

Раздел II. Энергетика, механика

УДК 621.002:621.941.2-82.192

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

НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрены современные эффективные направления и технологии повышения работоспособности деталей машин, включая создание саморегулирующихся и самоуправляемых структур, покрытий и систем в поверхностном слое деталей. Определены перспективы применения нанотехнологий для повышения стойкости режущего инструмента и показаны возможности повышения долговечности деталей трибосистем. Сформулированы новые подходы к диагностике и управлению качеством деталей при механической обработке и созданию систем автоматизированного проектирования технологической подготовки производства.

Нанотехнологии; структуры; системы; детали; работоспособность; долговечность; диагностика; качество; обработка.

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

DIRECTIONS AND TECHNOLOGIES OF INCREASE OF SERVICEABILITY OF DETAILS OF MACHINES

The modern effective directions and technologies of increase of serviceability of details of machines, including creation self-regulated and self-controlled structures, coverings and systems in a superficial layer of details are considered. The prospects of application of nanotechnologies for increase of stability of the cutting tool are determined and the opportunities of increase of durability of details of tribosystems are shown. The new approaches to diagnostics and quality management of details are formulated at machining and creation of systems of the automated designing of technological preparation of manufacture.

Nanotechnologies; structure; system; details; serviceability; durability; diagnostics; quality; processing.

В условиях рыночной экономики успех промышленных предприятий и государства в целом определяется конкурентоспособностью выпускаемых изделий, которая в значительной мере зависит от ее качества. Именно поэтому разработке новых эффективных направлений и технологий повышения работоспособности деталей машин в настоящее время уделяется большое внимание, так как модернизация машиностроительного комплекса страны представляет собой сложнейшую научно-техническую и производственно-экономическую проблему, решить которую можно лишь на научных основах технологии машиностроения.

Известно, что высокая надёжность и работоспособность различных машин определяется высокой несущей способностью и износостойкостью поверхностного слоя деталей. От структуры, состояния и свойств материала поверхностного слоя зависит способность различных трибосистем машин, механизмов и устройств длительно и эффективно выполнять заданные им функции. В связи с этим в совре-

менной металлообработке находят применение создание саморегулирующихся и самоуправляемых структур материалов поверхностного слоя деталей за счёт воздействия на них высокотемпературных потоков энергии (лазерного облучения, электрической искры или управляемой сканируемой плазменной дуги). Как показывают исследования [1], при таком кратковременном воздействии на поверхности детали образуется аморфная структура, обладающая способностью проникать в междо-сталическое пространство и изменять коэффициент трения в зоне контакта взаимодействующих поверхностей деталей в зависимости от условий эксплуатации.

Для оценки склонности материала детали к образованию аморфной структуры может быть использован подход Дэвиса Ульмана [1]. Предполагается, что охлаждение жидкого металла происходит непрерывно с определённой скоростью и что образующийся зародыш аморфной структуры имеет такой же состав, что и состав жидкости. Тогда, используя полученное Колмогоровым выражение для определения объёмной доли зародышей X , можно получить следующую формулу для расчёта требуемого времени t воздействия на металл высокотемпературных потоков энергии:

$$t = (\ln(1 - X)/(-\pi I_3 v_3^3/3))^{1/4}, \quad (1)$$

где I_3 – частота образования зародышей аморфной структуры в материале поверхностного слоя детали; v_3 – скорость роста зародышей.

Соотношение (1) выражает функциональную связь между параметрами так называемой «ТВП-диаграммы» (температура-время-превращение), характерной для получаемых аморфных структур. Из анализа этого соотношения следует, что если известна температурная зависимость изменения вязкости металла от скорости охлаждения ниже точки температуры плавления, то можно для этого металла найти зависимость времени t , необходимого для затвердевания заданной доли объёма металла X от температуры его переохлаждения при образовании зародышей аморфной структуры. Для определения критической скорости охлаждения металла $(V_{охл})_{кр}$ в этом случае можно воспользоваться следующей формулой:

$$(V_{охл})_{кр} = (\Theta_{пл} - \Theta_0)t_0, \quad (2)$$

где $\Theta_{пл}$ – температура плавления металла обрабатываемой детали; Θ_0 – температура выступа на «ТВП-диаграмме»; t_0 – время, при котором возможна аморфизация металла.

Весьма перспективным направлением повышения работоспособности деталей машин может стать учёт процессов энерго- и массопереноса в зоне контактного взаимодействия материалов при трении [1]. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований показали, что в случае комбинированной обработки поверхностей деталей машин с использованием высокотемпературных потоков следует руководствоваться следующим соотношением:

$$\Delta E/Q = f(V, M, p \cdot V_{ск}, C, S) \neq const, \quad (3)$$

где ΔE – количество поглощённой материалом поверхностного слоя детали энергии; Q – количество выделившегося в зоне контакта взаимодействующих материалов энергии; V – условия контактирования взаимодействующих материалов; M – физико-механические свойства взаимодействующих материалов; $p \cdot V_{ск}$ – параметр трения для деталей трибосистем; C – физико-химические характеристики используемых в зоне контакта сред; S – вероятный путь трения (для материалов деталей трибосистем).

Как показывают исследования, соотношение (3) между ΔE и Q весьма существенно зависит от деформационных характеристик материалов деталей машин, а влияние параметров V , M , $p \cdot V_{ск}$, C , и S на ΔE и Q неоднозначно даже для одних и тех же по химическому составу контактируемых материалов и определяется их начальным состоянием [1, 2], что должно учитываться при разработке технологических и эксплуатационных путей повышения работоспособности деталей машин.

С позиции структурной теории конструкционной прочности металлических материалов для создания саморегулирующихся и самоуправляемых структур в поверхностном слое деталей трибосистем могут быть использованы различные методы упрочнения, в том числе наноструктурирование материала воздействием на него низкотемпературной плазмы комбинированного разряда [2]. Особенностью данной технологии является то, что в ней взаимодействие активных частиц плазмы с материалом обрабатываемой поверхности детали вызывает протекание различных гетерогенных процессов, приводящих к формированию мелкодисперсного слоя толщиной до 40 мкм, состоящего из равномерно распределённых у поверхности карбидов размером 30–80 нм. Толщина слоя и размеры карбидов могут регулироваться в зависимости от подаваемой мощности и времени обработки.

Выполненные аналитические исследования напряжённо-деформированного состояния материала поверхностного слоя деталей трибосистем [1–3] и экспериментальные исследования, выполненные на электронографе ВЭИМ-1М в институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, показали, что уменьшение толщины создаваемого на поверхности детали слоя приводит к структурированию нанесённого материала. Был установлен эффект «нанотрибологической ямы», сущность которого сводится к следующему: для каждого сформированного в процессе обработки или эксплуатации на поверхности детали трибосистемы слоя, покрытия или системы при заданных условиях трения существует наноразмерная толщина $h_{пер}$ структурно-перестроенного материала, при которой обеспечивается минимально возможный для сопряжения коэффициент трения.

Используя метод многофакторного планирования эксперимента типа 2^4 , были получены следующие уравнения регрессий для определения наноразмерной толщины слоя $h_{пер}$:

– для металлополимерного слоя ($p = 0,5 - 2,5$ МПа; $V_{ск} = 0,3 - 1,0$ м/с; $\Theta = 20 - 80$ °С):

$$h_{пер} = 1,375 \sigma_v^{0,487} p^{1,123} V_{ск}^{-0,274} \Theta^{0,732},$$

– для легкоплавкого сплава Вуда ($p = 0,8 - 3,0$ МПа; $V_{ск} = 0,5 - 1,5$ м/с; $\Theta = 80 - 200$ °С):

$$h_{пер} = 1,025 HB_c^{0,284} p^{1,428} V_{ск}^{-0,116} \Theta^{0,635},$$

– для системы «легкоплавкий сплав-полимер-графит» ($p = 1,5 - 5,0$ МПа; $V_{ск} = 0,5 - 2,0$ м/с; $\Theta = 50 - 120$ °С):

$$h_{пер} = 1,012 HB_c^{0,318} p^{0,835} V_{ск}^{-0,276} \Theta^{0,509},$$

где p – давление в контактной зоне взаимодействующих поверхностей деталей; $V_{ск}$ – скорость скольжения взаимодействующих поверхностей деталей; Θ – температура в зоне контакта взаимодействующих поверхностей деталей; σ_v – показатель высокоэластичной деформации применяемого в качестве покрытия материала; HB_c – микротвёрдость системы, определяемая её составом.

Предварительно выполненные исследования показали, что с конструкторской и технологической точек зрения учёт эффекта «нанотрибологической ямы» наиболее целесообразен для повышения работоспособности деталей тяжело нагруженных трибосистем, работающих в экстремальных условиях [1, 4], а также в металлообработке для повышения стойкости инструмента путем нанесения на их рабочие поверхности износостойких и антифрикционных покрытий [5–7]. Такие покрытия характеризуются сверхвысокой твёрдостью (более 40 ГПа) благодаря малому размеру зёрен (2–5 нм) и прочным энергиям связи на границах раздела, а также относительно низким коэффициентом трения скольжения и высокой износостойкостью.

Анализ выполненных исследований [1–3, 8] и данные литературных источников дают основание выделить следующие направления повышения работоспособности деталей машин путём обеспечения требуемых нанотрибологических характеристик контактирующих поверхностей:

- ◆ нивелирование поверхности, в том числе за счёт применения комбинированных методов обработки деталей и нанесения антифрикционных покрытий;
- ◆ создание между контактирующими поверхностями деталей трибосистемы разделительного смазочного слоя, в том числе многослойного;
- ◆ обеспечение в зоне контакта взаимодействующих материалов условий избирательного переноса, использующих достижения трибохимии;
- ◆ трибоэкрамирование контактирующих поверхностей деталей трибосистем путём модифицирования материала поверхностного слоя или формирования на нём специальных структур с низкими коэффициентами трения.

В практике современного машиностроения трибоэкрамирование контактирующих поверхностей деталей трибосистем технологически может быть осуществлено, например, формированием в процессе шлифования в поверхностном слое взаимодействующих материалов соединений в виде йодидов железа толщиной, обеспечивающей проявление эффекта «нанотрибологической ямы».

Как показали исследования с использованием FTIR-спектроскопии и ОЖЕ-спектроскопии, толщина образующейся на поверхности слоя йодидов металла $H_{ид.м}$ составляет от 10 до 100 Å. Установлено, что её величина зависит от температуры в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали, которая, в свою очередь, определяется физико-механическими свойствами шлифуемого материала, используемого абразивного инструмента и принятых режимов обработки. Так, при круглом шлифовании деталей из железоуглеродистых сплавов с использованием в качестве СОТС «Аквол-5» и стандартного круга ПП 400х40х127 из электрокорунда белого 25А зернистости 25 на керамической связке К1, вращающегося со скоростью $V_{кр} = 30,5$ м/с и импрегнированного диоксидом хрома, получена следующая эмпирическая формула для определения $H_{ид.м}$:

$$H_{ид.м} = 2,87 \cdot 10^{-2} \sigma_m^{0,236} V_\delta^{0,304} S_{np}^{1,017} S_{ep}^{0,533}, \text{ нм},$$

где σ_m – предел текучести материала обрабатываемой детали, МПа; V_δ – скорость вращения детали, м/с; S_{np} – продольная подача шлифовального круга, мм/с; S_{ep} – подача врезания, мм/дв.ход.

На установках для испытания материалов на истирание [1–4] исследовалась эффективность трибоэкрамирования поверхностей деталей трибосистем, эксплуатируемых при различных внешних температурах. Было установлено, что в диапазоне температур $(100 - 600)^\circ \text{C}$ коэффициент трения в контакте деталей трибосистемы из сплава 45Х25Н20С2А и стали 20ХН2МА, имеющих после шлифования слой йодида металлов $H_{ид.м} = (50-60)$ Å, практически не изменяется и составляет 0,08 при давлении $p = (0,1-0,8)$ МПа и скорости скольжения $V_{ск} = (0,1 - 0,3)$ м/с. Этот факт свидетельствует о том, что образующийся в процессе шлифования на поверхности детали трибосистемы слой из йодидов металлов указанной толщины обладает не только низким коэффициентом трения, но и высокой температурной устойчивостью. Одновременно было замечено, что с увеличением давления p почти пропорционально возрастает и требуемая толщина слоя йодидов металлов $H_{ид.м}$, обеспечивающая наименьший коэффициент трения.

Важную роль в решении проблемы повышения работоспособности деталей машин имеет разработка и использование на предприятиях машиностроения системы автоматизированного проектирования технологической подготовки производства (САПР ТПП). Как показывает практика, эффективность использования в

металлообработке САПР ТПП во многом зависит от того, насколько удачно разработана и включена в систему диагностика и управление качеством поверхностей деталей. В этом отношении весьма перспективным является разработка метода диагностики энергетического состояния обрабатываемой детали, объединяющего принципы технологической наследственности и использующего индивидуальные физические свойства материала. В настоящее время разработана структурно-аналитическая модель поверхностного слоя обрабатываемой детали, описывающая основные изменения энергетических и физических показателей поверхностного слоя при различных программах его обработки и нагружения, которая в режиме реального времени обеспечивает требуемые эксплуатационные показатели детали в полном соответствии с принципом единства обработки и эксплуатации деталей трибосистем [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бутенко В.И.* Управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 385 с.
2. *Бутенко В.И.* Контактное взаимодействие материалов при трении и резании. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 245 с.
3. *Бутенко В.И.* Научные основы нанотрибологии. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 275 с.
4. *Бутенко В.И.* Структура и свойства материалов в экстремальных условиях эксплуатации. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 264 с.
5. *Бутенко В.И., Подножкин Г.В.* Повышение стойкости спиральных свёрл лазерной обработкой никель-фосфорных покрытий // Студенческий научно-технич. журнал «Инженер». – 2011. – № 12. – С. 28-31.
6. *Карбасова Ю.С.* Новые материалы. – М.: Изд-во МИСИС, 2002. – 736 с.
7. *Штанский Д.В., Левашов Е.А., Шевейко А.Н.* Оптимизация параметров вакуумного реакционного осаждения сверхтвёрдых Ti-Si-B-N покрытий // Электронные, ионные и плазменные технологии: Справочник. Инженерный журнал. – 2000. – № 1. – С. 17-20.
8. *Бутенко В.И., Гусакова Л.В., Дуров Д.С., Захарченко А.Д., Рыбинская Т.А., Шаповалов Р.Г.* Металловедческие и конструкторско-технологические направления повышения работоспособности изделий машиностроения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1 (114). – С. 97-103.
9. *Сулов А.Г.* Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки для повышения качества поверхностного слоя // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 10. – С. 22-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Михайлов.

Бутенко Виктор Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: mkk@egf.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634376122; кафедра механики; профессор.

Гусакова Лиана Валерьевна – e-mail: mkk@egf.tsure.ru; кафедра механики; ассистент.

Дуров Дмитрий Сергеевич – e-mail: mkk@egf.tsure.ru; кафедра механики; зав. кафедрой.

Захарченко Анатолий Данилович – e-mail: mkk@egf.tsure.ru; кафедра механики; доцент.

Подножкина Валентина Николаевна – e-mail: mkk@egf.tsure.ru; кафедра механики; старший преподаватель.

Рыбинская Татьяна Анатольевна – e-mail: mkk@egf.tsure.ru; кафедра механики; ассистент.

Шаповалов Роман Григорьевич – e-mail: mkk@egf.tsure.ru; кафедра механики; доцент.

Фоменко Елена Сергеевна – e-mail: mkk@egf.tsure.ru; кафедра механики; инженер.

Butenko Victor Ivanovich – 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 Valerievna – the department of the mechanics; assistant.

Durov Dmitry Sergeevich – the department of the mechanics; head the department.

Zakharchenko Anatoly Danilovich – the department of the mechanics; associate professor.

Podnozhkina Valentina Nikolayevna – the department of the mechanics; senior lecturer.

Rybinskaya Tatyana Anatolyevna – the department of the mechanics; assistant.

Shapovalov Roman Grigoryevich – the department of the mechanics; associate professor.

Fomenko Yelena Sergeevna – the department of the mechanics; engineer.

УДК.744 (075.8)

В.В. Орехов, И.Б. Аббасов

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН САМОЛЕТА-АМФИБИИ

Работа посвящена концептуальному дизайну нового самолета-амфибии. Представлен краткий обзор аналогов прототипа различных производителей, описаны их технические характеристики. Для поиска вариантов обвода фюзеляжа использованы принципы бионики. Проведен анализ природных форм биологических объектов прибрежной водной среды. На основе анализа бионических форм предложены новые концептуальные визуально-графические решения самолета-амфибии. Прототипы обводов фюзеляжа разработаны в виде эскизных проектов. Приведены краткие теоретические характеристики прототипа самолета-амфибии. Представлены эскизы ортогональных проекций и трехмерной тонированной модели разработанной концепции.

Концептуальный дизайн; самолет-амфибия; бионика; природные формы; обвод фюзеляжа; тонированная модель.

V.V. Orekhov, I.B. Abbasov

CONCEPTUAL DESIGN OF AMPHIBIAN

Work is devoted conceptual design of new amphibian. The short review of analogues various manufacturers is presented, their technical characteristics are described. For search variants of fuselage contour of bionics principles are used. The analysis of natural forms of biological objects the coastal water environment is carried out. On the basis of the analysis bionics forms new conceptual visually-graphic decisions of amphibian are offered. Prototypes of fuselage contours are developed in the form of sketches. Short theoretical characteristics prototype of amphibian are resulted. Sketches of orthogonal projections and three-dimensional shaded are presented model of the developed concept.

Conceptual design; amphibian; bionics; natural forms; fuselage contour; shaded model.

Авиация, так же как и много лет назад, продолжает играть важную роль в мировой экономике. Несмотря на повышение цен на топливо, количество рейсов, совершаемых воздушными судами, не только не сокращается, но и растет. Потребность в быстром и относительно дешевом виде транспорта существует всегда. Это потребность может возникать как в гражданской, так и в военной авиации. В последние десятиле-