

**Коноплев Борис Георгиевич**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kbg@tti.sfedu.ru.

347900, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371767.

Факультет электроники и приборостроения; декан; д.т.н.; профессор.

**Денисенко Марк Анатольевич**

E-mail: dema.bmfe@gmail.com.

Кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

**Рындин Евгений Адальбертович**

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Тел.: 88634311584.

Ведущий научный сотрудник; д.т.н.; доцент.

**Konoplev Boris Georgievich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kbg@fep.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634371767.

College of Electronics and Electronic Equipment Engineering; Dean; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

**Denisenko Mark Anatolievich**

E-mail: dema.bmfe@gmail.com.

The Department of Electronic Apparatus Design; Postgraduate Student.

**Ryndin Eugeny Adalbertovich**

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

41, Chekhov Street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +78634311584.

Senior Researcher; Dr. of Eng. Sc.; Associate Professor.

УДК 621.002:621.941.2-82.192

**В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова, Д.С. Дуров, А.Д. Захарченко, Т.А. Рыбинская,  
Р.Г. Шаповалов**

**МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*Определены роль и место материаловедческих и конструкторско-технологических направлений повышения работоспособности изделий машиностроения, учитывающих современные достижения в области наноматериалов и нанотехнологий, а также динамический мониторинг станочного оборудования.*

*Нанотехнология; наноматериалы; покрытия; трибосистемы; надежность; динамический мониторинг.*

**V.I. Butenko, L.V. Gusakova, D.S. Durov, A.D. Zakharchenko, T.A. Rybinskaya,  
R.G. Shapovalov**

**MATERIAL-SCIENTIFIC AND CONSTRUCTIONAL-TECHNOLOGICAL  
DIRECTIONS OF INCREASE OF CAPACITY FOR WORK  
OF MACHINE-BUILDING WARES**

*Defined role and place of material-scientific and constructional-technological directions of increase of capacity for work of machine-building wares, taking into account modern achievements in nanomaterials and nanotechnologies, also dynamic monitoring of machine-tool equipment.*

*Nanotechnology; nanomaterials; covers; tribosystems; reliability; dynamic monitoring.*

Современное развитие машиностроения отличается высокой динамичностью и перспективностью в различных его отраслях. При этом резко повышаются требования к рабочим параметрам создаваемых машин, их надежности и работоспособности в различных условиях эксплуатации. Бурными темпами начинает развиваться нанотехнология, создавая все новые и новые наноматериалы, принципиально меняющие представления о материаловедении и технологии обработки конструкционных материалов. В этих условиях становится весьма актуальным разработка материаловедческих и конструкторско-технологических мероприятий, направленных на повышение работоспособности изделий машиностроения.

Известно, что во многих технологических процессах, в том числе используемых в атомной и авиакосмической технике, в двигателестроении и многих других отраслях машиностроения, эксплуатация деталей протекает в экстремальных условиях при высоких давлениях, температурах и воздействии агрессивных сред. В таких условиях весьма перспективным может стать использование различных нанотехнологий упрочнения поверхностей деталей машин. При этом целесообразность выбора того или иного способа поверхностного упрочнения детали зависит от ряда факторов, среди которых важнейшими являются физико-механические свойства материала детали, форма и геометрические размеры обрабатываемых поверхностей, наличие на предприятии того или иного типа оборудования.

Исследованиями установлено, что если подвергнуть поверхность изделия из железоуглеродистого сплава упрочняющей обработке методом наноструктурирования, то в обрабатываемом материале происходит локальная перестройка кристаллической решетки с образованием кластерного композита, состоящего из собственных атомов, но имеющего другую кристаллическую симметрию. Создается радиационно-индуцированное состояние материала поверхностного слоя детали, при котором в окрестности внедренных радиационных точечных дефектов образуются малые кластеры, армирующие основную матрицу. Формирование такой нанокластерной морфологии сопровождается существенными изменениями формы рентгendifракционных линий, что может служить тестовым признаком появления кластерного композита и методически удобным способом регистрации области его существования на шкале радиационных параметров. Такая технология упрочнения конструкционных материалов может быть использована для защиты поверхностей деталей из титановых и высоколегированных сплавов, применяемых при изготовлении лопаток турбин, заслонок и других деталей, эксплуатируемых при температуре до 1 000 °С.

В виде смазочных высокодисперсных твердых добавок наноматериалы могут найти применение для повышения работоспособности подшипников скольжения, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Наибольшее распространение в качестве таких твердых добавок получили слоистые наполнители кристаллической структуры: графит, дисульфид молибдена, нитрид бора. Особенно эффективным

оказалось нанесение на трущиеся поверхности контактируемых деталей керамикоподобных покрытий и их модифицирование наноразмерными компонентами различной природы, например, углеродными наномодификаторами – фуллеренами  $C_{60}$  и  $C_{70}$ . Установлено, что применение указанных фуллеренов особенно перспективно для решения различных триботехнических задач, связанных с формированием на поверхностях деталей защитных пленок, обладающих низким коэффициентом трения.

В практике машиностроения хорошо зарекомендовали себя тонкопленочные покрытия на основе алмазо- и графитоподобных углеродных фаз, модифицированных различными металлическими (в частности, медными) добавками. Получаемые способом импульсного вакуумно-дугового осаждения углеродные пленки-покрытия толщиной 0,01–0,05 мкм с присутствующей в них алмазоподобной фракцией содержат от 2 до 6 ат. % меди способствуют существенному повышению несущей способности поверхностей деталей трибосистем. Установлено, что применение наноалмазов улучшает физико-механические свойства гидродинамических пленок масел, в структуре которых они находятся, благодаря двум основополагающим свойствам – малому размеру (высокой удельной поверхности и степени дисперсности в среде) и высокой поверхностной энергии. В то же время наноалмазные частицы, обладающие определенной режущей способностью в режиме субмикрорезания, играют особо активную роль в процессе приработки и «залечивания» микродефектов сопрягаемых поверхностей деталей, в том числе вновь образованных. Это процесс практически заканчивается при достижении определенной фактической площади контакта, при которой реализуется полужидкостный или жидкостный режим смазывания.

Образующиеся в зоне контакта взаимодействующих материалов кластерные наноструктуры [1] обладают рядом свойств, позволяющих по-новому решить ряд практических задач в нанотрибологии, особенно для трибосопряжений, находящихся в экстремальных условиях эксплуатации. Так, исследования состояния и топографии поверхности трения, а также размеров, формы и расположения кластерных наноструктур методами ОЖЕ-спектроскопии, FTIR-спектроскопии и атомно-силовой микроскопии с использованием зондового микроскопа Solver P47H и растрового электронного микроскопа Quanta 200 позволили выявить эффект «нанотрибологической ямы», при котором для каждой пары трения и условий эксплуатации существует вполне определенная оптимальная толщина смазочного слоя, обеспечивающая минимальный коэффициент трения взаимодействующих материалов. Этот эффект особенно важно учитывать при использовании в тяжело нагруженных подшипниках скольжения и опорах в качестве вязкоупругой смазки легкоплавкие сплавы, например сплав Вуда. Одновременно установлено, что эффект «нанотрибологической ямы» усиливается, если образующиеся в зоне контакта наноструктуры по своему фазовому составу соответствуют эвтектическим структурам взаимодействующих материалов. При этом толщина эвтектического слоя должна быть такой, чтобы обеспечивала максимальную сплошность образующихся при заданных условиях эксплуатации кластерных наноструктур. Получены следующие эмпирические зависимости, позволяющие установить связь толщины наносимого эвтектического слоя  $H_c$  от условий эксплуатации ( $p$ ,  $V_{ск}$ ,  $\Theta$ ) и начального состояния поверхностного слоя детали ( $R_a$ ,  $\rho_{нач}$ , величины и знака технологических напряжений  $\sigma_{ост}$ ):

- ♦ сплав Pb – Sb, диапазоны изменения условий эксплуатации –  $p=1,5\text{--}4,5$  МПа;  $V_{ск}=0,1\text{--}0,5$  м/с;  $\Theta=200\text{--}600$  °С

$$H_c = 2,31 \cdot 10^{-3} p^{1,28} V_{ск}^{0,75} \Theta^{0,17} R_a^{0,64} (\rho_{нач} \cdot 10^{-10})^{0,41} \times \\ \times (+\sigma_{ост} \cdot 10^{-2})^{0,36} \vee (-\sigma_{ост} \cdot 10^{-2})^{0,57}, \text{ мм};$$

- ♦ сплав Sn – Zn, диапазон изменения условий эксплуатации –  $p=2,0-5,0$  МПа;  $V_{ск}=0,5-1,2$  м/с;  $\Theta=150-500$  °С.

$$H_c = 3,08 \cdot 10^{-3} p^{2,47} V_{ск}^{0,63} \Theta^{0,19} R_a^{0,54} (\rho_{нач} \cdot 10^{-10})^{0,39} \times \\ \times (+\sigma_{осм} \cdot 10^{-2})^{0,39} \vee (-\sigma_{осм} \cdot 10^{-2})^{0,56}, \text{ мм.}$$

Приведенные эмпирические зависимости были апробированы в производственных условиях при разработке конструкторско-технологических мероприятий по повышению надежности металлургического и металлообрабатывающего оборудования. Подконтрольная промышленная эксплуатация указанных изделий показала, что нанесение на поверхности тяжело нагруженных деталей узлов трения различных покрытий эвтектического состава позволяет в 1,5–2 раза повысить их технический ресурс и довести вероятность безотказной работы за наработку 1 000 час. до 0,98.

Обеспечение необходимого уровня надежности изделия машиностроения может быть достигнуто многими техническими приемами, реализация каждого из которых требует определенных затрат. В результате возникает задача технико-экономической надежности машины или механизма и определение затрат на их изготовление. Предложен критерий технического уровня изделия  $K$ , по значению которого могут назначаться конструктивные и технологические мероприятия, обеспечивающие требуемые показатели надежности, качества и других характеристик машины или механизма:

$$K = P(t) \frac{T_{\max}}{m},$$

где  $P(t)$  – требуемая вероятность безотказной работы изделия;

$T_{\max}$  – максимальный крутящий момент;

$m$  – масса изделия.

В качестве технологических мероприятий по обеспечению требуемых показателей надежности и качества изделий машиностроения следует считать совершенствование процессов шлифования деталей, изготавливаемых из низкоуглеродистых легированных сталей и хромоникелевых сплавов. При этом чрезвычайно важным является изучение энергетического состояния материала поверхностного слоя обрабатываемой детали и выявление склонности его к накоплению скрытой энергии деформирования. Этого можно достигнуть при исследовании эпюр температурных полей, полученных при различных видах шлифования, путем их сопоставления, определения стабилизационного участка распространения тепла и состояния показателей качества материала поверхностного слоя детали, от которых зависит возможность и эффективность управления нанотрибологическими характеристиками в зоне контакта взаимодействующих материалов трибосистем.

Весьма перспективным направлением создания в зоне контакта взаимодействующих материалов трибосистем управляемых кластерных наноструктур является использование магнитного поля и ультразвуковых колебаний [2,3]. С физической точки зрения основной эффект в результате действия магнитного поля на магнито-восприимчивые материалы связан со способностью его изменять морфологию продуктов трения, их структуру и фазовый состав. Вследствие этого представляет большой практический интерес использование внешнего магнитного поля для изменения ферромагнитных свойств микрообъемов материалов поверхностных слоев контактирующих в трибосистемах деталей из сталей и сплавов. Предполагается, что в условиях высоких давлений, скоростей скольжения и температур эксплуата-

ции формирование наноструктурных слоев в контактной зоне взаимодействия материалов трибосистем под влиянием внешнего магнитного поля происходит самопроизвольное возникновение флуктуаций дальнего ферромагнитного порядка («рои» спинов). В общем случае «рои» спинов представляют собой малые (однодоменные) ферромагнитные области, периодически возникающие и аннигилирующие по статическим законам. Эти области соизмеримы с образующимися наноструктурами, представляют их ансамбли и называются ферромагнитными нанокластерами.

Предварительные испытания показали, что создание в зоне контакта взаимодействующих материалов трибосистемы переменного магнитного поля напряженностью 50 кА/м позволяет почти в 2 раза снизить интенсивность изнашивания поверхностного слоя деталей из жаропрочного сплава ЖС26ВСНК.

Влияние ультразвукового поля на состояние материала в зоне его действия связано, с одной стороны, увеличением числа дислокаций под действием знакопеременных напряжений, что способствует упрочнению материала, с другой стороны – увеличению их подвижности, т.е. приводит к разупрочнению металла. Исследования показывают, что ультразвуковые колебания приводят к измельчению наноструктур в зоне контакта взаимодействующих материалов и снижению интенсивности их изнашивания. Однако наиболее ощутимо это проявляется только в определенных диапазонах частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний, характерных для каждого сочетания взаимодействующих материалов.

К сожалению, широкое применение способа повышения износостойкости материалов трибосистем путем наложения на кону контактирования ультразвуковых колебаний сдерживается необходимостью иметь специальный мобильный генератор ультразвуковых колебаний. Тем не менее уже сейчас можно определить области машиностроения и конструкции изделий, в которых возможно успешное применение ультразвука. К ним в первую очередь относятся узлы трения стационарных газотурбинных установок, прокатных станов, технологического оборудования атомного машиностроения, а также стационарных робототехнических установок, к которым предъявляются высокие требования к обеспечению и поддержанию точности позиционирования рабочих органов.



Рис. 1. Схема динамического мониторинга роботизированного металлорежущего станка

Исследования показывают [4,5], что качественные показатели поверхностного слоя деталей во многом определяются состоянием металлообрабатывающего оборудования и систем, связанных с ним. В связи с этим разработана система динамического мониторинга роботизированных станков в автоматизированном производстве, схема которой представлена на (рис. 1). Доказано, что применение в практике современной металлообработки предлагаемого динамического мониторинга может явиться основой повышения эффективности использования не только эксплуатируемого станочного оборудования на конкретно действующем предприятии машиностроения, но и вновь создаваемых станков и промышленных роботов для них на основе разработки мероприятий по целенаправленной коррекции динамического воздействия связанных процессом резания формообразующих подсистем. При этом быстрота и гибкость предложенных алгоритмов динамического мониторинга позволяют принимать управляющие решения по обеспечению требуемых показателей качества обрабатываемых деталей в режиме прямого управления роботизированными станками без остановки всего производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бутенко В.И.* Научные основы нанотрибологии. – Таганрог: Изд-во ГТИ ЮФУ, 2010. – 275 с.
2. *Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н.* Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. – М.: Машиностроение, 1987. – 254 с.
3. *Киселев Е.С.* Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: Учебное пособие. – Ульяновск: Изд-во УГТУ, 2003. – 186 с.
4. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
5. *Бутенко В.И., Захарченко А.Д., Гусакова Л.В., Шаповалов Р.Г., Подножкина В.Н.* Перспективы управления эксплуатационными свойствами деталей машин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 164-171.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Гусев.

**Бутенко Виктор Иванович**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.  
E-mail: mkk@egf.tsure.ru.  
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.  
Тел.: 88634376122.  
Кафедра механики; профессор.

**Гусакова Лиана Валерьевна**

Кафедра механики; ассистент.

**Дуров Дмитрий Сергеевич**

Кафедра механики; заведующий кафедрой.

**Захарченко Анатолий Данилович**

Кафедра механики; ведущий инженер.

**Рыбинская Татьяна Анатольевна**

Кафедра механики; ассистент.

**Шаповалов Роман Григорьевич**

Кафедра механики; доцент.

**Butenko Victor Ivanovich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: mkk@egf.tsure.ru.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371622.

The Department of the Mechanics; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

**Gusakova Liana Valeryevna**

The Department of the Mechanics; Assistant.

**Durov Dmitry Sergeevich**

The Department of Mechanics; Head the Department.

**Zakharchenko Anatoly Danilovich**

The Department of Mechanics; Leading Engineer.

**Rybinskaya Tatyana Anatolyevna**

The Department of Mechanics; Assistant.

**Shapovalov Roman Grigoryevich**

The Department of the Mechanics; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

УДК 539.217.5:546.28

**Т.Н. Назарова, В.В. Петров, О.В. Заблуда, Г.Э. Яловега,  
В.А. Смирнов, Н.И. Сербу**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СОСТАВА  $\text{SiO}_2\text{CuO}_x$ \***

*Проведены исследования нанокompозитных материалов состава  $\text{SiO}_2\text{CuO}_x$ , синтезированных золь-гель методом в виде пленок. Методом фотоэлектронной спектроскопии изучены фазовый состав и оксидное состояние меди. Показано, что медь в пленках находится, преимущественно, в виде оксидов  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$  с размерами кристаллитов 30-40 нм. Методами атомно-силовой и электронной микроскопии изучены морфология поверхности и структура образцов в зависимости от содержания меди. Показано, что при концентрациях меди 3, 5, 7 масс. % пленки имеют пористую структуру. Изучены электрофизические свойства, определяющие их полупроводниковую природу. Рассмотрены энергия активации и ширина запрещенной зоны*

*Материал; физико-химические свойства; электрофизические свойства.*

**T.N. Nazarova, V.V. Petrov, O.V. Zabluda, G.E. Yalovega,  
V.A. Smirnov, N.I. Serbu**

**RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL, ELECTROPHYSICAL  
PROPERTIES  $\text{SiO}_2\text{CuO}_x$  MATERIALS**

*Researches of nanocomposite  $\text{SiO}_2\text{CuO}_x$  materials, synthesized by sol-gel method were carried out. To investigate the phase composition and oxidation states of the copper the method photoelectron spectroscopy has been applied. In the films, presence of  $\text{CuO}$  and  $\text{Cu}_2\text{O}$  phases with the size of crystallite phase about 30-40 nm was found. Surface morphology and the films structure depending on the copper concentration were investigated by means of atom-force and electron*

---

\* Данная работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», государственный контракт № 02.740.11.0122).