

Borisov Igor Viktorovitch

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

E-mail: ia@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371697.

УДК 621. 941.2 – 82.192

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

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Приведена информация о направлениях совершенствования процессов шлифования путем активации подаваемой СОЖ и энергетического подхода к выбору абразивного инструмента, предложен метод поверхностно-пластического упрочнения сварного шва, даны рекомендации по выбору углеродных нанотрубок и конструкционных материалов деталей трибосистем.

Шлифование; активация; сварные швы; нанотрубки; оптимизация; кластерные наноструктуры; интенсивность изнашивания

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

**PERSPECTIVE CONSTRUCTOR-TECHNOLOGICAL DIRECTIONS OF
INCREASE OF EFFICIENCY OF PROCESSES OF MACHINE-BUILDING
MANUFACTURE**

The information on directions of perfection of processes of grinding is given by activation of a submitted lubricating-cooling liquid and power approach in a choice of the abrasive tool, the method of superficial-plastic hardening of a welded seam is offered, the recommendations are given at the choice of carbon nanotubes and constructional materials of details of tribosystems.

Grinding; activation; welded seams; nanotubes; optimization; cluster nanotubes; intensity of wear process.

Современное машиностроительное производство отличается высокой динамичностью развития и активным использованием результатов научных исследований как в области технологии машиностроения, так в смежных научных направлениях. При этом наиболее перспективными становятся конструкторско-технологические направления повышения эффективности машиностроительного производства в не зависимости от его типа и вида.

Известно, что большинство деталей машин подвергается шлифованию, эффективность которого во многом определяется состоянием режущего контура используемого абразивного круга. В этом отношении перспективным является применение в металлообработке шлифования и правки шлифовальных кругов магнитной активации смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) с наложением ультразвуковых колебаний. Исследования показали, что наложение ультразвуковых колебаний способствует ускорению движения СОЖ сквозь сеть капиллярных каналов к зонам контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом. Акустическое распыление СОЖ с помощью энергии ультразвукового поля позво-

ляет создать воздушно-жидкостные аэрозоли, размеры капель жидкости в которых соизмеримы с размерами поперечных сечений, образующихся при резании капилляров [1]. Установлено, что максимальная эффективность от использования частотно-модулированных ультразвуковых колебаний может быть достигнута, если основная резонансная частота преобразователя будет совпадать с максимальной (верхней) частотой. Предложена формула для выбора диапазона частот ультразвуковых колебаний, подаваемых в зону шлифования, устанавливающая функциональную зависимость между диаметром капель СОЖ d и частотой колебаний f :

$$d = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma_0}{\rho_{\text{ж}} f^2}}, \quad (1)$$

где σ_0 – поверхностное натяжение обрабатываемого материала;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность, подаваемой в зону шлифования СОЖ.

Как показали результаты предварительных исследований, применение метода магнитной активации СОЖ с наложением ультразвуковых колебаний приводит к снижению количества поверхностно-активных веществ, добавляемых в СОЖ, до 10-15 % при одновременном увеличении периода стойкости шлифовальных кругов, сокращении числа их правок и существенном улучшении показателей качества поверхностного слоя деталей.

Разработан энергетический подход к выбору абразивного инструмента при шлифовании кремнистых сталей, которые находят широкое применение для изготовления пружин, рессор и торсионных валов различного назначения и условий эксплуатации. В основе предлагаемого подхода лежит функциональная зависимость между числом микротрещин N_{mp} , образующихся на обрабатываемой шлифованием поверхности стали, и удельной энергией $E_{уд}$, затраченной на образование дефектного слоя на единице площади этой поверхности:

$$N_{mp} = \frac{E_{уд}}{2\sigma_0 l h_{mp}}, \quad (2)$$

где l – ширина трещины;

h_{mp} – глубина трещины.

Составлена последовательность выбора абразивного круга по его зернистости при шлифовании кремнистых сталей, которая легко может быть алгоритмизирована и использована для разработки соответствующих программ оптимизации.

В современном машиностроительном производстве сварочные работы занимают достаточно большой объем в технологических процессах, особенно связанных с проведением ремонтных работ. На участках сварочного шва при ремонте деталей без подогрева возникают продольные и поперечные трещины, которые располагаются по линии сплавления и, как правило, имеют на своем протяжении несплошности или начинаются от пор и оксидных включений. Такие дефектные участки располагаются чаще всего на границах сплавления подварочных валиков с металлом основного шва. Многократные подварки сварных швов приводят к повышению уровня остаточных напряжений, снижению механических свойств и образованию микродефектов. К сожалению, в сварочном производстве практически отсутствует нормативная документация, которая позволила бы обоснованно назначать режимы сварки металлов с учетом конструктивных особенностей деталей, физико-механических характеристик материалов и условий работы, а также прогнозировать прочность соединений.

Проведены металлофизические исследования, происходящие в материале при поверхностном пластическом воздействии на сварной шов, и показано, что деформационные процессы в нем связаны с формированием новых каналов диссипации, т.е. с развитием фрагментированной структуры и пластическими поворотами в кристаллической решетке. Происходит процесс самоорганизации материала сварного шва, при котором осуществляется переход к кооперативному движению дефектов и формированию диссипативных структур [2]. В результате представляется перспективным воздействие методами пластического деформирующего упрочнения на структуру материала сварного шва на границе сплавления с основным металлом с целью устранения указанных дефектов. Для этого разработаны и рекомендованы для внедрения в машиностроительное производство различные устройства для упрочняющего обкатывания поверхностей деталей, в частности, шарикостержневой упрочнитель, которые позволяют не только упрочнять сварные швы, но и одновременно производить обработку поверхностного слоя деталей после определенного периода их эксплуатации, восстанавливая параметры твердости и шероховатости.

Исследования показывают, что 80...90 % всех поломок деталей машин происходит из-за усталости материала, а показатели работоспособности и надежности машин во многом определяются износостойкостью поверхностного слоя детали. В связи с этим установлены следующие три группы факторов, влияющих на эксплуатационные показатели машин: конструктивные, материаловедческие, технологические, эксплуатационные. Показано, что проблема обеспечения эксплуатационных показателей деталей машин тесно связана с прогнозированием, оценкой характера и выявлении причин выхода из строя деталей. Успешное решение этой проблемы возможно с разработкой эксплуатационно-технологических процессов в машиностроении, предусматривающих принципиально новый подход к методологии выбора условий и режимов обработки материалов [3].

Известно, что каждая конструкторская задача может иметь несколько решений, из которых конструктор должен выбрать оптимальное. Разработана методика оптимизации параметров зубчатого колеса, исходя из требований прочности, коррозионной стойкости, способа термообработки зубчатых колес и массы изделия в целом. Анализ конструктивных вариантов коническо-цилиндрических редукторов для горных, транспортных машин и летательных аппаратов позволил сделать вывод о том, что оптимальное распределение передаточных чисел между ступенями двухступенчатого редуктора зависит как от общего передаточного числа, так и от соотношения допускаемых контактных напряжений быстроходной и тихоходной ступеней. Такой подход к проектированию редукторов и механических передач создает определенный запас надежности машин и может быть использован при их создании для работы в экстремальных условиях эксплуатации.

Современные изделия машиностроительного производства имеют, как правило, сложную систему управления и снабжены электронной аппаратурой контроля, слежения и настройки. В связи с этим весьма перспективным является применение в них наноматериалов, обладающих целым рядом уникальных свойств [4]. Исследованы физико-механические свойства углеродных нанотрубок, образующих новый класс электронных приборов рекордно малых размеров. Так, углеродные нанотрубки с их уникальными свойствами в сочетании с наномасштабной геометрией являются почти идеальными материалами при создании элементов с высокой полевой эмиссией в дисплеях, вакуумных лампах, а также для разработки новых способов генерации микроволнового излучения, изготовления квантовых приводов, соединений или целых устройств, в полевых транзисторах в качестве

проводящего канала или зонда в атомно-силовой микроскопии, переключающих элементов в компьютере и т.д.

Весьма перспективным направлением применения углеродных нанотрубок в машиностроительном производстве является упрочнение ими композиционных материалов. Установлено, что для достижения максимального эффекта упрочнения нанокompозита клубки нанотрубок необходимо предварительно разделить и распределить по объему композита. В результате прочность композита на разрыв увеличивается на 25 % при одновременном увеличении упругости и снижении массы на 5–8 %. Было также замечено, что углеродные нанотрубки повышают электропроводность композиционного материала и улучшают его поведение при действии сжимающих нагрузок по сравнению с обычным углеволокном за счет гибкости и меньшей склонности нанотрубок к разрушению под действием этих нагрузок.

Особую значимость в машиностроении имеют исследования, связанные с вопросами формирования качественных показателей поверхностного слоя деталей при различных способах механической обработки деталей и их последующим изменением в процессе изнашивания [5]. Исследования показали, что в процессе трения в зоне контактного взаимодействия материалов форма, размеры и дисперсия образующихся кластерных наноструктур непрерывно меняются [6]. Одновременно в материале поверхностного слоя происходит изменение всех показателей физико-механического состояния: идет накопление плотности дислокаций, повышается микротвердость поверхностного слоя и величина технологических остаточных напряжений, по мере изнашивания материала изменяется толщина упрочненного слоя. Все эти изменения показателей физико-механического состояния материала поверхностного слоя в зоне контакта при трении в значительной мере зависят от их начального состояния, полученного в процессе механической обработки.

Исследованы трибоэлектрические свойства кластерных наноструктур в зоне подвижного контакта материалов и установлена их функциональная связь с направлением взаимного перемещения сопряженных деталей трибосистем. Установлено, что практический выбор материалов пар трения с учетом направления их движения в принимаемых конструктивных решениях должен быть направлен на минимизацию интенсивности изнашивания контактируемых материалов. Для этого предлагается использовать следующую эмпирическую зависимость, полученную в результате анализа большого числа экспериментальных данных:

$$J = C_u U^a = (C_{M_1} C_{\partial_1} + C_{M_2} C_{\partial_2}) p^x V_{ск}^y \theta^z K, \quad (3)$$

где $C_u = C_{M_1} C_{\partial_1} + C_{M_2} C_{\partial_2}$ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств контактируемых материалов C_{M_1} , C_{M_2} и направления движения пар трения C_{∂_1} , C_{∂_2} ;

U – величина трибоэлектрического потенциала, возникающего в зоне подвижного контакта взаимодействующих материалов [5, 6];

p – давление в зоне контакта;

$V_{ск}$ – скорость взаимного перемещения контактируемых деталей трибосистемы (скорость скольжения);

θ – средняя температура в зоне контакта;

K – коэффициент, зависящий от вида применяемой в зоне контакта смазки: рекомендуется принимать без смазки $K=1$, для консистентной смазки $K=0,4$; для жидкостной смазки $K=0,6$; для твердой смазки $K=0,3$;

a, x, y, z – показатели степеней, зависящие как от свойств контактируемых материалов, так и направления движения деталей пар трения.

Приведенная формула (3) характеризует суммарную интенсивность изнашивания поверхностей деталей пары трения и может быть преобразована следующим образом:

$$J=J_1+J_2, \quad (4)$$

где J_1 и J_2 – соответственно интенсивности изнашивания первой и второй детали пары трения, определяемые в соответствии с зависимостью (3).

Исследования показали, что формулы (3) и (4) справедливы в следующем диапазоне изменения параметров трения: давление $p = 0,1 - 1,0$ МПа; скорость скольжения $V = 0,1 - 1,0$ м/с; температура в зоне контакта $\theta = 20-100$ °С.

Полученные данные о физико-механических и трибоэлектрических свойствах кластерных наноструктур в зоне подвижного контакта материалов при различных схемах движения контактируемых деталей должны стать основой при проектировании принципиально новых кинематических пар, имеющих две или три степени подвижности и обладающих низкими энергетическими потерями при эксплуатации. При этом правильный выбор направлений движения звеньев кинематических пар предопределяет эффективность их работы и надежность машин или механизмов в целом.

Результаты выполненных исследований процессов формирования и поведения кластерных наноструктур в зоне подвижного контакта материалов [5-6] найдут применение при разработке конструкций и узлов трения механических устройств промышленных роботов, работающих в экстремальных условиях (высокой температуре, вакууме и т.д.), где необходимо обеспечить с максимальной точностью позиционирования и быстродействием одновременно выполнение нескольких рабочих движений, например, поворот и выдвижение руки манипулятора, что должно быть учтено уже при разработке их компоновочной схемы. Особенности поведения наноструктурных слоев при разнонаправленности движения сопряженных деталей необходимо учитывать также при проектировании захватных устройств манипуляторов, так как от выбора их конструктивной схемы во многом зависит точность позиционирования и быстродействие всего промышленного робота.

Полученная в результате проведенных исследований информация о трибоэлектрических свойствах кластерных наноструктур в зоне подвижного контакта материалов и влияние их на интенсивность изнашивания поверхностного слоя деталей будет полезна при проектировании и эксплуатации различных фрикционных передач, звенья которых совершают друг относительно друга разные движения. Обоснованность выбора материалов для соприкасающихся тел с учетом их функционального назначения позволит расширить область применения фрикционных передач в машино- и приборостроении, существенно повысив их надежность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Киселев Е.С.* Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 186 с.
2. *Бабичев А.П., Мотренко П.Д. и др.* Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
3. *Гоголев А.Я., Бутенко В.И., Чистяков А.В., Логинов В.Т.* Надежность оборудования ГПС и качество обработки. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1992. – 184 с.
4. *Андреевский Р.А., Рагуля А.В.* Наноструктурные материалы: Учебное пособие. – М.: Изд-во Центр «Академия», 2005. – 192 с.

5. *Бутенко В.И.* Электронно-дислокационная теория контактного взаимодействия поверхностей твердых тел. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 208 с.
6. *Бутенко В.И.* Контактное взаимодействие материалов при трении и резании. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 245 с.

Бутенко Виктор Иванович

Технологический институт Федерального государственного 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.

Дуров Дмитрий Сергеевич

Захарченко Анатолий Данилович

Шаповалов Роман Григорьевич

Гусакова Лиана Валерьевна

Подножкина Валентина Николаевна

Фоменко Елена Сергеевна

Рыбинская Татьяна Анатольевна

Диденко Дмитрий Иванович

Butenko Victor Ivanovich

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

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

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634376122.

Durov Dmitry Sergeyevich

Zakharchenko Anatoly Danilovich

Shapovalov Roman Grigoryevich

Gusakova Liana Valeryevna

Podnozhkina Valentina Nikolayevna

Fomenko Yelena Sergeevna

Rybinskaya Tatyana Anatolyevna

Didenko Dmitry Ivanovich

УДК 621.315

В.Л. Земляков

ПРОСТОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЬЕЗОМОДУЛЯ

Приведены соотношения, позволяющие сформулировать простой метод определения пьезомодуля в динамическом режиме. Основу метода составляют измерения модуля проводимости ПКЭ только в области его механического резонанса.

Пьезомодуль; пьезокерамический элемент; эквивалентная схема.