

**Особенности изложения курса «Композиционные материалы»  
для студентов инженерных специальностей**Бибик А. И.<sup>1</sup>, Попко С. В.<sup>1</sup>, Петренко С. И.<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,<sup>2</sup>Белорусская государственная академия авиации

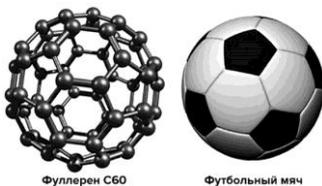
Минск, Республика Беларусь

*В данной работе рассматриваются преимущества использования композитных покрытий, содержащих фуллерены в экстремальных условиях (авиационной и космической технике, биомедицине, кораблестроении).*

Одним из ярких научных направлений последнего десятилетия является физика и химия фуллеренов. Открытие фуллеренов, углеродных нанотрубок и создание на их основе разнообразных материалов требует внесения изменений в учебные программы вузов. В данной работе приведены сведения о фуллеренах, способах их получения, а также экспериментальные исследования некоторых механических свойств металл-фуллереновых композиций [1].

Фуллерен назван в честь американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера (1895–1983), создававшего так называемые геодезические купола. Фуллер использовал для строительства своих куполов данные рентгеноструктурного анализа «молекулы» алмаза. Поэтому, когда ученые впервые получили сферическое соединение  $C_{60}$  они тут же назвали его фуллереном.

Фуллерены - углеродные соединения с четным, более 20 количеством атомов углерода, образующих 3 связи друг с другом. Атомы в молекулах фуллеренов расположены на поверхности сфероида в вершинах гексагонов и пентагонов. Наиболее выгодной симметрией обладает молекула  $C_{60}$ , состоящая из 12-ти правильных пятиугольников и 20-ти шестиугольников, которая напоминает футбольный мяч (рис. 1).

Рис. 1. Структура молекулы  $C_{60}$

Она характеризуется 10 осями симметрии третьего порядка и является наиболее стабильной среди всех фуллеренов. Атомы в молекуле связаны между собой ковалентными связями. Радиус молекулы  $C_{60}$  составляет 0,357 нм. Фуллерены с количеством атомов более 70 (например  $C_{76}$ ,  $C_{78}$ ,  $C_{84}$ ,  $C_{96}$ ) называют высшими фуллеренами.

Фуллерены позволяют модифицировать известные полимеры, придавая им новые свойства и расширяя область применения материалов. Были исследованы физико-механические свойства полистирола (ПС) и полистирола легированного фуллеренами (ПС+ $C_{60}$ ). Структуры (ПС+ $C_{60}$ ) были получены в результате механического перемешивания раствора ПС в толуоле с добавлением  $C_{60}$ , которое сопровождалось ультразвуковым воздействием. После однородного распределения фуллеренов в растворе образец высушивался на стеклянной подложке.

Для экспериментального определения характеристик исследуемых материалов использовался прибор IMPULSE-1R, созданный в Институте прикладной физики НАНБ (рис. 2).

Применение данного прибора позволяет исключить испытания на стандартных разрывных машинах и не требует изготовления специальных образцов. Его принцип работы основан на использовании датчиков, преобразующих величину механических деформаций, возникающих при воздействии индентора прибора на исследуемый образец, в электрические сигналы.



Рис. 2. Прибор IMPULSE-1R

Последующая компьютерная обработка полученных данных по специально разработанным алгоритмам [2; 3] позволяет в результате одного измерения получить информацию о твердости, модуле упругости, пределе прочности, жесткости, коэффициенте вязкости тестируемого мате-

риала. Основой расчета всех параметров является функция зависимости скорости проникновения индентора от времени. Дифференцируя эту функцию можно получить значение ускорения в любой момент времени, а умножив ускорение на массу индентора – значение контактной силы  $P(t)$ , которая дает представление о твердости материала:

$$H = \frac{1}{\pi D} \cdot \frac{dP}{dl},$$

где  $D$  – диаметр сферы наконечника индентора;  $l$  – глубина его внедрения.

Коэффициент жесткости  $k$  можно найти из закона сохранения энергии. Далее, учитывая, что для вязкоупругих материалов он связан с модулем Юнга  $E$  соотношением

$$k = 1,06E\sqrt{R} \cdot l_{\max}^{1/2},$$

где  $R$  – радиус индентора, можно рассчитать модуль Юнга по формуле

$$E = 0,93 \frac{k}{\sqrt{R}} \cdot l_{\max}^{1/2}.$$

Затем, используя формулу Герца для контактной силы

$$P = \frac{4E}{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{R} \cdot l_{\max}^{1/2},$$

можно найти коэффициент Пуассона  $\mu$ . Расчет коэффициента вязкости  $\eta$  производится по формуле

$$\eta = \frac{mv_0}{l} \cdot \ln \left( \frac{v_0^2}{v_0^2 - v^2} \right),$$

где  $v_0$  – начальная скорость индентора;  $v$  – текущая скорость индентора.

Исследования, проведенные специалистами Белорусской государственной академии авиации, показали, что введение в полистирол не-

большого количества (около 1 %) фуллеренов  $C_{60}$  существенно увеличивает его диэлектрическую проницаемость и уменьшает удельное сопротивление. Эксперименты также показали, что  $C_{60}$  увеличивает химическую стойкость, обеспечивает усиление защитных функций пленок ПС от действия ультрафиолетовых лучей. Так пленка толщиной примерно 0,15 мм полностью поглощает ультрафиолет короче 350 нм. Сочетание названных свойств позволяет сделать вывод о перспективном применении (ПС +  $C_{60}$ ) покрытий в экстремальных условиях (авиационной и космической технике, биомедицине, кораблестроении).

В работе исследовались только трибологические свойства полистирола, модифицированного углеродными наночастицами. Исследование процессов трения скольжения осуществлялось с помощью установки, в которой плоский образец, сопряженный с индентором, взаимодействует со вращающимся диском. Отклонение индентора под действием силы трения измеряется при помощи бесконтактного датчика малых перемещений на основе эффекта Холла.

На рис. 3 представлена зависимость силы трения  $F$  от пути  $S$  для полистирола (кривая 1) и полистирола, модифицированного  $C_{60}$  (кривая 2).

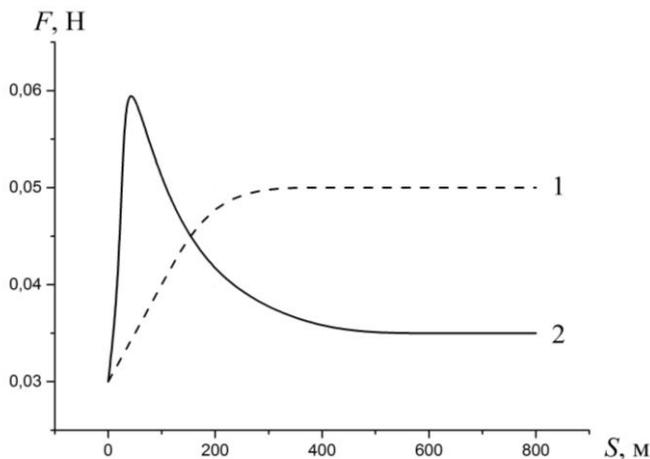


Рис. 3. Сравнение силы трения для полистирола (кривая 1) и полистирола, модифицированного  $C_{60}$  (кривая 2)

Уменьшение коэффициента трения для образцов, содержащих фуллерены, может объясняться изменением механизма трения скольжения на трение качения.

Другим типом интересных наноструктур с широким потенциалом применения являются углеродные нанотрубки. Они представляют собой графитовые сетки, свернутые в трубки. Однослойная нанотрубка может иметь диаметр 2 нм и длину 100 мкм, что делает ее структурой, способной служить нанопроволокой. Многостенные нанотрубки могут содержать от нескольких до нескольких десятков одностенных нанотрубок, вставленных друг в друга. Широкие перспективы использования нанотрубок в материаловедении открываются при капсулировании внутри углеродных нанотрубок сверхпроводящих кристаллов, что позволяет изолировать сверхпроводящие материалы от вредного воздействия внешней среды.

### Литература

1. Витязь, П.А. Фуллерены и фуллереносодержащие материалы / П. А. Зезин, Э. М. Шпилевский, В. Ф. Стельмах. – Сборник научных трудов, Минск: БГУ, 2001. – С. 5–26.
2. Кужир, П. Г. Физика конденсированных сред / П. Г. Кужир, А. А. Баранов, А. П. Каравай, Н. П. Юркевич. – Минск: Технопринт, 2002. – С. 155–169.
3. Леонович, С. Н. Основы физики твердого тела для строителей / С. Н. Леонович, С. И. Петренко. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 202–217.

УДК 620.130

### Гистерезисная интерференция магнитных полей

Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Представлены расчетные начальные и гистерезисные ветви электрического напряжения датчика, прямо пропорциональные остаточной намагниченности магнитного носителя (МН). Воздействие на МН осуществляли импульсными магнитными полями двух источников. Построены фигуры гистерезисной интерференции, позволяющие повысить точность контроля структурных и магнитных свойств объектов.*

Гистерезисная интерференция ( $HI$ ) на магнитном носителе и других носителях информации впервые получена авторами и изложена, в частности, в [1; 2; 5–8; 11]. Так, в [1; 2] представлены расчеты распределений  $HI$  и ее использования при контроле объектов из электропроводящих матери-