

# 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; Сорокина 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. Kohyama, 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.: 7 495 290-34-73

<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. 7. Микроструктура НС титана ВТ1-0 после отжига 870 °С, 52 часа и последующего динамического деформирования: а - светлоскопическое изображение (вставка – картина микродифракции)

Из статьи: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ КРУПНОЗЕРНИСТОГО И НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНА

# 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. Kohyama (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: 7 495 290 34 73  
<http://www.mashizdat.ru>

### Director of journal

M.A. Menzullov

### Making-up

A.A.Menzullov

**Photo on the cover:** Fig. 7. Microstructure of nanostructured titanium VT1-0 after annealing 870 ° C for 52 hours and subsequent dynamic deformation: a - brightfield image (insert - picture microdiffraction)

FEATURES OF STRUCTURE FORMATION AND DEVELOPMENT OF PLASTIC DEFORMATION UNDER DYNAMIC LOADING OF COARSE-GRAINED AND NANOSTRUCTURED TITANIUM

СОДЕРЖАНИЕ

Б.Д.Аннин

НОВЫЙ КЛАСС ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ..... 1

Подход Кельвина, раскрывающий структуру обобщенного закона Гука, применяется к анализу соотношений анизотропной линейной наследственной теории упругости. Предполагается, что собственные состояния тензора наследственных ядер не зависят от времени и совпадают с собственными состояниями тензора анизотропии мгновенных модулей упругости, а наследственные операторы с ядрами в виде дробно-экспоненциальных функций Работнова действуют только на зависящие от времени собственные модули тензора наследственных ядер. Максимальное число независимых наследственных операторов равно шести. Рассмотрены случаи трансверсальной изотропии, ортотропии, кубической симметрии. (с. 1–6).

Л.Р.Вишняков

О МОЛНИЕЗАЩИТЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЯЗАНЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ СЕТОК ..... 7

В статье обсуждается применение вязаных и вязано-паяных проволочных сеток для молниезащиты полимерных композиционных материалов. Сетки используются в качестве поверхностных слоев конструкционных углепластиков, которые нашли применение в авиации и ветроэнергетике. Представлены структура и строение медных вязаных и вязано-паяных сеток, и возможность варьирования их характеристиками для применения в технике (с. 7–15; ил. 8).

Ю.Р. Колобов, В.Н. Перевезенцев, С.С. Манохин, Ю.Е. Кудымова, А.Ю. Колобова, А.М. Брагов, А.Ю. Константинов

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ КРУПНОЗЕРНИСТОГО И НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНА ..... 16

Исследованы механическое поведение и изменения микроструктуры при динамическом нагружении наноструктурированного (НС) и крупнозернистого (КЗ) титана марки ВТ1-0. Обсуждаются особенности развития деформации в исследованных условиях динамического нагружения на различных стадиях. Проводится анализ влияния скорости нагружения на механические свойства изучаемых материалов (с. 16–28; ил. 9).

Fedulov B.N., Safonov A.A., Nguyen N.Q., Lomov S.V.

METHOD FOR COMPUTATIONAL MODELLING OF RESIDUAL STRESSES AND STRESS-INDUCED MANUFACTURING DEFECTS IN VACUUM-INFUSED AUTOMATED PLACEMENT LAMINATES ..... 29

В работе рассматриваются трещиностойкость в присутствии технологических дефектов композитов, изготовленных методом автоматизированной выкладки сухих преформ для последующей пропитки связующим материалом методом инфузии. Рассматривается случай возможного возникновения трещин в результате применения технологического температурного воздействия вследствие дисбаланса коэффициентов температурного расширения связующего и волокон и усадки связующего. Поле деформаций в представительном объеме вокруг дефекта моделируется методом конечных элементов. Параметрический анализ показывает, что при типовых условиях изготовления композитов из эпоксидной смолы, армированных углеволокном, связующее обладает достаточной прочностью для того, чтобы выдержать температурные напряжения и напряжения усадки, создающиеся при отверждении ламината с зазором, однако запас прочности невелик (несколько процентов), и при варьировании температурного режима возможно появление трещин (с. 29–46; ил. 11).

H.L. Gajera and L.M. Manocha

СИНТЕЗ ГРАФЕНА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ НЕСКОЛЬКИХ СЛОЕВ, ПУТЁМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАССЛОЕНИЯ ОКСИДА ГРАФИТА ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ ..... 47

В работе изложен простой метод объемного производства графена, состоящего из нескольких слоев, путём термического расслоения оксида графита при температуре 230°C и нормальном давлении. Расслоение возникает под действием давления, генерируемого в результате разложения оксидных функциональных групп, величина которого оказывается достаточной для отслоения графеновых слоев от оксида графита. Рентгеноструктурный анализ расслоенного материала (EG230) не обнаруживает характеристического пика графита, что подтверждает факт расслоения. Полученный материал охарактеризовали также методами сканирующей (SEM) и просвечивающей (TEM) электронной микроскопии, рамановской спектроскопией, а также BET – измерениями поверхности. Результаты, полученные TEM и SAED (дифракция электронов на выбранной площадке), демонстрируют наличие многослойного графена в материале.

Полученный таким способом графен обладает большей удельной поверхностью (около 220 м<sup>2</sup>/г) (с. 47–57; ил. 9).

П.М. Бажин, А.М. Столин, Н.В. Титов

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ TiC-W<sub>2</sub>C-Si, ПОЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ СВС-ЭЛЕКТРОДАМИ НА ДЕТАЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ..... 58

В работе методом электродуговой наплавки в среде аргона было получено защитное покрытие на основе СВС-электрода TiC-W<sub>2</sub>C-Si на стали 65Г. Установлено, что в процессе нанесения покрытия происходит образование композиционных карбидных частиц, состоящих из чередующихся зерен карбида титана, обогащенных и небогатых вольфрамом, размерами до 100 мкм. Исследована микроструктура и фазовый состав наплавленного слоя, измерено распределение микротвердости от его поверхности до металлической подложки. Показано, что в процессе наплавки наплавленный слой содержит до 70–80% карбидной фазы (с. 58–65; ил. 6).

В.А.Щербаков, В.Т.Телепа, А.В.Щербаков

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЛАВЛЕННОГО КАРБИДА ТИТАНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА ПОД ДАВЛЕНИЕМ ..... 66

Впервые методом электротеплового взрыва (ЭТВ) под давлением получены металлокерамические композиты (керметы) на основе плавленого карбида титана. Химический синтез, структурообразование, плавление и формообразование проведены в одностадийном технологическом режиме с металлической связкой – железо и никель. Возможности метода иллюстрируются примерами получения композитов: TiC-Ni, TiC-Fe. Для получения керметов использовали реакционную смесь, содержащую порошки Ti, Si и Ni. Показано, что в ходе экзотермической реакции формируется конечный продукт, состоящий из зерен TiC, равномерно распределенных в никелевой связке. При получении кермета TiC-Fe материалом металлической связки служила защитная шайба пуансона толщиной 2 мм, которая плавилась от горячего продукта синтеза. В результате проведенной работы получены плотные образцы заданной формы в виде цилиндров и дисков с плотностью 4,4 г/см<sup>3</sup> (TiC+30 вес.%Ni), 5,4 г/см<sup>3</sup> (TiC+30 вес.%Fe). Микротвердость по Виккерсу составляет: TiC+30 вес.% Ni 25,8 ГПа и TiC+30 вес.% Fe 30,5 ГПа (с. 66–76; ил. 8).

## CONTENS

**B.D. Annin**

A NEW CLASS OF CONSTITUTIVE RELATIONS OF LINEAR

ANISOTROPIC HEREDITARY THEORY OF ELASTICITY ..... 1

The Kelvin approach describing the structure of the generalized Hook's law is used to analyze the constitutive relations of linear anisotropic hereditary theory of elasticity. It is assumed that eigenstates of the tensor of kernels of heredity are time independent and coincide with eigenstates of the tensor of anisotropy of instantaneous elastic moduli, and hereditary operators with kernels in the form of fractional exponential Rabotnov functions act only on their own time-dependent modules tensor hereditary kernels. The maximum number of independent genetic operators is six. Cases of transverse isotropy, orthotropic, cubic symmetry considered. (p. 1-6).

**L.R. Vishnyakov**

ON LIGHTNING PROTECTION OF CARBON FIBER REINFORCED

PLASTICS USING KNITTED WIRE MESHES ..... 7

The using of knitted and knitted-soldered wire meshes for lightning protection of polymer based composite materials are discussed. The meshes are useful for top layers of carbon fiber reinforced plastics that are now used in aircraft constructions and wind power production. The structure and architecture of copper knitted and knitted soldered meshes are presented, as well as a possibility of their properties control (p. 7-15; fig. 8).

**Yu.R. Kolobov, V.N. Perevesentsev, S.S. Manokhin, Yu.E. Kudymova, A.Yu. Kolobova, A.M. Bragov, A.Y. Konstantinov**

FEATURES OF STRUCTURE FORMATION AND DEVELOPMENT OF PLASTIC DEFORMATION

UNDER DYNAMIC LOADING OF COARSE-GRAINED AND NANOSTRUCTURED TITANIUM ..... 16

Mechanical behavior and microstructure changes under dynamic loading of nanostructured (NS) and coarse-grained (CG) titanium VT1-0 have been investigated. Features of deformation evolution under the studied conditions under dynamic loading at various stages are discussed. Influence of the loading rate on the mechanical properties of studied materials is analyzed (p. 16-28; fig. 9).

**Fedulov B.N., Safonov A.A., Nguyen N.Q., Lomov S.V.**

METHOD FOR COMPUTATIONAL MODELLING OF RESIDUAL STRESSES AND STRESS-INDUCED

MANUFACTURING DEFECTS IN VACUUM-INFUSED AUTOMATED PLACEMENT LAMINATES ..... 29

In this paper the investigation on crack resistance of vacuum infused composites with manufacturing defects, manufactured of dry fiber preforms fabricated by automated placement (DFP / ATL) processes is reported. The study discusses the case of possible crack initiation resulting from process thermal influences caused by differences in coefficients of thermal expansion (CTE's) of matrix and fiber reinforcement, and by shrinkage of matrix. Strain field within a representative volume surrounding a defect is modelled by finite element method. The results of parametric analysis show that under typical conditions of carbon/epoxy composites fabrication a matrix exhibits a sufficient strength to withstand thermal and shrinkage stresses occurring during cure of laminates containing gaps, however, the margin of safety is relatively small and variations in temperature conditions may result in crack formation (p. 29-46; fig. 11).

**H.L. Gajera and L.M. Manocha**

LOW TEMPERATURE THERMAL EXFOLIATION OF GRAPHITE OXIDE UNDER NORMAL

PRESSURE TO SYNTHESIZE FEW LAYERED GRAPHENE ..... 47

The present research work elucidates a simple method for large scale production of few layered Graphene by low temperature thermal exfoliation at 230°C under normal atmospheric pressure. Exfoliation occurs due to pressure generated from decomposition of oxygen functional groups, good enough to exfoliate Graphene sheets from graphite oxide. XRD of exfoliated material (EG230) showed disappearance of characteristic graphite peak confirming complete exfoliation of graphite oxide to graphene sheet. These were further characterized by SEM, TEM, Raman spectroscopy and for surface area measurement by BET method. The TEM and SAED results exhibited presence of few layered Graphene in the exfoliated graphite oxide. The graphene so prepared exhibited higher specific surface area (about 1280 m<sup>2</sup>/gm) as compared to that of as such graphite oxide (about 220 m<sup>2</sup>/gm) (p. 47-57; fig. 9).

**P.M. Bazhin, A.M. Stolin, N.V. Titov**

TiC-W2C-CO PROTECTIVE LAYERS OBTAINED BY ELECTRO-ARC COATING

BY USING SHS ELECTRODES ON AGRICULTURAL TECHNIQUE ..... 58

A protective coating based on TiC-W2C-Co was applied on steel 65G by electro-arc surfacing in argon. Microstructure and phase composition of the obtained layers were analyzed, microhardness distribution from the surface to the metal was measured. It was found that during the coating process composite carbide particles are formed; they consist of titanium carbide grains of 100 µm in size either enriched or unenriched by tungsten. The applied layer is shown to contain up to 70-80 % of carbide phase (p. 58-65; fig. 6).

**V. A. Shcherbakov, V. T. Telepa, and A. V. Shcherbakov**

FUSED TiC-BASED COMPOSITES BY ELECTROTHERMAL EXPLOSION UNDER PRESSURE ..... 66

Fused TiC-based cermet composites with Fe and Ni binders were prepared by electrothermal explosion (ETE) under pressure in a one-stage process. A potential of this technique was illustrated on the examples of TiC-Ni and TiC-Fe composites. ETE explosion in Ti-C-Ni blends was found to yield a material comprising the TiC grains uniformly distributed over the Ni binder. In order to prevent Fe + C reaction at the stage of synthesis, the TiC-Fe cermet was obtained through impregnation of a melted Fe layer into a porous TiC carcass. Thus prepared cermet disks and cylinders exhibited the following characteristics:  $\rho = 4.4$ , and 5.4 g/cm<sup>3</sup> for TiC, TiC-30 wt % Ni, and TiC-30 wt % Fe, respectively; and microhardness  $H_v = 25.8$  and 30.5 GPa for TiC-30 wt % Ni and TiC-30 wt % Fe, respectively (p. 66-76; fig. 8).