

# Композиты и наноструктуры (Composites and Nanostructures)

Научно-технический журнал

<http://www.issp.ac.ru/journal/composites>

ISSN 1999-7590

Издаётся с 2009 г.

Главный редактор профессор С.Т. Милейко

## Редакционная коллегия

Алымов М.И., чл.-корр. РАН; Андриевский Р.А., проф.; Аннин Б.Д., академик; Бахвалов Ю.О., д-р. техн. наук;  
Викулин В.В., проф.; Георгиевский Д.В., проф.; Глезер А.М., проф.; Колобов Ю.Р., проф.; Костиков В.И., чл.-корр. РАН;  
Куперман А. М., проф.; Лурье С.А., проф.; Патлажан С.А., проф.; Победря Б.Е., проф.; Сапожников С.Б., проф.;  
Севастьянов В. Г., чл.-корр. РАН; Сороина Т.Г., канд. техн. наук;  
Столин А.М., проф.; Шмотин Ю.Н., канд. техн. наук

## Редакционный совет

Л.Р. Вишняков, проф.(Украина); С.В. Ломов, проф. (Бельгия); A.R. Bunsell, проф. (Франция); K.K. Chawla, проф. (США);  
T-W Chou, проф. (США); Sh. Du, проф. (КНР); T. Ishihara, д-р (Япония); A. Kayama, проф. (Япония);  
W.M. Kriven, проф. (США); L.M. Manocha, проф. (Индия); V.M Orera, проф. (Испания);  
H. Schneider, проф. (Германия); K. Schulte, проф. (Германия); G.C. Sih, проф. (США); M. Singh, д-р (США);  
H.D. Wagner, проф. (Израиль)

### Учредители:

ИФТТ РАН;

ООО «Научно-техническое предприятие  
«Вираз-Центр»

### Редакция: ИФТТ РАН

Россия, 142432, г. Черноголовка

Московской обл.

Тел./Факс: +7(49652)22493

<http://www.issp.ac.ru>

Ведущий редактор: Н.А.Прокопенко

### Издательство: ООО НТП «Вираз-Центр»

Россия, 105264, Москва,

ул. Верхняя Первомайская, д. 49, корп. 1 офис 401.

Почтовый адрес: Россия, 105043, Москва, а/я 29

Тел.: 7 495 780-94-73

<http://www.machizdat.ru>

e-mail: [virste@dol.ru](mailto:virste@dol.ru)

Директор журнала: М.А.Мензуллов

Вёрстка: А.А.Мензуллов

Отпечатано: ООО «РПЦ ОФОРТ» г. Москва,

пр-кт Будённого, 21

Заказ №

Тираж 100

Цена – договорная

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации № ФС77-33449 от 08.10.2008.

*Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за достоверность приведённых сведений, а также за наличие в них данных, не подлежащих открытой публикации. Материалы рецензируются.*

*Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале, осуществляются только с разрешения редакции.*

На первой стр. обложки: Рис. 1. ИК спектры диффузного отражения исходных УНТ (1), после их обработки в смеси серной и азотной кислот (2) и перманганатом калия (3)

Из статьи: Разработка метода введения многослойных углеродных нанотрубок в эпоксидные полимеры для повышения прочностИ материала

# Composites and Nanostructures

<http://www.issp.ac.ru/journal/composites/>

ISSN 1999-7590

**Editor-in-Chief**  
**Professor Sergei T. Mileiko**

## Editorial Board

Professor M.I. Alymov (Russia); Professor R.A. Andriyevskii (Russia); Professor B.D. Annin (Russia);  
Dr Yu.O. Bakhvalov, (Russia); Professor A.R. Bunsell (France); Professor K.K. Chawla (USA); Professor T-W Chou (USA);  
Dr T. Ishihara (Japan); Professor Sh. Du (China); Professor D.V. Georgievskii (Russia); Professor A.M. Gleser (Russia);  
Professor A. Kayama (Japan); Professor Yu.R. Kolobov (Russia); Professor V.I. Kostikov (Russia);  
Professor W.M. Kriven (USA); Professor A.M. Kuperman (Russia); Professor S.V. Lomov (Belgium);  
Professor S.A. Lurie (Russia); Professor L.M. Manocha (India); Professor V.M. Orera (Spain); Professor S.A. Patlazhan (Russia);  
Professor B.E. Pobyedrya (Russia); Professor S.B. Sapozhnikov (Russia); Professor H. Schneider (Germany); Dr  
Shmotin Yu. N. (Russia); Dr T.G. Sorina (Russia); Professor A.M. Stolin (Russia); Professor K. Schulte (Germany);  
Professor V.G. Sevastyanov (Russia); Professor G.C. Sih (USA); Dr M. Singh (USA); Professor V.V. Vikulin (Russia);  
Professor L.R. Vishnyakov (Ukraine); Professor H.D. Wagner (Israel)

### Established by:

Solid State Physics Institute  
Russian Academy of Sciences  
(ISSP RAS)  
and  
Science Technical Enterprise  
«Virag-Centre» LTD

### ISSP RAS:

2, Institutskaya str., Chernogolovka, Moscow district., Russia,  
142432

**Tel./Fax:** +7(49652)22493

<http://www.issp.ac.ru/journal/composites/>

**Editor:** Nelli Prokopenko

### Publishing House:

STE Virag-Centre LTD  
49/1, Verchnyaya Pervomayskaya str., Moscow,  
Russia, 105043.  
Phone: 7 495 780 94 73  
<http://www.mashizdat.ru>

### Director of journal

M.A. Menzullov

### Making-up

A.A.Menzullov

**Photo on the cover:** Fig. 1. IR diffuse reflectance spectra of original CNT (1), after treatment by a mixture of sulfuric and nitric acids (2), and by potassium permanganate (3).

**A Development of the method of introducing multi-walled carbon nanotubes in epoxy polymers to ENHANCE strength of the material**

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>В.С.Зарубин, Г.Н.Кувыркин, И.Ю.Савельева</b> <b>ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТЕКСТУРИРОВАННОГО КОМПОЗИТА С АНИЗОТРОПНЫМИ ПЛАСТИНЧАТЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ</b> .....	<b>1</b>
С использованием разработанной математической модели переноса тепловой энергии в композите с анизотропными включениями в виде трехосных эллипсоидов предложена процедура вычисления компонентов тензора эффективной теплопроводности текстурированного композита с пластинчатыми включениями, представленными сильно сплюснутыми сфероидом, обладающими свойством трансверсальной изотропии относительно оси вращения. Проведены расчеты для разных вариантов конической текстуры композита. Полученные результаты могут быть использованы для оценки эффективных коэффициентов теплопроводности текстурированных композитов, модифицированных наноструктурными элементами (в частности, фрагментами графена). В силу электротепловой аналогии эти результаты применимы при рассмотрении характеристик электропроводности и диэлектрической проницаемости текстурированных композитов (с. 1–13; ил. 3).	
<b>П.А.Белов</b> <b>ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ УТОЧНЕННОЙ ТЕОРИИ МИНДЛИНА</b> .....	<b>14</b>
Строится общее решение уравнений уточненной теории Миндлина. Уточнение заключается в том, что тензор модулей шестого ранга содержит не одиннадцать модулей, как в классической теории Миндлина, а только семь. Ранее было доказано, что такое сокращение неклассических модулей определяется выполнением требования положительной определенности потенциальной энергии. Построенное решение для перемещений представлено в виде суперпозиции трех векторных полей: поля классических перемещений и двух полей когезионных перемещений, которые можно трактовать как неклассические поправки в теории Миндлина к классическому решению для перемещений. Поля когезионных перемещений удовлетворяют обобщенным бигармоническим уравнениям, которые можно представить как произведения двух разных операторов Гельмгольца. В отличие от теории Тупина, в которой поле когезионных перемещений одно, в уточненной теории Миндлина таких когезионных полей два, и они могут быть комплексно-сопряженными. Это приводит к возможности описания качественно иных полей перемещений, чем в классической теории упругости или градиентной теории Тупина. Кроме того, построено решение для поля несовместной дисторсии, которое наряду с фундаментальными функциями, входящими в выражения для перемещений, содержит три дополнительных фундаментальных решения. Эти фундаментальные решения нельзя представить в виде вектора, так как они имеют разную тензорную природу и ранги. Одно решение является псевдоскаляром и определяет потенциальную часть векторного поля спинов (несовместных поворотов). Два других фундаментальных решения определяются независимыми компонентами тензора-девиатора несовместных дисторсий, на который наложено дополнительное требование равенства нулю его дивергенции (с. 14–24).	
<b>В.В.Васильев, С.А.Лурье</b> <b>МОДЕЛЬ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ С МИКРОСТРУКТУРОЙ</b> .....	<b>25</b>
В статье описывается модель сплошной среды с микроструктурой, для которой соотношения классической механики твердого тела, основанные на анализе функций, описывающих поведение среды в окрестности точки, оказываются несправедливыми. Предполагается, что среда состоит из частиц с малыми, но конечными размерами, не позволяющими выделить из нее бесконечно малый элемент, и в связи с этим обобщаются функциональные соотношения, основанные на анализе бесконечно малых величин. Полученные соотношения для скалярных, векторных и тензорных функций предлагается использовать в задачах, решения которых в рамках классической модели среды обладают большими градиентами или являются сингулярными. В качестве примеров рассматриваются задача об одноосном растяжении стержня и сферически симметричная сингулярная задача для модельной среды (с. 25–33; ил. 1).	
<b>С.М. Никитин, А.А. Ташкинов, В.Е. Шавшуков, А.В. Рожков, В.В. Чесноков, Е.А. Паукштитс</b> <b>РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВВЕДЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ЭПОКСИДНЫЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА</b> .....	<b>34</b>
Рассмотрены два варианта модификации эпоксидного полимера, получаемого из смолы ЭД-20, функционализированными углеродными нанотрубками, с преобладанием карбоксильных и гидроксильных функциональных групп. Исследована прочность модифицированных полимерных образцов, получаемых методами «холодной» и термической полимеризации. Выявлена область концентраций для проведения модификации эпоксидного полимера многослойными углеродными нанотрубками с преобладающим содержанием карбоксильных групп соответствующая наибольшему увеличению прочности материала при сжатии. (с. 34–40; ил. 1).	
<b>Д.Л.Старокадомский, Е.М.Пахлов</b> <b>ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ С 10-50 МАС% ПИРОФИЛЛИТА</b> .....	<b>41</b>
Установлено влияние микро- и наночастиц пирогиллита на прочностные характеристики, термостойкость и химстойкость полиэпоксида. Показано, что в целом наполнение приводит к росту химстойкости и термостойкости композита, снижению его усадки. Стойкость к истиранию композита растёт с ростом наполнения. Однако в целом наполнение не приводило к росту основных исследованных характеристик прочности. Прочность при сжатии снижается с ростом наполнения, причём после 10 мас% пирогиллита характер разрушения композита изменяется с пластичного на хрупкий. С наполнением не наблюдается роста прочности при разрыве стеклопластиков на основе композита, а адгезия композита к стеклопластику повышается лишь при определённых наполнениях (10 мас%). Методом дериватографии показано, что наполнение не изменяет температуру 10%-й потери массы, и способствует уменьшению массы выгоревшего вещества пропорционально наполнению. Методом одностороннего нагрева на воздухе установлено, что пирогиллит способствует повышению термостойкости полиэпоксида, особенно при высоких наполнениях на начальных и средних стадиях разложения. С ростом наполнения растёт также стойкость к набуханию в эфире ацетатного полиграфического растворителя. Показана возможность применения пирогиллита как удешевляющего наполнителя для полиэпоксида, способного улучшить некоторые практически важные свойства (стойкость к истиранию, беззасадочность, термостойкость, стойкость к сольвенту) (с. 41–51; ил. 9).	
<b>А.И.Саматадзе, В.А.Никифоров, И.В.Парахин</b> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СВЯЗУЮЩИХ С ДОБАВКАМИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b> .....	<b>52</b>
Установлена возможность создания стеклотекстолитов на основе малотоксичных низковязких кремнийорганических связующих. Изучено влияние типа олигомера, мономеров, катализаторов и стабилизирующих добавок на вязкость, жизнеспособность исходных композиций и выход нерастворимой части, качество, термостабильность, зольность отвержденных композиций. По комплексу технологических и механических свойств, установлен оптимальный состав олигомер-мономерной композиции (с. 52–58).	

## CONTENS

**Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savelyeva I.Y.**

THERMAL CONDUCTIVITY OF THE TEXTURED COMPOSITE WITH ANISOTROPIC

LAMELLAR INCLUSIONS ..... 1

A mathematical model of thermal energy transfer in a composite with anisotropic inclusions in the form of three-axis ellipsoids the procedure of calculation of tensor components of effective thermal conductivity of the textured composite containing lamellar inclusions modelled by strongly flattened spheroids of a transversal isotropy around a relative axis of rotation is suggested. The general model was developed earlier. Calculations for various of conic textures of the composite are carried out. Results obtained can be used for an evaluator of effective coefficients of thermal conductivity of the textured composites modified by nanostructural elements (in particular, by graphene fragments). Due to electrothermal analogy, these results are applicable to consideration of characteristics of electric conductivity and dielectric permeability of textured composites (p. 1-13; fig. 3).

**Belov P.A.**

GENERAL DECISION IN THE SPECIFIED MINDLIN'S THEORY ..... 14

The general decision of the specified Mindlin's theory equations is under construction. Specification is that a tensor of moduli of the sixth rank contains not eleven moduli as in the classical theory of Mindlin but only seven. Earlier it was proved that such reduction of nonclassical moduli is defined by implementation of the requirement of positive definiteness of potential energy. The constructed decision for displacements is presented in the form of superposition of three vector fields: field of classical displacements and two fields of cohesive displacements which can be treated as nonclassical amendments in Mindlin's theory to the classical decision for displacements. Fields of cohesive displacements satisfy to the generalized biharmonic equations which can be presented as multiplication of two different Helmholtz' operators. Unlike Toupin's theory in which there is one field of cohesive displacements, in the specified Mindlin's theory the number of such cohesive fields is two, and they can be complex interfaced. It leads to possibility of the description qualitatively of other fields of displacements, than in the classical theory of elasticity or the gradient theory of Toupin. Besides, the decision for a field of free distortion which along with the fundamental functions entering expressions for displacements contains three additional fundamental decisions is constructed. These fundamental decisions can't be presented in the vector form as they have the different tensor nature and ranks. One decision is a pseudo-scalar and defines potential part of a vector field of spin. Two other fundamental decisions are defined by independent components of a tensor-deviator of free distortions on which the additional requirement of equality to zero its divergence is imposed (p. 14-24).

**Vasiliev V.V., Lurie S.A.**

MODEL OF A SOLID WITH MICROSTRUCTURE ..... 25

The paper is concerned with mathematical simulation of the solid for which the classical equations of solids based on the analysis of the field functions behavior in the vicinity of a point are not valid. The solid is assumed to consist of a system of particles whose small but finite dimensions does not allow us to single out an infinitesimal volume element and to apply directly the classical differential calculus. It is proposed to use the obtained expressions for scalar, vector and tensor functions to study the problems whose solutions obtained within the framework of the classical solid mechanics are characterized with high gradients or are singular. A beam under uniaxial tension and a model singular spherically symmetric problem are considered as examples (p. 25-33; fig. 1).

**S.M. Nikulin, A.A. Tashkinov, V.E. Shavshukov, A.V. Rozhkov, V.V. Chesnokov, E.A. Paukshtis**

A DEVELOPMENT OF THE METHOD OF INTRODUCING

MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES IN EPOXY POLYMERS

TO ENHANCE STRENGTH OF THE MATERIAL ..... 34

Two variants of the modification of epoxy resin obtained from resin ED-20 by functionalized carbon nanotubes with a predominance of the carboxyl and hydroxyl functional groups. The strength of the modified polymer samples obtained by methods of «cold» and «hot» polymerization was measured. Concentration range of multilayer carbon nanotubes with predominant content of carboxyl groups the epoxy resin corresponding to the largest increase in the compressive strength is found. (p. 34-40; fig. 1).

**D.L. Starokadomsky, E.M. Pahlav**

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY POLYMER COMPOSITES

FILLED WITH 10 – 50 WT% OF PYROPHILLITE ..... 41

The prospects of epoxy-polymer with low-cost filling is shown. It is also shown that filling of polyepoxide with micro- and nanoparticles of pyrophyllite leads to an increase in heat resistance and chemical resistance of the composite, and lower its shrinkage. Abrasion resistance increases with an increase in the composite filling. On the other hand, the filling does not increase the strength of the majority of measured characteristics. Compressive strength decreases with increasing content of pyrophyllite, and after 10 wt% the fracture behavior changes from plastic to brittle. There was no increase in tensile strength of GFRP. The composite adhesion to GFRP increases only at certain filling (10 wt%).

Derivatography method shows that filling does not change a temperature of 10% weight loss. The mass of burnt material is proportional to filling content. Onside heating method does show that pyrophyllite enhances thermal stability of the polyepoxide, especially at high filling in the primary and secondary stages of decomposition. Also with increasing filling content increases resistance to swelling in ether-acetate ink-solvent. Thus, pyrophyllite may be used as a low-cost filler for polyepoxide to improve some practically important properties (abrasion resistance, heat resistance, resistance in a solvent) (p. 41-51; fig. 9).

**A.I. Samatadze, V.A. Nikiforov, I.V. Parahin**

A STUDY OF PROPERTIES OF ORANOSILICON BINDERS WITH ADDITIVES AS A BASE FOR

THE DEVELOPMENT OF GFRPS FOR RADIO-ENGINEERING APPLICATIONS ..... 52

A possibility of creating a glass fiber reinforced plastics with low toxic and low viscosity organosilicon binders. The influence of oligomer type, monomers, catalytic systems and stabilizing additives on viscosity, live time, quality, thermostability, ash curing compositions is shown. An optimal of oligomer-monomer composition is suggested (p. 52-58).