

## МЕХАНИЗМ МОДИФИКАЦИИ НАНОЧАСТИЦАМИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ

**И. В. Малков, А. Г. Макухин, Г. В. Сыровой**

*Кафедра «Станки, инструменты и инженерная графика»,  
ГОУ ВПО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»;  
siiig@i.ua*

**Ключевые слова:** модификатор наночастицы; полимерный композит; рентгенограмма; эпоксидная матрица.

**Аннотация:** Проведен выбор и идентификация модификаторов эпоксидной матрицы, обусловленный сравнительной доступностью этих материалов и возможностью варьировать физико-химическими свойствами композиционных материалов с использованием природных или выпускаемых в промышленных масштабах наномодификаторов. Анализ рентгенограмм серий образцов, модифицированных шунгитом, терморасширенным графитом и аэросилом, показал значительное изменение в структуре полимерного композитного материала, а изменение интенсивности максимумов, характеризующих структурируемые блоки и расстояния между ними в полимере в зависимости от количества вводимого модификатора, дало основание к разработке механизма взаимодействия наномодификаторов с полимерной матрицей.

---

В современной авиационно-космической технике одной из проблем остается снижение веса конструкций летательных аппаратов. Замена металлических узлов на полимерные позволяет снизить вес конструкции аппаратов на 20 – 30 %. Однако полимерные материалы должны сочетать в себе высокую прочность, стойкость к динамическим нагрузкам и обладать малым весом. Наиболее перспективными материалами становятся материалы на основе стекло- и углеволоконных наполнителей с наномодифицированным эпоксидным связующим. Проблемой является поиск эффективного наномодификатора, разработка технологии его введения в матрицу и поиск оптимальных технологий изготовления деталей и узлов конструкций летательных аппаратов.

Получению полимерных композиционных материалов с различными наномодификаторами в последнее десятилетие уделяется огромное внимание. Об этом свидетельствуют объемы финансирования программ по нанотехнологиям ведущих стран мира [1]. Ежегодно правительство США инвестирует в развитие нанотехнологии около 4,4 млрд долл., страны Европы – 3,5 млрд долл., страны Азии – около 4,0 млрд долл. В России, Беларуси и Украине проводятся ежегодные научные конференции, такие как «Нано–2010», «Нанотехнологии и новые материалы», «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов», «Высокие технологии XXI века», на которых половина докладов посвящена наномодифицированным полимерным материалам.

Первые результаты по получению и использованию наноуглеродных модификаторов приведены в работе американских ученых [2]. Нанотрубки, астралены, фуллерены использовались ими для модификации эпоксидных смол. Количество наномодификатора было от 20 до 60 %. Эти модификаторы необычайно дорогостоящи, технология их получения прецезионна. Однако именно астралены и фуллерены – структурные разновидности углерода и в настоящее время широко изучаются. Особый интерес представляет  $C_{60}$ , предлагаемый учеными к применению от медицины до аэрокосмической промышленности [2 – 4].

Особенность наноуглерода заключается в поверхности частиц (до  $300 \text{ м}^2/\text{г}$ ), являющейся активной за счет свободных  $\pi$ -электронов. Ученые России предлагают более дешевые методы получения наноуглерода [4]. Получаемый ультрадисперсный алмазный порошок (УДА) содержит как алмазную, так и графитовую составляющую (УДА-Г) [4]. Наиболее перспективным для применения в промышленном масштабе предлагается шунгит – минерал, в состав которого входит от 30 до 70 % наноуглерода [5].

Модификация эпоксидной смолы  $C_{60}$  УДА и шунгитом значительно улучшает физико-механические характеристики: предел прочности при разрыве и предел прочности при сдвиге увеличивается на 30 % [2, 4, 6].

Однако большинство авторов не рассматривают механизм взаимодействия наномодификаторов с матрицей на молекулярном уровне, ограничиваясь утверждениями изменений структуры, хотя не только экспериментальные результаты, но и теоретическая их интерпретация могут обеспечить рациональный технологический процесс.

Целью работы является усовершенствование технологии получения полимерных композиционных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками посредством модификации наночастицами. В работе решены следующие задачи: выбор и идентификация наноразмерных материалов (алмазный порошок, шунгит, аэросил) методом рентгенофазового анализа; отработка технологии введения различных наномодификаторов в эпоксидную матрицу; изучение структуры и физико-механических свойств образцов материалов; определение механизма взаимодействия наномодификаторов с эпоксидной матрицей и наполнителем.

### Выбор и идентификация модификаторов эпоксидной матрицы

Объектом исследования были модификаторы различной природы – аэросил и углеродные материалы (алмазный порошок, шунгит, графит) – с различной структурой. Метод исследований – рентгеноструктурный анализ. Рентгенограммы получены на дифрактометре ДРОН-4, излучение  $CuK_{\alpha}$ .

Идентификация образцов проводилась с использованием таблиц [7]. Расчет межплоскостных расстояний  $d$  определяли по уровню Вульфа–Брэгга:

$$2 \sin \theta = \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

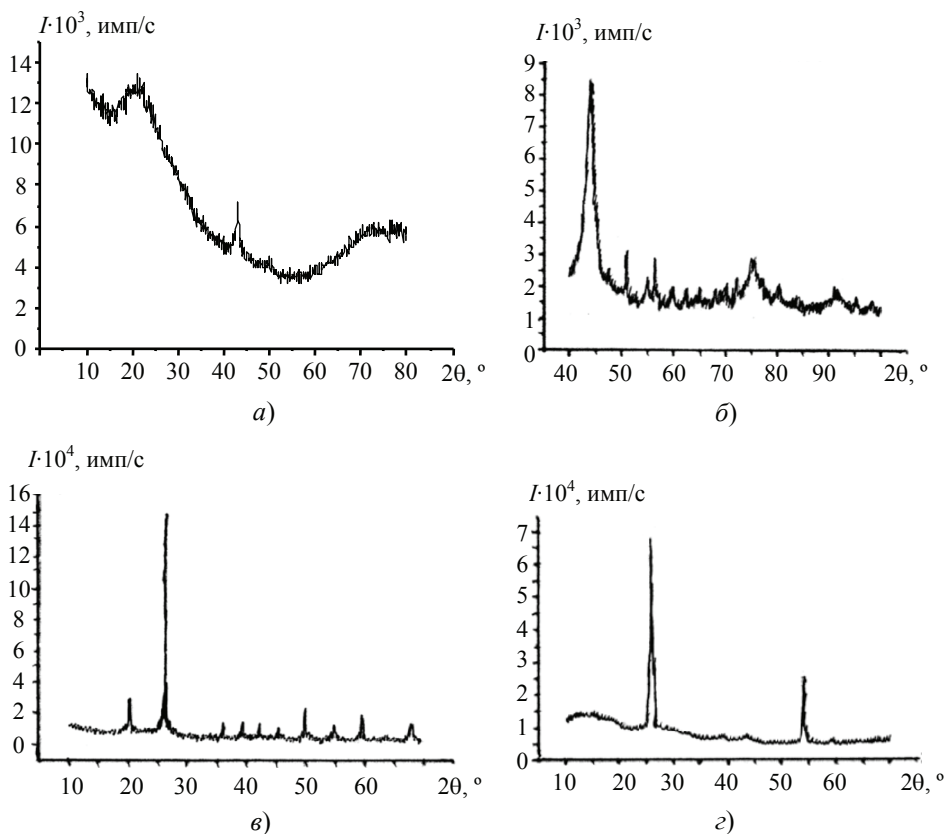
Дисперсность порошков рассчитана по формуле:

$$\beta = \frac{\xi \lambda}{D} \cos \theta, \quad (2)$$

где  $\theta$  – углы отражения «у подошвы», °;  $D$  – средний размер кристаллитов, нм;  $\xi$  – множитель, учитывающий форму частиц и индексы отражающей плоскости, так как диапазон изменений от 0,98 до 1,39, на практике принято считать  $\xi = 1$ ;  $\beta$  – интегральная ширина;  $\lambda$  – длина волны излучения, нм.

Используемый метод наиболее часто применяется для определения дисперсности кристаллитов кокса, имеющих дискообразную форму с толщиной 2...5 нм и диаметром 5...12 нм [7].

Данные размеров кристаллов, рассчитанные по уширению линий на рентгенограмме удовлетворительно совпадают с данными электронной микроскопии.



**Рис. 1. Рентгенограммы аэросила (а), алмазного порошка (б), шунгита (в), терморасширенного графита (г)**

Идентификация модификаторов по рентгенограммам показала:

а) аэросил, на рентгенограмме (рис. 1, а) отчетливо индицируются рефлексы от плоскостей 101; 112; 100, что соответствует кристаллической структуре  $\text{SiO}_2$  гексагональной модификации. Примесные линии не идентифицировались. Дисперсность порошков до 5 нм;

б) алмазный порошок (рис. 1, б) содержит две кристаллические структуры углерода – алмазную и графитовую. Индексы плоскостей отчетливо определяются и даны в табл. 1.

Соотношение алмазной и графитовой составляющей примерно 4:1. Дисперсность составила 5...10 нм, что согласуется с данными работы [4];

в) шунгит (рис. 1, в) – природный материал, содержит от 30 до 70 % углерода. В шунгите, используемом в эксперименте содержится углерод в одной из разновидностей – графите. Материал текстурирован с четко выраженной ориентацией графита по плоскости 002; 004 и содержанием  $\text{SiO}_2$  более 50 %;

г) терморасширенный графит (ТРГ), выпускаемый промышленностью Украины, имеет ту же кристаллическую структуру, что и шунгит (рис. 1, г). В от-

Таблица 1

**Расшифровка рентгенограмм**

Интенсивность	Индексы (h, k, l)	Тип
100	111	А
22	220	
11	311	

личие от шунгита он не имеет значительного количества примесей (см. рис. 1, в и г).

Исходя из сравнения изученных модификаторов, выбраны аэросил, шунгит и терморасширенный графит с целью проследить влияние (количественного и качественного) модификатора на физико-химические свойства наномодифицированного материала на основе эпоксидного компаунда.

### Поиск рациональных режимов получения наномодифицированных полимерных композитов

Объектом исследования выбраны полимерные материалы на основе эпоксидной смолы, наномодифицированные: а) аэросилом; б) шунгитом; в) терморасширенным графитом; г) алмазным порошком. Эпоксидные смолы – это продукты поликонденсации эпихлоргидрина с полиатомными фенолами. Активными группами, участвующими в процессе полимеризации, в данном случае образования сетчатой структуры при введении отвердителя являются: эпоксидная  $\text{CH}(\text{CH}_2)\text{O}$  и гидроксильная  $\text{OH}$  группы.

Отвердителем служит гексаметилендиамин (ГМДА) –  $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_6\text{NH}_2$ . Согласно литературным данным наибольший эффект получен при соотношении матрица : модификатор 100 : (1 – 10) % вес. Для выяснения механизма взаимодействия матрицы с твердой фазой модификатора нами были получены серии образцов с содержанием модификаторов от 1 до 20 % (табл. 2).

Высушенный модификатор вводили в отвердитель, тщательно перемешивали и выдерживали при температуре  $t = 120^\circ\text{C}$  до прекращения выделения пузырей воздуха. Отверждение образцов проводили по следующему режиму: на воздухе ( $20\dots 40^\circ\text{C}$ ) (6 + 5) ч при температуре  $120^\circ\text{C}$ . Об изменении в структуре судили по изменению интенсивности линий на рентгенограммах. На рисунке 2, а приведена

Таблица 2

Соотношение матрица : модификатор

Модификатор	На 100 % вес. матрицы							
	1	2	3	4	5	6	10	20
Аэросил	+	+	+	+	+	–	–	–
Шунгит	+	+	+	+	+	–	+	+
Графит	+	+	+	+	+	+	+	+
Алмазный порошок	–	+	–	–	+	–	+	+

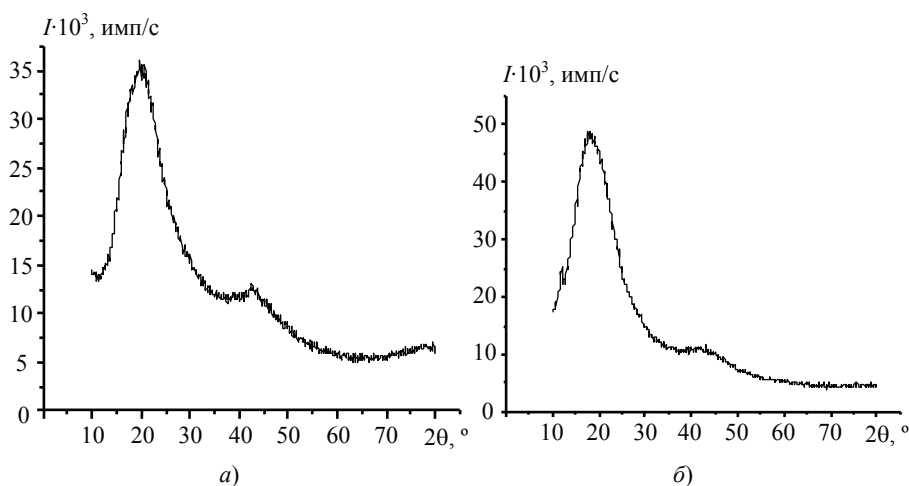
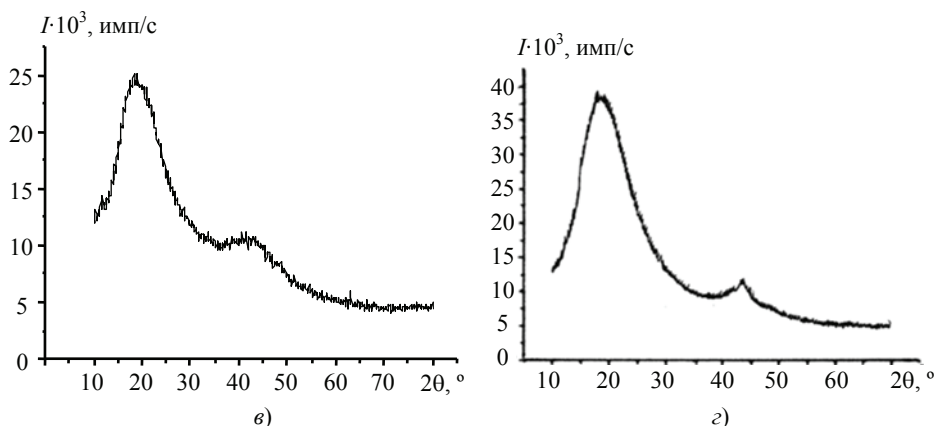


Рис. 2. Рентгенограмма эпоксидной матрицы ЭДТ-10 без модификаторов (а), ЭДТ-10 + 2 % аэросила (б)



**Рис. 2. Продолжение: ЭДТ-10 + 3 % аэросила (б),  
ЭДТ-10 + 2 % алмазного порошка (з)**

рентгенограмма полимерной матрицы ЭДТ-10 без модификаторов. Максимумы указывают на стабильную структуру с расстоянием  $4,52 \text{ \AA}$  между блоками.

Введение аэросила до 5 % не приводит к изменению основного расстояния, но снижает интенсивность. Вероятно, дисперсность  $\text{SiO}_2$  позволяет внедриться в сетчатую структуру матрицы (см. рис. 2, б, в). Такой же эффект наблюдали при введении 2 % алмазного порошка (см. рис. 2, з).

Модификаторам шунгиту и терморасширенному графиту уделено особое внимание, так как механизм взаимодействия углеродных наполнителей с эпоксидной матрицей не выяснен, а именно соотношение модификатор : матрица является определяющим для получения композитных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами.

Анализ рентгенограмм серий образцов, модифицированных шунгитом, терморасширенным графитом и аэросилом показывает значительное изменение в структуре полимерного композитного материала.

Изменение интенсивности максимумов, характеризующих структурируемые блоки и расстояния между ними в полимере в зависимости от количества вводимого модификатора дало основание к разработке механизма взаимодействия наномодификаторов с полимерной матрицей.

### **Механизм взаимодействия наномодификаторов с эпоксидной матрицей**

Механизм взаимодействия модификаторов с полимерной матрицей рассматривался в двух планах: а) на молекулярном уровне; б) при влиянии структуры на физико-механические свойства нанокompозитов.

Учитывая, что метиленовые мостики, разделяющие ароматические ядра, нарушают сопряжение в полимерах, ухудшая их электрофизические свойства, многие исследователи изучали возможность получения полимеров, в которых ароматические циклы были бы разделены гетероатомами O, N, S и др., имеющими на внешних орбитах неспаренные электроны, взаимодействующие с  $\pi$ -электронами бензольных ядер и, следовательно, не нарушающие сопряжения.

В органических соединениях существуют кроме прочных химических связей водородные связи как в самих молекулах, так и между цепями или блоками молекул. Электростатическая теория указывает на взаимное влияние молекул. Если в поле одних молекул попадает другая молекула, то в зависимости от размеров и расстояний между ними / интенсивность электростатического поля  $E$  может достигать огромных размеров:

$$E = \frac{e}{l^2}. \quad (3)$$

Поскольку введение модификатора осуществляется в твердой фазе, рассмотрим взаимодействие модификатора с матрицей с точки зрения теории кристаллического поля и теории молекулярных орбиталей (ТМО).

Теория молекулярных орбиталей представляет такие молекулярные орбитали, имеющиеся в данном соединении, каково распределение электронной плотности этих орбиталей и энергия электронов на орбиталях. Молекулярные орбитали простираются по всему объему молекулы и охватывают ядра всех атомов, входящих в молекулу. Поэтому физическая сущность ТМО может быть объяснена следующим образом – электрон может находиться в любой точке молекулы, хотя вблизи атомных ядер характер его движения такой, как в свободном атоме. Молекулярные орбитали включают *s*-, *p*-, *d*-связи, но могут быть случаи и образования  $\pi$ -связей. Молекула эпоксидной смолы, кроме указанных активных групп – эпокси и гидроксильной, имеет ароматические ядра с  $\pi$ -сопряженными связями и двойные и одинарные С–Н-связи.

При введении отвердителя происходит образование сеток, блоков, величина которых определяется различными условиями проведения эксперимента (температура смолы, отвердителя, нарушение стехиометрического соотношения смола : отвердитель, режимов отверждения), а именно величина блоков, их совершенство и определяет механические свойства композиционного материала. Определить степень полимеризации можно путем инфракрасной спектроскопии.

Окружение молекулами, содержащими аминные группы, приводит к изменению линий валентных колебаний С=N, их смещению, изменению интенсивности и появлению новых линий.

Для уменьшения хрупкости, увеличения пластичности и водостойкости эпоксидных полимеров вводят минеральные добавки. Силикаты имеют жесткую пространственную структуру при соотношении «ЭД : силикат» (100 : (0,5 – 25) %), а механизм их взаимодействия представляет научный интерес. Полученный эпокси-минеральный продукт характеризуется следующей молекулярной структурой: в ИК-спектре уменьшается интенсивность полос 870 и 920  $\text{см}^{-1}$  (деформационные колебания С–С); увеличивается интенсивность полосы 1420  $\text{см}^{-1}$  (деформационные колебания  $\text{CH}_2$  в  $\text{CH}_2\text{--CO}$  эпоксидной группе), что свидетельствует об уменьшении количества эпоксидных групп в композиции и связано с раскрытием  $\text{CH}_2\text{--CO}$  цикла. Особый интерес представляет полоса поглощения 1100  $\text{см}^{-1}$ , которую можно интерпретировать как образование новой связи Si–O–C, и полоса в области 3400  $\text{см}^{-1}$ , показывающая увеличение концентрации ОН-группы, участвующие в образовании внутримолекулярной связи.

Механизм взаимодействия эпоксидной смолы с силикатами показал незначительное влияние  $\text{SiO}_2$  на электронную структуру молекул композита. Это объясняется отсутствием «свободных» электронов на устойчивой структуре полисиликата. Введение модификаторов на основе углерода также используются для придания эпоксидным композитам целого ряда улучшенных характеристик. Углеродные материалы как искусственно выращенные или полученные путем термического разложения углеводородов, так и природные (шунгит) в своей основе содержат графитовую структуру углерода. Она характеризуется наличием «свободных» электронов, которые могут создавать гибридное  $\pi$ -сопряжение с электронами молекул смолы и отвердителя.

Необычная электронная структура фуллеренов объясняется наличием большого количества слабосвязанных и делокализованных валентных электронов. В работе [7] приведены данные об электронной структуре фуллеренов – над поверхностью фуллеренов происходит перекрытие  $P_z$  орбиталей атомов углерода

с образованием  $\pi$ -полос, регистрируемых рентгеновской эмиссионной спектроскопией. Электронная структура терморасширенного графита известна, она такая же в слоях  $Sp_2$ -гибридизация атомов углерода и  $P_z$  орбитами образуют над слоями  $\pi$ -сопряженные связи (боковое перекрытие  $P_z$  орбиталей).

Рассмотрение электронной структуры молекулы эпоксидной смолы показывает, что эпокси-группа и группа ОН после введения отвердителя не являются активными. В электронном взаимодействии могут участвовать лишь неспаренные электроны азота отвердителя.

Количественно соотношение смола : отвердитель : модификатор оценено по результатам эксперимента. По известным методам в эпоксидную смолу ЭД-20 вводили различные модификаторы: алмазный порошок, шунгит, терморасширенный графит в количестве (2...10) % вес. Соотношение атомов азота в ГМДА 30 %, т.е. соотношение ЭД : ГМДА : модификатор – 100 : 13 : 4. При таком соотношении «работают» неспаренные электроны азота, образуя сопряжение  $\pi$ -электронов азота с  $\pi$ -электронами углерода. Эксперимент показал изменение электропроводности полимерной композитной матрицы на три порядка без изменения структуры полимера, если количество наномодификатора в пересчете на углерод не превышало 4 %. Дальнейшее увеличение вводимого модификатора приводит к снижению электропроводности, что ухудшает  $\pi$ -сопряжение активных групп, что подтверждается изменением структуры полимера.

На основании литературных и экспериментальных данных предложен механизм взаимодействия углеродных наномодификаторов с полимерной матрицей на молекулярном уровне, а именно образование систем  $\pi$ -сопряжения  $P_z$  электронов углерода в модификаторе с неподеленной парой атомов азота в матрице [8].

В источнике [9] исследуются прочностные характеристики эпоксидно-аминных полимеров, делается вывод о неоднородности структурообразования – наличия сеток с незавершенной фазовой сегрегацией. Образование топологичных дефектов и появление сеток с большей молекулярной массой способствует увеличению прочности. Утверждено, что сегрегация компонентов экспериментально не обнаруживается ни методами спектроскопии, электротермического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. Это и подтверждает модернистский подход к неравновесным системам – синергетику – самоорганизацию и самодезорганизацию систем [10].

Наночастицы проявляют тенденцию к образованию агрегатов с размерами до 300 нм и даже агломератов с размерами до 3000 нм. При этом структура агрегата с сильно связанными наночастицами при деформации допускает их поворот и скольжение, на что расходуется энергия развивающейся трещины, обуславливая повышение прочности материала. Трещина быстро продвигается при малом количестве модификатора, а увеличение количества агрегатов мешает ее продвижению, реализуя упрочняющий эффект.

## Выводы

1. Проведен анализ современного состояния проблемы создания материала на основе полимерных матриц с наномодификатором и обосновано значительное влияние наномодификаторов различной природы на структуру полимерного композита.

2. Сделан выбор наномодификаторов, идентифицирована их структура и дисперсность.

3. Установлено, что образование более однородной структуры приводит к повышению прочностных свойств полимерных композитов.

4. Изучение опытных образцов модифицированных эпоксидных композитов методом рентгенофазового анализа подтверждает изменение структуры композита.



5. Предложена модель взаимодействия углеродных наномодификаторов с полимерной матрицей на молекулярном уровне. Показано, что в процессе полимеризации участвуют  $\pi$ -электроны, как компонентов матрицы, так и модификатора.

6. Предложен механизм взаимодействия наномодификаторов с эпоксидной матрицей на молекулярном уровне.

#### *Список литературы*

1. Ляшенко, В. И. Большая книга о малом наномире / В. И. Ляшенко [и др.]. – Луганск : Альмаматер, 2008. – 580 с.

2. Bogdanovich, A. Fabrication and Mechanical characterization of Carbon Nanotube Yarn, 3-D Braids and Their Composites / A. Bogdanovich [et al.] // SAMPE Journal. – 2007. – Vol. 43, No. 1. – P. 6 – 19.

3. Астролены – углеродные наномодификаторы фуллероидного типа / А. Н. Пономарев, В. А. Никитин, Б. А. Шахматов [и др.] // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ) : тр. 4-й Междунар. конф., 26 – 29 апр., 2006 г., Москва / под ред. К. В. Фролова, О. С. Сироткина, В. С. Боголюбова. – М., 2006. – С. 147 – 154.

4. Пузырь, А. П. Модифицированные наноалмазы детонационного синтеза: фракционирование, свойства, варианты применения / А. П. Пузырь, В. С. Бондарь // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ) : тр. 4-й Междунар. конф., 26 – 29 апр., 2006 г., Москва / под ред. К. В. Фролова, О. С. Сироткина, В. С. Боголюбова. – М., 2006. – С. 649 – 653.

5. Гуняев, Г. М. Использование природных шунгитов для упрочнения и придания проводящих свойств конструкционным углепластикам / Г. М. Гуняев, Г. В. Начинина, И. А. Ковалевский // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ) : тр. 4-й Междунар. конф., 26 – 29 апр., 2006 г., Москва / под ред. К. В. Фролова, О. С. Сироткина, В. С. Боголюбова. – М., 2006. – С. 102 – 106.

6. Миркин, Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / Л. И. Миркин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 1961. – 863 с.

7. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 631 с.

8. Малков, И. В. Физико-химические основы наномодификации полимеров / И. В. Малков, Л. П. Бондарь, Г. В. Сыровой // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 5 (52), частини 1. – С. 70 – 71.

9. Михальчук, В. М. Структурна модифікація оптично-прозорих густосітчастих епоксидних полімерів: автореф. дис. ... д-ра хім. наук: 02.00.06 / В. М. Михальчук. – Киев, 1999. – 43 с.

10. Малков, И. В. Модернизм в науке: нанотехнологии / И. В. Малков, А. Г. Макухин, Л. П. Бондарь // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 5 (52), частини 1. – С. 72 – 73.

---

## **Mechanism of Modification of Polymer Composite Nanoparticles**

**I. V. Malkov, A. G. Makukhin, G. V. Syrovoy**

*Department “Machines, Tools and Engineering Graphics”,  
Vladimir Dal Lugansk State University named after; [siig@i.ua](mailto:siig@i.ua)*

**Keywords:** diffraction pattern; epoxy matrix; nanoparticles modifier; polymer composite.



**Abstract:** The paper describes the process of selection and identification of epoxy matrix modifiers, which have become widely available; natural or manufactured nanomodifiers possess the ability to change physical and chemical properties of composite materials. The analysis of radiographs of samples modified by Shungite, expanded graphite and Aerosil showed a significant change in the structure of polymeric composite materials; the mechanism of interaction of nanomodifiers with polymer matrix was developed on the basis of the variation in the intensity of maxima, which characterize the structured blocks and the distance between them in the polymer, depending on the amount of the administered modifier.

### References

1. Lyashenko V.I., Zhikharev I.V., Pavlov K.V., Berezhnaya T.F. *Bol'shaya kniga o malom nanomire* [Great book about small nanoworld], Lugansk: Al'mamater, 2008, 580 p. (In Russ.)
2. Bogdanovich A., Bradford P., Mungalov D., Fang SL, Zhang M, Baughman RH, Hudson S. Fabrication and Mechanical characterization of Carbon Nanotube Yarn, 3-D Braids and Their Composites, *Sampe Journal*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 6-19.
3. Ponomarev A.N., Nikitin V.A., Shakhmatov B.A., Kamenev Yu.B., Letenko D.G., Kositskii D.V. [Astrolite – carbon nanomodifiers fulleroid type], *Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh materialov i novykh metallicheskikh splavov* [Theory and practice of production technologies of manufacturing product of composite materials and new metal alloys], Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference, 26-29 April 2006, Moscow, pp. 147-154. (In Russ.)
4. Puzyr' A.P., Bondar' V.S. [The modified nanodiamonds of detonation synthesis: fractionation, properties, application options], *Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh materialov i novykh metallicheskikh splavov* [Theory and practice of production technologies of manufacturing product of composite materials and new metal alloys], Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference, 26-29 April 2006, Moscow, pp. 649-653. (In Russ.)
5. Gunyaev G.M., Nachinina G.V., Kovalevskii I.A. [Using natural shungites for strengthening and making the conductive properties of CFRP structural], *Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh materialov i novykh metallicheskikh splavov* [Theory and practice of production technologies of manufacturing product of composite materials and new metal alloys], Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference, 26-29 April 2006, Moscow, pp. 102-106. (In Russ.)
6. Mirkin L.I. *Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov* [Handbook of X-ray analysis of polycrystalline], Moscow: Fizmatlit, 1961, 863 p. (In Russ.)
7. Umanskii Ya.S., Skakov Yu.A., Ivanov A.I., Rastorguev L.N. *Kristallografiya, rentgenografiya i elektronnaya mikroskopiya* [Crystallography, X-ray and electron microscopy], Moscow: Metallurgiya, 1982, 631 p. (In Russ.)
8. Malkov I.V., Bondar' L. P., Syrovoi G. V. [Physical and chemical bases of nano polymer modification], *Visnik Kremenchuts'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu imeni Mikhaïla Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University Mykhaylo Ostrogradskiy], 2008, issue 5 (52), part 1, pp. 70-71. (In Russ.)
9. Mikhal'chuk V.M. *Extended abstract of Doctor's thesis*, Kiev, 1999, 43 p. (In Russ.)
10. Malkov I.V., Makukhin A. G., Bondar' L.P. [Modernism in Science: Nanotechnology], *Visnik Kremenchuts'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu imeni Mikhaïla Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University Mykhaylo Ostrogradskiy], 2008, issue. 5 (52) part 1, pp. 72-73. (In Russ.)

## Mechanismus der Modifikation von den Nanoteilchen der polymeren Verbundwerkstoffe aufgrund der Epoxidmatrix

**Zusammenfassung:** Es sind die Auswahl und die Identifizierung der Modifikatoren der Epoxidmatrix durchgeführt, die von der vergleichenden Fassbarkeit dieser Materialien und der Möglichkeit des Variierens von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Kompositionsmaterialien unter Ausnutzung der natürlichen oder in den industriellen Maßstäben ausgegebenen Nanomodifikatoren bedingt sind. Die Analyse der Röntgenogramme der Musterserien, die von dem Schungit, dem thermoausgedehnten Graphit und dem Aerosil modifiziert sind, hat die bedeutende Veränderung in der Struktur des polymeren Kompositmaterials gezeigt, und die Veränderung der Intensität der Maxima, die die strukturierenden Blöcke und die Entfernungen zwischen ihnen im Polymer je nach der Zahl des eingeführten Modifikators hat die Gründung zur Entwicklung des Mechanismus der Wechselwirkung der Nanomodifikatoren mit der polymeren Matrix gegeben.

---

## Mécanisme de modification de nanoparticules polymériques des composites à la base de la matrice époxy

**Résumé:** Sont effectuées la sélection et l'identification des modificateurs de la matrice époxy, dues à la disponibilité comparative de ces matériaux et la possibilité de varier les propriétés physico-chimiques des matériaux composites naturels ou les nanomodificateurs fabriqués à l'échelle industrielle. L'analyse des échantillons des séries d'échantillons modifiés par shungite, graphite thermoélargi et aerosil a montré le changement significatif dans la structure du polymère composite, et la variation de l'intensité des sommets caractérisant les blocs structurés et les distances entre eux dans le polymère en fonction de la quantité du modificateur induit a servi de base à l'élaboration d'un mécanisme d'interaction des nanomodificateurs avec la matrice polymère.

---

**Авторы:** *Малков Игорь Владиславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Станки, инструменты и инженерная графика»; *Макухин Анатолий Григорьевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Станки, инструменты и инженерная графика»; *Сыровой Геннадий Владимирович* – соискатель, старший преподаватель кафедры «Станки, инструменты и инженерная графика», ГОУ ВПО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

**Рецензент:** *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---