

# Композиты и наноструктуры (Composites and Nanostructures)

## Научно-технический журнал

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

ISSN 1999-7590

Издаётся с 2009 г.

**Учредители:**

ИФТТ РАН

ООО «Научно-техническое предприятие

«Выраж-Центр»

**Редакция:** ИФТТ РАН

Россия, 142432, г. Черноголовка Московской обл.

Тел./Факс: +7(49652)22493

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

Ведущий редактор: Нелли Анатольевна Прокопенко

**Издательство:**

МАШИЗДАТ®

ООО НТП «Выраж-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. 16. Распределение напряжений  $s_{yy}$  в окрестности трещины.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛЬФРАМКОБАЛЬТОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ (стр. 40-49).

**Главный редактор****С.Т. Милейко**

д-р техн. наук, проф., ИФТТ РАН, Россия

**Редакционная коллегия****М.И. Алымов**

чл.-корр. РАН, ИМЕТ РАН, Россия

**Р. А. Андриевский**

д-р физ.-мат. наук, ИПХФ РАН, Россия

**Ю.О. Бахвалов**

д-р техн. наук, ГКНПЦ им. Хруничева, Россия

**С.И. Бредихин**

д-р физ.-мат. наук, ИФТТ РАН, Россия

**Л.Р. Вишняков**

д-р техн. наук, ИПМ НАНУ, Украина

**В. В. Видулин**

проф., ФГУП ОНПП «ТЕХНОЛОГИЯ»

**В.М. Кийко**

канд. техн. наук, ИФТТ РАН, Россия

**Ю.Р. Колобов**

д-р физ.-мат. наук, проф., БелГУ, Россия

**В.И. Костиков**

чл.-корр. РАН, МИСИС, Россия

**А.М. Куперман**

д-р техн. наук, ИХФ РАН им. Н.Н. Семёнова, Россия

**С.А. Лурье**

д-р физ.-мат. наук, ВЦ РАН, Россия

**Б.Е. Победра**

д-р физ.-мат. наук, проф., МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия

**В.Г. Севастьянов**

д-р хим. наук, ИОНХ РАН, Россия

**А.В. Серебряков**

д-р техн. наук, проф., ИФТТ РАН, Россия

**A.R. Bunsell**

проф., Франция

**K. Chawla**

проф., США

**T.W. Chou**

проф., США

**George C. Sin**

проф., США

**Shanyi Du**

проф., Китай

**T. Ishihara**

проф. Япония

**A. Kelly**

проф., Великобритания

**A. Koyama**

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

**M. Singh**

проф., США

**H.D. Wagner**

проф., Израиль

# Composites and Nanostructures

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

ISSN 1999-7590

## Editor-in-Chief:

Professor **S.T. Mileiko**,  
Institute of Solid State Physics of RAS, Russia

## Editorial Board:

Professor **M.I. Alymov**

**A.A. Baikov**

Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Russia

Professor **R. A. Andriyevskii**

Institute of Problem of Chemical Physics of RAS, Russia

Dr **Yu.O. Bakhvalov**

Khrunichev State Research and Production Space Center, Russia

Dr **S.I. Bredikhin**

Institute of Solid State Physics of RAS, Russia

Professor **A.R. Bunsell**

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France

Professor **K. Chawla**

University of Alabama, USA

Professor **T-W. Chou**

University of Delaware, USA

Professor **T. Ishihara**

Japan

Professor **Shanyi Du**

Harbin Institute of Technology, China

Professor **A. Kelly**

University of Cambridge, UK

Dr **V.M. Kiiko**

Institute of Solid State Physics of RAS, Russia

Professor **A. Koyama**

Kyoto University, Japan

Professor **Yu.R. Kolobov**

Belgorod State University, Russia

Professor **V.I. Kostikov**

State Technological University «Moscow Institute of Steel and Alloys»,  
Russia

Professor **W.M. Kriven**

The University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

Dr **A.M. Kuperman**

Institute of Chemical Physics of RAS, Russia

Professor **S.A. Lurie**

Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Russia

Professor **L.M. Manocha**

Sardar Patel University, India

Professor **V.M. Orera**

Instituto de Ciencia de Materiales, Spain

Professor **B.E. Pobyedrya**

Lomonosov Moscow State University, Russia

Professor **H. Schneider**

Institute of Crystallography, University of Koeln, Germany

Professor **K. Schulte**

Technical University Hamburg – Hamburg, Germany

Professor **George C. Sih**

Lehigh University, Bethlehem, USA

Professor **A.V. Serebryakov**

Institute of Solid State Physics of RAS, Russia

Professor **V.G. Sevastyanov**

Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS, Russia

Dr **M. Sing**

NASA Glenn Centre, USA

Professor **V.V. Vikulin**

FSUE ORPE «TEKNOLOGIYA» State Research Centre of the Russian  
Federation, Russia

Dr **Leon Vishnyakov**

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, Ukrain

Professor **H.D. Wagner**

Weizmann Institute of Science, Israel

## Established by:

Solid State Physics Institute

Russian Academy of Sciences

(ISSP RAS)

and

Science Technical Enterprise

«Virag-Centre» LTD

(MASHIZDAT)

## 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, 105264.

Phone: 7 495 780 94 73

<http://www.mashizdat.ru>

## Director of journal

M.A. Menzullov

## Making-up

A.A. Menzullov

*Subscriptions: please apply to one of the partners  
of JSC «MK-Periodica» in your country or to JSC  
«MK-Periodica» directly:*

*39, Gilyarovsky Street, Moscow Russia, 129110;*

*Tel: +7(495) 681-9137, 681-9763;*

*Fax +7(495) 681-3798*

*E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)*

*<http://www.periodicals.ru>*

*(Inquire Komposity i nanostructure)*

**Photo on the cover:** Fig. 1b. Stress distribution.

FABRICATION OF NANOSTRUCTURED TUNGSTEN-COBALT  
HARD METALS OF INCREASED STRENGTH (p. 40-49).

## **СОДЕРЖАНИЕ**

**С.А.Фирстов, В.Ф.Горбань, Н.А.Крапивка, Э.П.Печковский**

Упрочнение и механические свойства литых высокоэнтропийных сплавов ..... 5

На металлических литых многокомпонентных высокоэнтропийных сплавах (в количестве более 20) методами фазовых и структурных исследований, автоматического индентирования при комнатной температуре, кратковременной и длительной горячей твердости, а также одноосного сжатия изучено влияние шихтового состава, фазовых составляющих и структуры на механические свойства в интервале температур 20-900 °С.

В изучаемых одно- и двухфазных сплавах, включающих 5-10 элементов ( $S_{\text{смеш}} = 13,3-19,1$  Дж/моль·К) и представляющих собой твердые растворы замещения всех элементов, присутствующие факторы упрочнения (в первую очередь, композиционный на уровне кристаллической решетки и структурный в виде объемного нанокристаллического состояния) рассматриваются с привлечением тугоплавких металлов (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W). Кроме того, эффекты твердорастворного и наноструктурного упрочнения сплавов рассматриваются в сочетании с упрочнением многокомпонентными интерметаллидными фазами: фаза Лавеса c14 (типа  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{AlCrTi}$ ),  $\sigma$ -фаза (типа  $\text{VFe}$ ,  $\text{CrFe}$ ,  $\text{MoFe}$ ),  $\mu$ -фаза (типа  $\text{Fe}_3\text{Mo}_2$ ,  $\text{Fe}_7\text{W}_6$ ) (с. 5–20; ил. 6).

**Г.А.Форенталь, С.Б.Сапожников**

Оценка упругих и прочностных свойств эпоксидного композита, наполненного наночастицами оксида кремния ..... 21

В работе предложена модель определения предела прочности и модуля упругости эпоксидного композита, дисперсно наполненного наночастицами, использующая теорию коротких волокон механики композиционных материалов. Данная модель учитывает образование при перемешивании вытянутых в виде коротких «волокон» кластеров из наночастиц и описывает немонотонную зависимость предела прочности и нелинейную зависимость модуля упругости эпоксидного нанокompозита от объемной доли наночастиц оксида кремния. Результаты расчета показали, что наполнение эпоксидной смолы наночастицами оксида кремния свыше 5% по объему приводит к уменьшению предела прочности по сравнению с пределом прочности эпоксидной смолы без наполнителя (с. 21-27; ил. 4).

**С.И.Алексеева, М.А.Фроня, И.В.Викторова**

Анализ вязкоупругих свойств полимерных композитов с углеродными нанонаполнителями ..... 28

Представленная работа посвящена экспериментальным исследованиям и математическому моделированию вязкоупругих свойств полимерных нанокompозитов, наполненных разными модификациями углерода: ультрадисперсные алмазы и углеродные нанотрубки. Проведен расчет теоретической кривой ползучести на основе модели наследственного типа. Также выполнено сравнение экспериментальных данных, полученных для полимерных нанокompозитов, с данными для чистого полимерного материала, используемого в качестве матрицы в исследуемых нанокompозитах (с. 28-39 ил. 13).

**М.И.Дворник, Т.Б.Ершова, А.В.Зайцев**

Получение наноструктурированных вольфрамкобальтовых твердых сплавов повышенной прочности ... 40

Получены нанодисперсные порошки и субмикронные вольфрамокобальтовые твердые сплавы на их основе, разработана модель прочности вольфрамокобальтовых твердых сплавов (с. 40-49; ил. 5).

Патенты ..... 50

## CONTENTS

**S.A.Firstov, V.F.Gorban, N.A.Krapivka, E.P.Pechkovsky**

**HARDENING AND MECHANICAL PROPERTIES OF AS-CAST HIGH-ENTROPY ALLOYS ..... 5**

An effect of charge composition, phase constituents and structure on mechanical properties of as-cast metallic multicomponent high-entropy alloys (more than 20 compositions) was investigated. Phase contents, at room temperature, short-term and long-term hot hardness, as well as uniaxial compression characteristics at temperatures 20-900 °C were measured.

In single- and two-phase alloys containing 5-10 elements ( $S_{\text{mix}} = 13,3-19,1$  J/mol·K) in which substitutional solid solution of all elements is formed, the hardening factors (first of all, composite at a level of a crystalline lattice and structural as volumetric nanocrystalline states) are considered with such refractory metals as Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W. Besides solid, solution and nanostructure hardening effects of alloys are studied in combination with multicomponent intermetallic compound hardening due to such phases as Laves phase c14 (such as  $\text{MgZn}_{12}$ ,  $\text{AlCrTi}$ ),  $\sigma$ -phase (such as  $\text{VFe}$ ,  $\text{CrFe}$ ,  $\text{MoFe}$ ),  $\mu$ -phase (such as  $\text{Fe}_3\text{Mo}_2$ ,  $\text{Fe}_7\text{W}_6$ ) (p. 5-20; fig. 6).

**G.A.Forental, S.B.Sapozhnikov**

**EVALUATION OF ELASTIC MODULUS AND STRENGTH OF SILICA**

**NANOPARTICLE'S FILLED EPOXY COMPOSITE .....21**

A model based on the presentation of the silica-nanoparticles/epoxy-matrix composites as a composite containing short fibres is developed. The model gives values of the elastic modulus and strength of the composite. This model takes into account the formation during mixing of elongated clusters of nanoparticles as short fibers and can describe the non-monotone dependence of strength of the epoxy nanocomposite and non-linear dependence of modulus of elasticity on volume fraction of the filler. It is shown that the filling of epoxy resin with silica nanoparticles over 5% yields a decrease in strength in comparison with strength of pure epoxy resin(p. 21-27; fig. 4).

**S.I.Alexeeva, M.A.Fronya, I.V.Viktorova**

**ANALYSIS OF VISCOELASTIC PROPERTIES OF POLYMER BASED COMPOSITES**

**WITH CARBON NANOFILLERS .....28**

An experimental study and modeling of viscous-elastic properties of polymer nanocomposites with nanofillers made of various modifications of carbon, nanotubes and ultradispersed diamonds, were performed. A model of hereditary type was used to calculate creep curve. The comparison of experimental data obtained for polymer nanocomposites with the data for the pure polymer material used as a matrix in the studied nanocomposites was carried out (p. 28–39; fig. 13).

**M.I.Dvornik, T.B.Ershova, A.V.Zaytsev**

**FABRICATION OF NANOSTRUCTURED TUNGSTEN-COBALT HARD ALLOY OF INCREASED STRENGTH .....40**

Tungsten carbide-cobalt powders of nanometers size and bulk submicron materials based on them have been obtained and studied. A strength behavior of such materials is modeled (p.40–49; fig.5).

**Patents ..... 50**