заданный доверительный интервал.

Блок случайной упаковки частиц осуществляет последовательное заполнение представительного объема до выполнения условия достижения заданного объемного содержания каждой из фракций, а также заданной степени наполнения путем реализации алгоритма, разработанного автором на основе модели, предложенной В.А. Воробьевым, В.К. Кивраном и И.Э. Нацем.

Результатом реализации модуля определения структуры представительного объема являются координаты частиц в рамках данного объема.

На рис. 3 приведен пример заполнения представительного объема полидисперсным наполнителем с помощью данного модуля.

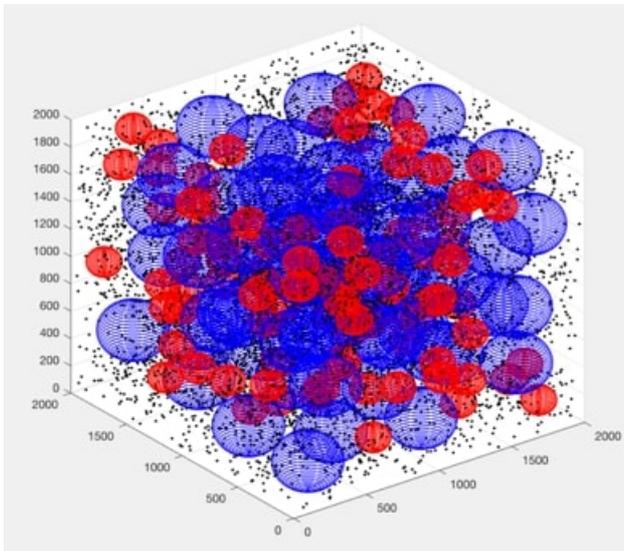


Рис. 3. Пример заполнения представительного объема полидисперсным наполнителем с помощью данного модуля

Расчетный модуль включает в себя блоки определения площадей адгезионного взаимодействия как функции расстояния между парами частиц (2), блока нахождения численных значений адгезионной энергии для пар частиц согласно выражению (1) и удельной адгезионной энергии согласно выражению (4) на основе значения общей адгезионной энергии и представительного объема ячейки.

Результаты численного моделирования энергетических характеристик ДУПКМ и сопоставление с экспериментальными данными прочностных испытаний

Было проведено численное моделирование энергетических характеристик ДУПКМ с моно-, би- и тридисперсным наполнением с различными степенями наполнения с единым типом связующего.

Объемные соотношения фракций в бидисперсном и тридисперсном наполнителях были приняты исходя из результатов реализации алгоритма случайной плотной упаковки представительного объема. Численные значения полученных соотношений объемного содержания частиц различных фракций приведены на рис. 4.

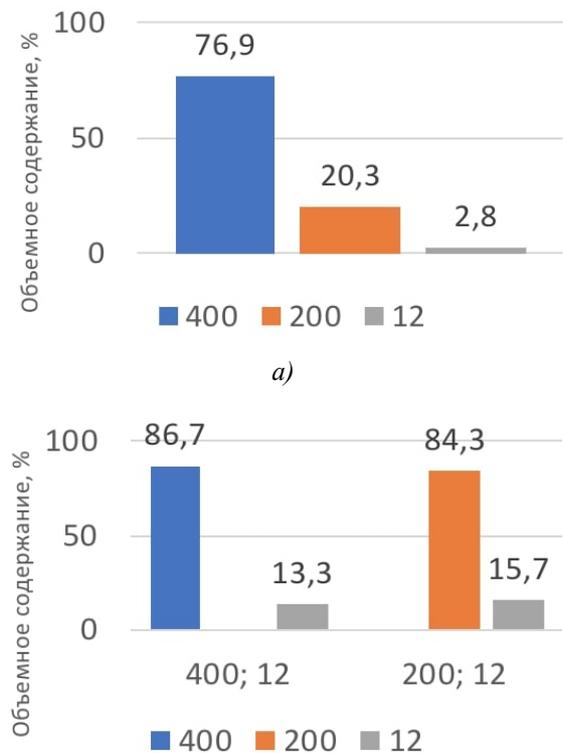


Рис. 4. Объемные соотношения фракций наполнителя для би- (а) и тридисперсных (б) ДУПКМ

Полученные в результате численного моделирования данные показывают, что каждому ДУПКМ с заданным гранулометрическим составом, степенью наполнения и типом связующего, соответствует индивидуальное значение удельной адгезионной энергии, что позволяет произвести ранжирование ДУПКМ по данной характеристике.

Сравнительный анализ полученных данных о прочностных характеристиках ДУПКМ с результатами численного моделирования

энергетических характеристик идентичных по составу ДУПКМ (рис. 5) установил, что присутствует устойчивая корреляция результатов экспериментального исследования прочностных характеристик ДУПКМ на растяжение, сжатие и изгиб с расчетной величиной удельной адгезионной энергии.



Рис. 5. Сопоставление экспериментальных данных о прочностных характеристиках ДУПКМ с результатами численного моделирования энергетических характеристик ДУПКМ

Таким образом, численное моделирование ДУПКМ с использованием разработанного алгоритма позволяет позиционировать рассматриваемый материал по энергетическим и прочностным характеристикам.

Вывод

Разработан подход, позволяющий оценить прочностные характеристики ДУПКМ, руководствуясь данными о составе материала, а именно о гранулометрическом составе наполнителя, типе связующего и степени наполнения. Результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик ДУПКМ позволили установить их корреляцию с расчетными энергетическими характеристиками и подтвердили правильность выдвинутых положений о доминирующей роли ориентированного слоя полимера в формировании прочностных характеристик ДУПКМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.A. Sarkisyan, M.G. Asratyan, A.A. Mkhitarian, K.Kh. Katrdzhyan, A.K. Dadivanyan, Orientation of macromolecules at the interface of polymer and fillers, *Polymer Science U.S.S.R.*, Volume 27, Issue 6, 1985, Pp. 1494-1498.
2. J. Balko, G. Portale, R. Lohwasser, M. Thelakkat, T. Thurn-Albrecht. Surface induced orientation and vertically layered morphology in thin films of poly(3-hexylthiophene) crystallized from the melt // *Journal of Materials Research*, 2017, 32(10), Pp.1957-1968.
3. A. Karim, S. Kumar, *Polymer Surfaces, Interfaces and Thin Films*, World Scientific, Singapore, 2010, 304 P.

Изменение состава ДУПКМ приводит к изменению адгезионной энергии и пропорциональному изменению прочностных свойств. Наибольшие прочностные и энергетические показатели достигаются при уменьшении среднего размера частиц наполнителя, а также при повышении степени наполнения.

4. Грищенко, А. Е., Черкасов, А.Н. Ориентационный порядок в поверхностных слоях полимерных материалов // *УФН.* – 1997. –Т. 167. –№ 3. – С. 269–285.
5. Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии: учебник; 4-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2010. – 416 с.
6. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: избранные труды. – М.: Наука, 1978. – 386 с.
7. Бобрышев, А.Н., Ерофеев, В.Т., Козомазов, В.Н. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособ. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 480 с.
8. Тарасов, В.А., Галиновский, А.Л., Елфимов, В.М. Эрозионное изнашивание обрабатываемой поверхности при циклическом нагружении потоком абразивных частиц // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.* – 2008. – С.163-174.
9. S. Torquato. Jammed hard-particle packings // *Rev. Mod. Phys.*, 2010, Vol. 82, No.3, Pp. 2633-2672.

REFERENCES

1. V.A. Sarkisyan, M.G. Asratyan, A.A. Mkhitarian, K.Kh. Katrdzhyan, A.K. Dadivanyan, Orientation of macromolecules at the interface of polymer and fillers, *Polymer Science U.S.S.R.*, Volume 27, Issue 6, 1985, Pp. 1494-1498.
2. J. Balko, G. Portale, R. Lohwasser, M. Thelakkat, T. Thurn-Albrecht. Surface induced orientation and vertically layered morphology in thin films of poly(3-hexylthiophene) crystallized from the melt // *Journal of Materials Research*, 2017, 32(10), Pp.1957-1968.
3. A. Karim, S. Kumar, *Polymer Surfaces, Interfaces and Thin Films*, World Scientific, Singapore, 2010, 304 P.
4. Grishchenko, A.E., Cherkasov, A.N. *Orientation Order in Polymer Surface Layers* // *UFN.* – 1997. Vol. 167. – No.3. – pp. 269-285.
5. Friedrichsberg, D.A. *Colloid Chemistry Course: manual*;

4-th edition revised and supplemented. – S-Pb.: Lan, 2010. – pp. 416.

6. Rebinder, P.A. *Surface Phenomena in Dispersions. Colloid Chemistry: Selected Proceedings*. – M.: Science, 1978. – pp. 386.

7. Bobryshev, A.N., Erofeev, V.T., Kozomazov, V.N. *Polymeric Composites: manual*. – M.: ACB Publishing House, 2013. – pp. 480.

8. Tarasov, V.A., Galinovsky, A.L., Elfimov, V.M. Erosion wear of surface worked at cyclic loading with abrasive particles // *Bulletin of Bauman STU of Moscow*. – 2008. – pp. 163-174.

9. S. Torquato. Jammed hard-particle packings // *Rev. Mod. Phys.*, 2010, Vol. 82, No.3, Pp. 2633-2672

Рецензент д.т.н. С.В. Кузьмин

УДК 621.77.016:62178.061

DOI: 10.30987/article_5b71326c60cfe3.01351409

Н.А. Конева, д.ф.-м.н.

(Томский государственный архитектурно-строительный университет),

В.А. Логвин, к.т.н., И.В. Терешко, к.ф.-м.н.
(ГУВПО «Белорусско-Российский университет»),

С.А. Шептунов, д.т.н.

(Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук),

E-mail: koneva@tsuab.ru

Влияние тлеющего разряда на изменение дислокационной структуры Ni_3Fe

В статье проведен анализ результатов исследований влияния обработки в тлеющем разряде на изменение дислокационной структуры Ni_3Fe . Обнаружено, что после обработки в тлеющем разряде в сплаве происходит изменение дислокационной структуры на значительную глубину от поверхности облучения. Доказано, что особенности формирования сложных дислокационных субструктур в результате воздействия плазмы тлеющего разряда близки к наблюдаемым при пластическом деформировании.

Ключевые слова: плазма; тлеющий разряд; дислокационная структура; автоматизированная технологическая среда; вакуумные установки.

N.A. Koneva, D. Phys.-Math.,

(Tomsk State Architectural-Construction University),

V.A. Logvin, Can. Eng., I.V. Tereshko, Can. Phys.-Math.,

(SIHVE "Belorussian-Russian University"),

S.A. Sheptunov, D. Eng.

(Institute of Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences)

Glow discharge impact upon changes in Ni_3Fe dislocation structure

In the paper there is shown an analysis of results in the investigation of a working impact in a glow discharge upon Ni_3Fe dislocation structure changes. It is defined that after working in a glow discharge in an alloy there are changes in a dislocation structure for a considerable depth from the surface of irradiation. It is proved that the peculiarities of complex dislocation substructures formation as a result of glow discharge plasma impact are close to those observed at plastic deformation.

Keywords: plasma; glow discharge; dislocation structure; automated technological environment; vacuum plants.

Разработка технологий по изменению физико-механических свойств материалов является актуальной проблемой современной экономики. Рациональная постановка и решение задач, касающихся этой проблемы, осуществляется по разным направлениям: созданием композиционных высокоэффективных материалов, совершенствованием способов их обработки,

подбором смазки и смазочных материалов, формированием покрытий и т.д. Детали в современных устройствах работают при высоких тепловых и механических нагрузках, в химически активных и абразивных средах. Постоянный рост реализуемых скоростей, давлений, рабочих температур всё актуальнее ставит задачи по сохранению или повышению их надежности. Для этого необходимы