

ФИНИШНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ – РОССИЙСКАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ (К 25-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ)

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., СОСНИН Н.А., ЕРМАКОВ С.А.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
НПФ «Плазмацентр» (Санкт-Петербург), info@plasmacentre.ru

Рассмотрена сущность технологии финишного плазменного упрочнения путем нанесения износостойкого нанопокрывтия с использованием плазменной струи, истекающей при атмосферном давлении из дугового плазмотрона постоянного тока, дополненного малогабаритным реактором плазмохимических реакций. Приведен обзор результатов исследований и практического применения данного процесса учеными различных университетов и организаций России и стран СНГ.

Ключевые слова: модификация, финишное плазменное упрочнение, износостойкое нанопокрывтие, триботехнические испытания.

The essence of technology which is referred to the finishing plasma-strengthening by covering wear proof nanocoating via plasma spray flowing out under the atmosphere pressure of continuous current plasmastrone, supplemented with small size reactor, has been discovered. The research data and results of a practical use of the said process have been produced by the scientists of different Universities and organizations of Russia and CIS countries.

Key words: modification, finish plasma strengthening, wear-resistant nanocoating, tribological tests.

Процесс финишного плазменного упрочнения (ФПУ) относится к промышленным технологиям, обеспечивающим многократное повышение долговечности инструмента, технологической оснастки и деталей машин за счет нанесения износостойкого нанопокрывтия на основе системы Si-O-C-N с помощью атмосферных плазменных струй. Первая публикация о данной технологии, разработанной в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, относится к 1987 г. [1]. Научные исследования и опыт промышленного использования авторов этого процесса обобщены в монографии [2].

Финишное плазменное упрочнение, осуществляемое на последней стадии изготовления деталей, предназначено для модификации поверхности путем осаждения износостойкого нанопокрывтия с применением дугового плазмотрона постоянного тока, дополненного малогабаритным реактором плазмохимических реакций (англоязычное название процесса – Atmospheric Pressure DC Plasma Jet Reactor – APDCPJR). Метод ФПУ не требует вакуума и осуществляется при обычных атмосферных условиях (рис. 1), что предопределяет его малые энергозатраты. В качестве плазмообразующего газа применяется аргон, который обеспечивает повышенную долговечность и надежность элементов плазмотрона при длительном ведении процесса. В качестве материалов для образования покрытия используются пары элементоорганических летучих жидких реагентов, подача которых в реактор осуществляется специальным дозатором. Источником питания плазмотрона служит инвертор постоянного тока со специальной вольтамперной характеристикой. Для стабильного охлаждения реактора и плазмотрона используется охладитель, изготовленный на базе холодильного агрегата. Система мониторинга процесса обеспечивает управление и контроль за параметрами режима, а также определение толщины наносимого покрытия в процессе его осаждения.

Плазменная струя, истекающая из дугового плазмотрона постоянного тока, обеспечивает оптимальную теплопередачу в обрабатываемый материал для гетерогенного формирования покрытия на поверхности изделия, локальность воздействия в сочетании с широкой зоной охвата за счёт программируемого перемещения, возможность упрочнения изделий в любом пространственном положении, а также маневренность плазмотрона с реактором. Применение дугового разряда между электродами, находящимися внутри плазмотрона, обеспечивает

отсутствие воздействия мощного ультрафиолетового излучения на оператора, а минимальный расход паров исходных жидких реагентов осуществляется при полном их разложении в процессе формирования покрытия, что определяет экологичность процесса.



Рис. 1. Процесс ФПУ и общая схема оборудования

Покрывание в безвакуумной технологии ФПУ при типичных скоростях перемещения плазменной струи (10...100) мм/с наносится слоями толщиной (30...3) нм. В отличие от конденсированных покрытий в вакууме, осуществляемых при PVD и CVD процессах, в данном методе покрытие формируется в локальной зоне касания плазменной струи подложки и только в условиях многослойного нанесения покрытия, что является важной отличительной особенностью технологии ФПУ. Циклическое взаимное перемещение плазменной струи и упрочняемой поверхности при ФПУ определяет получение слоистой структуры покрытия и позволяет до минимума уменьшить термическое воздействие плазмы на подложку, полностью исключая разупрочняющий отпуск для всех сталей. Интегральная температура упрочняемых деталей при нанесении покрытия, как правило, не превышает 150°C. Формируется упрочняющее покрытие в виде прозрачной пленки, которая на полированной поверхности имеет вид интерференционной картины с радужными оттенками от фиолетово-голубого до зелено-красного в зависимости от толщины покрытия.

Цель ФПУ - изготовление деталей машин, инструмента, штампов, прессформ, ножей, фильер, подшипников качения и др. изделий со специальными свойствами поверхности: износостойкостью, антифрикционностью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью, разгаростойкостью, антисхватыванием, стойкостью против фреттинг-коррозии, диэлектрическими свойствами и др.

Эффект от ФПУ достигается за счет изменения физико - механических свойств поверхностного слоя: увеличения микротвердости, уменьшения коэффициента трения, создания сжимающих напряжений в основе, залечивания микродефектов, образования на поверхности диэлектрического и коррозионностойкого пленочного покрытия с низким коэффициентом теплопроводности, химической инертностью и специфической топографией поверхности.

Наносимое при ФПУ нанопокрывание обладает: высокой твердостью (порядка 34 ГПа), химической инертностью, устойчивостью к окислению при повышенных температурах (до температур порядка 1000 °С), высокой сопротивляемостью усталостному разрушению в условиях циклических нагрузок и вибраций; низким коэффициентом трения (до 0,07), высокой адгезией к исходному материалу, высоким удельным электрическим сопротивлением (порядка 10^6 Ом·м), что уменьшает электромеханический износ при трении.

Ниже приводятся некоторые результаты исследований и практической реализации технологии ФПУ, полученные различными коллективами научных и учебных организаций России и стран ближнего зарубежья.

Научный центр порошкового материаловедения Пермского государственного технического университета

Под руководством академика РАН, профессора, д.т.н. Анциферова В.Н. [3-10] исследовались свойства наносимого при ФПУ нанопокрyтия. Отмечается, что преимуществами данной технологии является возможность локальной обработки (автоматически или вручную) поверхностей сложной конфигурации за счет маневренности дугового плазмoтрона и повышенной концентрации энергии в струе дуговой плазмы, высокая универсальность и гибкость технологии и оборудования.

Микрорентгеноспектральным анализом подтверждена рентгеноаморфность формируемого нанопокрyтия при ФПУ.

Испытания противоизносных свойств нанопокрyтия [4], проведенные на образцах-шариках диаметром 12,7 мм из стали ШХ-15, осуществлялись на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 в соответствии с ГОСТ 9490-75 в среде трансмиссионного масла ТМ-9. Определялись следующие показатели: диаметр пятна износа, нагрузка сваривания, время сваривания до остановки машины, а также диаметр пятна износа шарика при нагрузке перед сваркой. Используемая методика позволила по результатам опытов оценить износ образцов с покрытиями по сравнению с износом необработанных образцов. Первую серию опытов по определению диаметра пятна износа (ДПИ) проводили при нагрузке 40 кгс на стандартных шариках из стали ШХ-15 с покрытием и без покрытия при времени испытаний 1 час. Средний показатель ДПИ в указанных условиях эксперимента составил для стандартных шариков 0,885 мм, тогда как для 12 образцов с покрытием он равнялся 0,780 мм. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Обработку образцов проводили при двух режимах, отличавшихся рабочими параметрами процесса нанесения покрытия. Нагрузка перед сваркой составляла 315 кгс.

Таблица 1

Результаты испытаний противоизносных свойств покрытия

Показатели	Шарики без покрытия	Шарики с покрытием	
		Партия 1	Партия 2
Нагрузка сваривания, кгс	335	335	335
Время сваривания до остановки машины, с	0,4	1,2	1,4
Диаметр пятна износа при нагрузке перед сваркой, мм	3,5	2,75	2,8

Характер изменения показателей испытаний свидетельствует о том, что покрытие в обоих случаях (партии 1 и 2) способствует замедлению процесса изнашивания по сравнению со стандартными образцами. При одинаковой нагрузке - 335 кгс время схватывания (сварки) до остановки машины в 3,0–3,5 раза продолжительнее, а диаметр пятна износа перед моментом схватывания (сварки) в 1,3 раза меньше для образцов с покрытием после ФПУ, по сравнению с образцами без покрытия.

Пермский государственный технический университет, кафедра конструирования машин и сопротивления материалов

Под руководством заведующего кафедрой, профессора, д.т.н. Ханова А.М. исследовались особенности формирования и стадии роста рентгеноаморфных покрытий (отнесенных к оксидно-карбидной керамике) на основе соединений кремния при ФПУ быстрорежущих инструментальных сталей и твердых сплавов [3-7]. Отмечается, что данное покрытие обеспечивает упрочняемой поверхности целый комплекс позитивных свойств: равномерность толщины, прочность и сплошность слоев (отсутствие трещин, каналов, пор и др.); достаточную чистоту (отсутствие примесей и включений); способность защищать (маскировать) подложку от проникновения примесей при диффузии; высокую диэлектрическую прочность, которая составляет 60-

70% прочности пленки; чрезвычайную химическую устойчивость, даже при высоких температурах. Покрытие имеет высокую эластичность и высокую адгезию ко всем материалам – от металла и алмаза до пластмасс.

Структура покрытий исследовалась на металлографическом оптическом микроскопе ЕС МЕТАМ РВ-21, стереоскопическом микроскопе МЕТАМ Р-1, сканирующем силовом микроскопе Р4-5РМ. Измерения на изображениях производились с помощью анализатора изображений Видео-Тест. Результаты измерений накапливались в системе микроанализа Видео-Тест-Мастер, обрабатывались в Microsoft Excel и оформлялись в программе Видео-Тест-Альбом. Микрорентгеноспектральным анализом на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У определялось содержание кремния в покрытии, нанесенном при многократном воздействии плазменной струи.

Определены стадии роста покрытий: каплеобразование, растекание капли по поверхности подложки и затвердевание. На основании изучения условий формирования покрытий выявлено, что оно осаждается не отдельными атомами, а макрокластерами. Глобулярное строение покрытия зависит от наклона подложки к струе плазмы, при увеличении угла наклона размер глобул увеличивается от 0,1 до 0,5 мкм. На ростовой поверхности встречаются крупные глобулы диаметром 1-2 мкм (рис. 2,а). В случае неудовлетворительной подготовки поверхности подложки формируется покрытие с грубой глобулярной поверхностью (рис. 2,б). Установлено, что скорость глобулярного роста покрытия зависит от температуры предварительного подогрева подложки, времени осаждения покрытия и числа циклов его нанесения. На участках с мелкоячеистой ростовой поверхностью покрытие характеризуется высокой адгезией к подложке. При изучении структуры покрытий ($\times 10000$) обнаружено различное расположение сформированных после обработки зародышевых частиц. Беспорядочное их расположение характерно для одного цикла - прохода, а при сочетании двух циклов и 2,5 мин. обработки частицы образуют строчечность, либо распределяются слоем из разрозненных капель. Для подтверждения образования покрытия в виде капель отдельные его участки исследовались с большим увеличением ($\times 80000$, $\times 325000$). При этом при одном цикле-проходе и времени обработки 2,5 мин. формируются каплевидные частицы, диаметр которых изменяется от 6,25 до 81,25 нм [3].

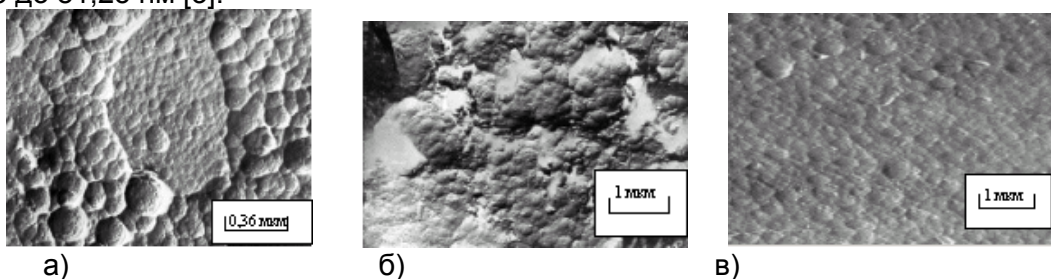


Рис. 2. Глобулярный рост рентгеноаморфного покрытия на основе соединений кремния: а) крупные глобулы диаметром 1-2 мкм; б) грубая глобулярная поверхность покрытия; в) мелкоячеистая структура ростовой поверхности покрытия

По результатам исследований структуры и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что при определенных технологических режимах покрытие имеет каплевидную форму в виде плоских дисков состоящих из SiO_2 и маленьких капель на их поверхности из SiC . Также определено, что по мере повышения температуры основы идут два процесса: увеличение диаметра пятна нагрева, на котором частицы прочно закрепляются на подложке и рост адгезии в самом пятне за счет увеличения количества очагов схватывания в нем.

Продолжительность осаждения покрытий (2,0 и 2,5 мин.) за четыре и шесть циклов способствует увеличению температуры в межфазной зоне, смачиванию поверхности и появлению сил поверхностного натяжения, стабильному радиальному

растеканию капли на твердой основе до приобретения формы плоского диска и прочному закреплению капли на подложке.

По данным микрорентгеноспектрального анализа с увеличением времени осаждения колебание концентрации Si в покрытии уменьшается. В направлении от центральной части образца к его кромке содержание Si уменьшается от 16 до 11,5 % при 4 циклах и увеличивается от 20 до 25,8% при 6 циклах нанесения.

Установлено, что покрытие улучшает морфологию исходной поверхности за счет исправления и залечивания дефектов, так как зародышевые частицы образуются преимущественно на дефектных участках кристаллических граней подложки. Покрытие, нанесенное при большом количестве циклов, стабилизирует и уменьшает параметр шероховатости R_{max} . Колебания и значение параметра R_{max} исходной поверхности соответствовали 0,69-2,23 мкм, после ФПУ на оптимальном режиме этот параметр имел диапазон 0,046-0,087 мкм.

Установлено, что максимально плотное, равномерно распределенное по поверхности подложки покрытие формируется при температуре предварительного подогрева поверхности подложки 400°C, многократном и продолжительном времени воздействия плазменной струи.

Принимая во внимание следующие факторы: лучшее смачивание упрочняемой поверхности для увеличения сил поверхностного натяжения, исключение распада жидкой частицы при формировании покрытия, увеличение адгезионных сил сцепления с подложкой; стабильное радиальное растекание жидкой частицы до формы плоского диска, равномерное распределение Si в соединениях на поверхности покрытия, залечивание дефектов и уменьшение шероховатости поверхности рекомендовано проводить ФПУ при следующих технологических режимах: температура подогрева поверхности - 400°C; число циклов-проходов – 4-6; время нанесения – 2,5 мин.

При изучении процесса ФПУ применительно к упрочнению изделий из твердого сплава ВК8 было установлено, что данный материал более активно взаимодействует с жидкой частицей покрытия, чем быстрорежущая сталь Р6М5. Это объясняется более близким коэффициентом термического расширения твердого сплава ВК8 - $(4,8-5,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и соединений кремния: SiO_2 - $4,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, SiC - $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Исследования на сканирующем силовом микроскопе также доказали образование на поверхности больших капель SiO_2 в форме плоского диска в затвердевшем состоянии и мельчайших на нем капель SiC , размеры которых с увеличением количества проходов увеличиваются.

Адгезию покрытия определяли методом скрайбирования с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н при перемещении столика вместе с образцом и непрерывном вдавливании индентора. Определяли прочность сцепления покрытия к подложке по прорыву пленки до обнажения подложки и отслоения самого покрытия. Коэффициент адгезии HSC рассчитывали по отношению площади царапины $S_{ц}$ к площади сколов вокруг царапины $S_{ск}$: $HSC = S_{ц} / S_{ск}$.

Исследованиями установлено, что максимальной адгезионной прочностью наносимых покрытий способствует термическая активация до температуры 400°C, многократное и продолжительное воздействие плазменной струи.

Промышленные испытания покрытий на основе соединений кремния после ФПУ проводили на горнодобывающих предприятиях Западно-Уральского региона. В ОАО «Уралкалий» (г. Березники) для комбайнового комплекса «Урал-20А» испытывали упрочненные резцы Д 6.22 (вставки из твердого сплава ВК8). Установлено, что при использовании первой партии упрочненных резцов было нарублено 38000 т руды по пласту «Красный 11» (наработка на упрочненный резец составила 190 т при норме 100 т), при использовании второй партии — 30000 т руды (наработка на упрочненный резец - 280 т при норме 100 т).

В ОАО «АЗОТ» РП «Азотхимремонт» (г. Березники) упрочнялись фрезы, изготовленные по ГОСТ 2679-73, из стали Р6М5 с размерами 100x3, 125x4, 160x4 (в количестве 30 шт). В качестве обрабатываемого материала использовали стали марок: Ст 3; 20, 45; 25Х1МФ; 40Х, 30ХМА, 40ХМА; 08Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3ТД2Х18Н10Т;

наплавленного металла электродов типа Э42А, Э46, Э-09Х1МФ; Э-02Х20Н14Г2М2, Э-09Х19Н10Г2М2Б, Э-10Х20Н17Г2М2Б2В, Э-10Х25Н13Г2 и др. Упрочнялся металл в различном состоянии (без термообработки, с различными видами термообработки) и в большом количестве партий, что позволило выявить эффект от применения упрочненных фрез. Наибольший эффект от упрочненных фрез (до 3 раз по объему механической обработки) заметен при обработке закаленных высоколегированных и аустенитных сталей. Значительный эффект получен при обработке некоторых видов металла электродов, например, типа Э-10Х20Н70Г2М2Б2В. По результатам проведенных работ с упрочненным режущим инструментом технология ФПУ принята к применению на ОАО «АЗОТ» в РП «Азотхимремонт».

Испытания в ОАО «НПО «Искра» (Пермь) отрезных резцов с твердосплавными пластинками из стали Т15К6, на которые нанесено износостойкое покрытие методом ФПУ, показали, что стойкость инструмента повышается в 1,4 раза. При этом, полученный эффект от использования данного покрытия больше, чем от многослойного покрытия (Ti - Zr) - (Ti - Zr)N, нанесенного методом PVD.

Перспективной областью применения ФПУ является нанесение покрытия в процессе ремонта хромированных изделий с целью устранения локальных отслоений хромовых покрытий, например, штоков гидроцилиндров [8], а также при восстановлении и упрочнении зубьев крупномодульных передач [9]. Данные технологии были разработаны и апробированы совместно с кафедрой строительно-дорожных машин Пермского государственного технического университета. При этом обеспечивается восстановление геометрических размеров локальных мест, имеющих дефекты, методами дуговой сварки, последующая шлифовка и окончательное нанесение тонкопленочного износостойкого покрытия методом ФПУ.

Под руководством проф. Ханова А.М. был также реализован проект по использованию технологии ФПУ в медицине, в частности, в стоматологии [10]. При протезировании для изготовления металлической литой штифтовой культевой вкладки применяют кобальтохромовые сплавы (КХС), хромоникелевые сплавы и др. При этом известно, что под действием такой агрессивной среды как слюна в полость рта и, соответственно, в организм человека попадают ионы металлов из состава металлической вкладки. Ионы металлов, особенно, никеля, вызывают токсико-аллергические реакции организма, гальванозы и другие нежелательные явления. Под действием слюны происходит также коррозия металлической вкладки, что приводит к расцементировке вкладки и коронки. Для предупреждения попадания ионов металлов в полость рта, исключения токсико-аллергических реакций на металлы, коррозии вкладки, электрогальванического синдрома и обеспечения надежности протезирования было предложено использовать процесс ФПУ для нанесения тонкопленочного защитного покрытия. Данная технология прошла апробацию и используется в Пермской государственной медицинской академии Министерства здравоохранения РФ.

Самарский государственный аэрокосмический университет, кафедра производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении

Под руководством члена-корреспондента РАН, заведующего кафедрой, профессора, д.т.н. Барвинок В.А. проведено обоснование экспериментальных работ по ФПУ кромок лопаток компрессоров высокого давления ГТД для поддержания оптимального уровня их усталостной прочности после касания о статор [11]. При анализе различных методов упрочнения учитывались механические воздействия на рабочие лопатки газового потока, твердых частиц (пыль, песок), содержащихся в атмосферном воздухе, статическую и динамическую деформацию лопаток от рабочих нагрузок, повреждение торца пера лопаток при касании о статор, тепловое воздействие, рабочую температуру лопаток, а также химическое воздействие кислорода, водяного пара, NaCl (характерно для атмосферы над акваторией моря).

Исходя из рассмотренных выше условий, сформулированы требования к модифицированному слою: стойкость к эрозии; высокая твердость; трещиностойкость; защита от высокотемпературной коррозии; отсутствие снижения статической прочности и выносливости лопаток; покрытие должно быть жаростойким и теплопроводным, непроницаемым для элементов, находящихся во внешней среде и быть химически нейтральным; химические и физические свойства материала покрытия и переходной зоны должны быть стабильными в течение заданного ресурса.

Перечисленные требования были положены в основу сравнительной оценки разных технологий модификации поверхности. В качестве упрочняющих технологий рассматривались процессы ионно-плазменного напыления, ФПУ, ионной имплантации, как отдельно, так и в комбинации с ионно-плазменным напылением, плазменного напыления, электроискрового легирования, методы армирования торцев пера лопаток с применением диффузионной сварки.

На основании аналитического обзора и сравнительных характеристик был сделан вывод о максимальной перспективности проведения экспериментальных работ по использованию технологии ФПУ кромок лопаток компрессоров высокого давления ГТД.

Консорциум «Промышленные нанотехнологии России», Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева (Москва)

Под руководством директора консорциума, академика РИА Чехового А.Н. разрабатывалось новое поколение квазиаморфных металлокерамических материалов на основе синергетических принципов конструирования стабильных твердотельных наноструктур, в том числе при использовании технологии ФПУ [12 - 16]. Отмечается, что ФПУ обеспечивает многократное повышение конструкционной прочности, безаварийного ресурса и долговечности изделий инструментального и триботехнического назначения без изменения интегрального химического состава традиционно используемых материалов. Технология ФПУ удовлетворяет требованиям стандартов ISO 9000/1/2/3 («зеленый» продукт).

Эксплуатационная стойкость металлорежущего инструмента и твердосплавных рабочих элементов обрабатывающих и породоразрушающих инструментов, изделий триботехнического назначения, работающих в условиях повышенного ударно-абразивного износа, гарантированно повышается до 2,5 раз в сравнении с аналогичным показателем стандартных инструментов и изделий при незначительном повышении себестоимости упрочнения.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра функциональных наносистем и высокотемпературных материалов

Под руководством профессора, д.т.н. Блинкова И.В. проведены исследования [17-19] микроструктуры и элементного состава износостойкого покрытия, наносимого методом ФПУ, в зависимости от длительности его нанесения и наличия или отсутствия подачи защитного газа. С этой целью были изготовлены девять образцов диаметром 15 мм и толщиной 5 мм из стали У8, прошедшие термическую обработку – закалку и отпуск до твердости HRC 58-60 и процесс ФПУ. До нанесения покрытия образцы шлифовались с двух сторон, одна из сторон полировалась. Для исследований были изготовлены восемь образцов с разной длительностью ФПУ и при наличии или отсутствии подачи защитного газа. Один из образцов был без покрытия. Изучение микроструктуры и элементного состава проводилось при помощи полевого эмиссионного растрового электронного микроскопа JSM-6700F с приставкой для энерго-дисперсионной спектроскопии JED-2300F фирмы JEOL (Япония). Глубина получения информации о составе исследуемых образцов составляла порядка 1 мкм.

На основе фотографий микроструктур образцов (рис. 3) было определено, что при оптимальном режиме нанесения покрытия обеспечивается получение плотной структуры поверхностного слоя с размером структурных элементов порядка 50-100 нм.

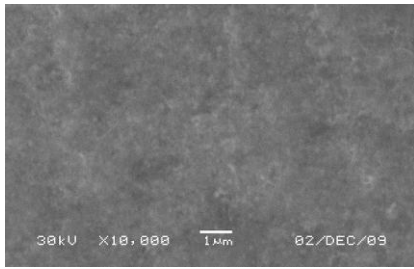


Рис. 3. Микроструктура образцов при увеличении $\times(10000-11000)$

Размер структурных элементов у покрытий, полученных с одновременной подачей защитного газа, существенно меньше, чем у покрытий, сформированных без подачи защитного газа.

В табл. 2 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа исследуемых образцов. В поверхностном слое (толщиной до 1 мкм) присутствуют С, N, O, Si, Fe. В пяти образцах обнаружено небольшое количество азота. Наличие Fe в исследованном слое, по-видимому, связано с тем, что толщина покрытия составляет меньше 1 мкм. Это подтверждено результатами исследования торцевого шлифа образца № 8 (рис. 4).

Таблица 2.

Элементный состав поверхностных слоев образцов с покрытиями

№ образцов	Содержание элементов, атомный % (весовой %)				
	C	N	O	Si	Fe
1	21,4 (8,4)	6,9 (3,1)	28,2 (14,6)	5,6 (5,1)	37,9 (68,8)
2	15,3 (5,4)	-	32,4 (15,1)	7,0 (5,7)	45,3 (73,8)
3	12,4 (5,3)	6,1 (3,0)	43,2 (24,5)	8,9 (8,9)	29,4 (58,3)
4	22,7 (11,4)	14,7 (8,6)	35,6 (23,8)	5,9 (6,9)	21,1 (49,3)
5	10,2 (3,9)	0,8 (0,4)	42,8 (22,1)	10,7 (9,7)	35,5 (63,9)
6	16,2 (6,8)	2,9 (1,4)	41,6 (23,4)	8,7 (8,6)	30,5 (59,8)
7	16,0 (6,2)	-	38,6 (19,7)	7,9 (7,1)	37,5 (67,0)
8	19,2 (7,8)	-	38,7 (20,9)	8,7 (8,3)	33,4 (63,0)

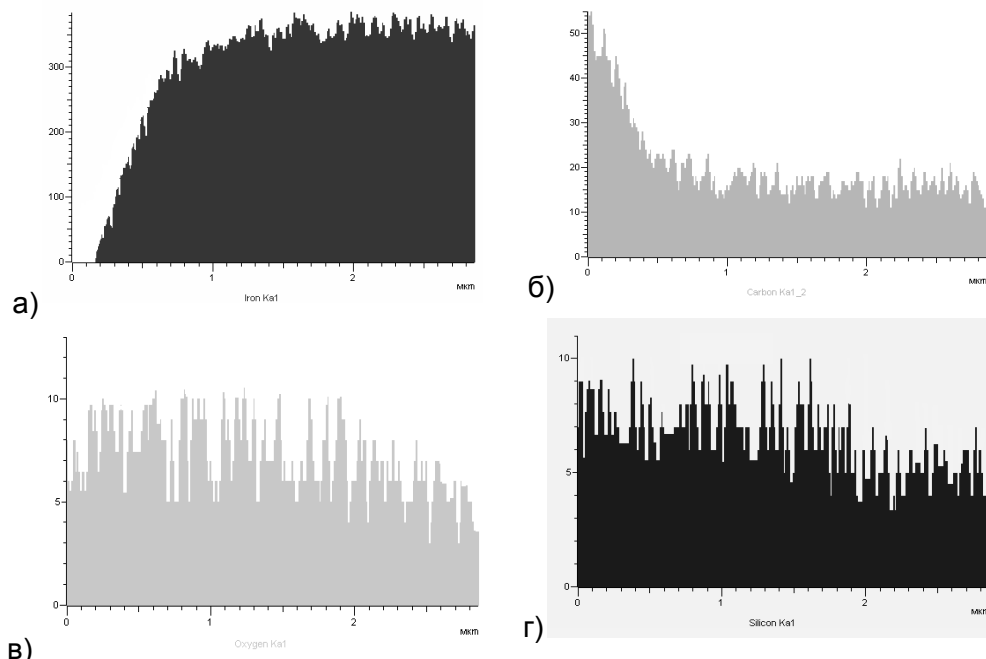


Рис. 4. Распределение элементов по торцевому шлифу образца № 8, а) – Fe; б) – C; в) – O; г) – Si

Распределение Fe и C по поверхности торцевого шлифа (рис. 4) свидетельствует о толщине покрытия равной 0,4-0,5 мкм. Характер распределения кислорода и кремния в поверхностном слое образцов дает основание предположить,

что эти элементы проникают, по-видимому, в подложку и образуют на границе «покрытие-субстрат» переходную диффузионную зону.

С целью получения информации о фазовом составе поверхностных слоев был проведен рентгенофазовый анализ образцов из стали У8, прошедших термическую обработку до твердости HRC 58-60 и процесс ФПУ. Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре фирмы «Rigaku» (Япония). В качестве источника рентгеновского излучения использовалась трубка с железным анодом (рабочий ток – 25 мА, напряжение – 25 кВ). Длина волны излучения 0,193728 нм. При съемке образцов использовался фильтр из Mn. Фокусировка осуществлялась по методу Брегга-Бретано с двумя щелями Соллера. Идентификация фаз, присутствующих в образце, проводилась с помощью сравнения со стандартными данными фаз по таблице ASTM. Для этого определялось положение по углу 2θ и относительная интенсивность всех линий. Затем рассчитывались межплоскостные расстояния по формуле Вульфа-Брегга $2 \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$, где λ – длина волны используемого излучения; θ – угол дифракции; d – межплоскостное расстояние. Полученные результаты сравнивались с табличными значениями. Полученные рентгенограммы всех образцов идентичны.

Для уменьшения глубины проникновения рентгеновского излучения и получения информации о фазовом составе приповерхностных слоев образцов были проведены исследования на рентгеновском дифрактометре D8 Discover (Bruker-AXS, Германия) в геометрии параллельного пучка. Источником рентгеновского излучения являлась рентгеновская трубка с медным анодом (излучение CuK_{α}). Фокус – линейчатый, щель после трубки и зеркала – 0,6 мм. Режим съемки – 40 кВ-40 мА. Для увеличения интенсивности первичного пучка и его частичной монохроматизации и коллимации в плоскости дифракции использовали зеркало Гебеля. Применяли вертикальную щель Соллера после образца и Ni-фильтр. Режим измерения: схема 2θ - θ и 2θ при $\theta=1-7,6^\circ$. Обработку экспериментальных кривых проводили с помощью программы EVA из пакета программ к дифрактометру D8 Discover.

Съемка дифрактограмм в схеме 2θ - θ и 2θ не выявила пиков рентгеновской дифракции материала покрытия. При съемке в схеме 2θ фиксированный угол θ меняли в интервале углов от 1 до $7,6^\circ$. При этом толщина рабочего слоя составляла приблизительно от 130 нм до 1 мкм. Максимальное различие в дифрактограммах наблюдали при угле $\theta = 7,6^\circ$, и именно в этом положении образца проводили итоговую съемку.

На основании проведенных исследований и с учетом того, что толщина покрытия оценивается величиной 0,5-0,6 мкм, а глубина проникновения рентгеновского излучения изменялась от 130 нм, материал покрытия является рентгеноаморфным.

С целью установления вида химической связи элементов, находящихся в поверхностном слое после ФПУ с нанесением износостойкого покрытия исследовались образцы методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Исследования проводились на установке PHI-5500 ESCA (фирма Perkin Elmer, США). Возбуждение фотоэмиссии производилось на $\text{Al K}\alpha$ излучении ($h\nu = 1486,6$ эВ) мощностью 200 Вт. Давление остаточных газов в тестовой камере – не более 5×10^{-10} Торр. Область анализа – диаметр 1100 мкм. Обзорные спектры снимались при энергии пропускания анализатора 93,9 эВ и плотности сбора данных 0,8 эВ/шаг. Спектры высокого разрешения снимались при энергии пропускания анализатора 11,75 эВ и плотности сбора данных 0,1 эВ/шаг. Аппроксимация спектров C1s выполнялась нелинейным методом наименьших квадратов с использованием функции Гаусса-Лоренца с добавлением асимметрии. Исследовались образцы из стали У8, подвергнутые термической обработке до твердости HRC 58-60 и нанесению износостойкого тонкопленочного покрытия методом ФПУ. Типичная глубина анализа в РФЭС – 2-3 нм. Для удаления поверхностного слоя адсорбированных примесей использовали ионную пушку. Ионное травление проводили ионами Ar^+ при энергии ионов 2 кэВ, растре $2 \times 2 \text{ мм}^2$, что приблизительно соответствует скорости травления 2-

3 нм/мин. Время травления составляло 9 мин., что было достаточно для удаления поверхностных слоев переменного состава. Основной состав: кремний и кислород. Поверхностный углерод практически полностью удаляется в процессе травления. Анализ спектра углерода на исходной поверхности, показал, что часть углерода находится в химически связанном состоянии C-Si. Связи C-Si проявляются при аппроксимации спектра C1s – это пик 1 с энергией связи 283,3 эВ. Пик 2 285,0 эВ – углеводороды, пик 3 286,3 эВ – связи углеводородов с кислородом. Наличие связей C-Si следует и из анализа спектра Si2p. Энергия связи спектра на исходной поверхности 102,2 эВ меньше этого значения в SiO₂ – 103,5 эВ. Это свидетельствует о том, что из четырех связей углерода одна - с кремнием, остальные – с кислородом. После травления, когда углерода фактически не осталось, спектр Si2p имеет энергию связи 103,5 эВ. Положение спектра O1s также отвечает SiO₂ – 532,5 эВ.

Таким образом, исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии образцов после ФПУ с нанесением износостойкого нанопокртия показали, что состав поверхностного слоя соответствует SiO_xC_y, а на глубине примерно 20-30 нм - SiO₂.

Нижнетагильский технологический институт (филиал Уральского федерального университета), кафедра сварочного производства и упрочняющих технологий

Под руководством профессора, д.т.н. Короткова В.А. проведенные исследования [20] покрытия, получаемого при ФПУ, методом рентгеноэлектронной спектроскопии показали, что в объеме покрытия одной из основных составляющих является SiO₂, что следует из полученных значений энергии связи кремния и кислорода. Несмотря на небольшую толщину, данное покрытие увеличивает микротвердость поверхности закаленных сталей. Прирост микротвердости при снижении твердости основы уменьшается.

Испытания упрочненных методом ФПУ изделий показывают их повышение стойкости от 2 до 8 раз.

Белорусско-Российский университет, кафедра оборудования и технологии сварочного производства (г. Могилев, Республика Беларусь)

Под руководством профессора, д.т.н. Пархимовича Э.М. выполнен большой комплекс исследований технологии ФПУ [21-23]. Отмечается, что отличительными особенностями рассматриваемой технологии являются: высокая адгезия наносимого нанопокртия в сочетании с повышенными физико-механическими свойствами, стойкость в агрессивных средах (за исключением плавиковой кислоты), отсутствие изменения шероховатости обработанной поверхности, что позволяет не проводить последующую механическую обработку, возможность варьирования и комбинирования свойств покрытия (адгезия, микротвердость, коррозионная стойкость) путем изменения его химического состава, получения покрытий сложного состава в различных соотношениях, возможность нанесения покрытия в сквозных отверстиях малого диаметра на значительную глубину, использование недефицитных и недорогостоящих компонентов для осуществления процесса. Ценным свойством данных покрытий является их прозрачность в оптическом диапазоне, что позволяет контролировать их толщину по интерференционной картине. В отличие от других способов нанесения покрытий технология ФПУ обеспечивает получение покрытий равной толщины на поверхностях сложной формы с заданной степенью точности. Использование в качестве источника энергии циклически перемещаемой плазменной струи, истекающей из электродугового плазматрона дополненного малогабаритным реактором исключает последующее формоизменение и разупрочнение упрочняемых деталей. Процесс отличается хорошей управляемостью и широкими возможностями автоматизации. При этом нанесение покрытий с помощью безвакуумных плазменных струй с применением металлоорганических соединений в паровой фазе является новым направлением в технологии нанесения тонкопленочных упрочняющих покрытий.

В процессе исследований гетерофазных реакций было показано, что механизм образования покрытия из дуговой плазмы при нормальном давлении имеет пять последовательно протекающих стадий: образование зародыша, рост и объединение зародышей в островки, слияние островков и образование сетчатого покрытия, образование сплошного покрытия, дальнейший рост покрытия. Отличие кинетики роста покрытия из дуговой плазмы состоит в наличии критической толщины на пятой стадии, а также в существовании специфической шестой стадии – осаждение соединений кремния в нано- и ультрадисперсной фазе. Образование покрытия при ФПУ протекает по схеме пар - жидкость - аморфная (стеклообразная) фаза нестехиометрического состава, имеющая высокую плотность структурных несовершенств. При этом нанесение покрытия возможно как под углом, так и на параллельные поверхности.

При моделировании термодинамической обстановки в плазме, насыщенной парами различных реагентов с использованием автоматизированной программы расчета термодинамического состояния гетерофазных систем АСТРА-3 (разработанной в МВТУ им. Баумана) было установлено, что в аргоновой плазме с продуктами пиролиза соединений, содержащих кремний, углерод, кислород, водород и азот конденсированные твердые фазы образуются в следующих диапазонах температур у поверхности подложки: $\text{SiO}_{2\text{ТВ}}$ при $T = 600\text{-}1500\text{ K}$; $\text{Si}_3\text{N}_{4\text{ТВ}}$ при $T = 600\text{-}1500\text{ K}$; $\text{SiC}_{\text{ТВ}}$ при $T = 1600\text{-}2500\text{ K}$.

При этом процесс конденсации $\text{SiO}_{2\text{ТВ}}$ идет при отрицательной энтальпии процесса в условиях экзотермической реакции, а процесс образования $\text{Si}_3\text{N}_{4\text{ТВ}}$ - при положительной энтальпии процесса в условиях эндотермической реакции. Конденсация $\text{SiC}_{\text{ТВ}}$ может происходить как при отрицательной, так и положительной энтальпии системы, но только в зоне высоких температур. Увеличение концентрации углерода и кислорода в плазме за счет дополнительного введения соединений водорода (углеводородов) ведет к большему количеству твердой фазы $\text{SiC}_{\text{ТВ}}$. (также в интервале температур $1600\text{-}2700\text{ K}$), при этом кривая выделения твердой фазы имеет экстремальный характер с максимумом в интервале температур $1700\text{-}1600\text{ K}$. Анализ полученных термодинамических зависимостей показал, что конденсация твердых фаз является функцией только температуры, так как давление в течение процесса не изменяется.

Исследования косо́го шлифа с покрытием на растровом электронном микроскопе «Nanolab-7» с микрозондом MS-46 и анализатором спектра волновой дисперсии SWD фирмы «Самеса» позволили получить концентрационные кривые, вид которых позволяет сделать вывод об отсутствии диффузии элементов покрытия в стальную подложку.

Для определения состава покрытия при разных режимах его нанесения оно отделялось от подложки с использованием импульсной лазерной установки «Квант-16». При этом разрушения самого покрытия не происходило из-за его оптической прозрачности. Отслоившиеся фрагменты покрытия с помощью клейкой ленты переносились на предметные образцы, которые покрывались проводящим слоем золота толщиной $100\text{-}200\text{ \AA}$, обладающим хорошей электропроводностью, слабо окисляющимся на воздухе и отсутствующим в образце. Образец исследовался на растровом электронном микроскопе «Nanolab-7» фирмы OPTON (Германия) с анализатором спектра энергетической дисперсии EDS «System 860». В результате исследований определялся элементный состав покрытия.

Определено, что для образования сплошного покрытия процесс его нанесения следует вести таким образом, чтобы вблизи поверхности подложки температура газовой фазы приближалась к одному из температурных интервалов существования конденсированных фаз. При нанесении покрытий на стальную подложку при циклической обработке поверхности ($t_{\text{ц}} = 10\text{-}15\text{ с}$), оптимальные условия для формирования покрытия создаются при среднемассовой температуре плазменного потока вблизи подложки $10000\text{-}11000\text{ K}$. Снижение температуры сопровождается образованием неплотного, рыхлого покрытия, последующий рост которого идет при сохраняющейся неоднородности, такое покрытие имеет микротвердость в $3\text{-}5$ раз

меньшую по сравнению с наносимой при оптимальном режиме. При повышении температуры процесса сверх оптимального, происходит образование твердых фаз SiC и Si₃N₄ не только на поверхности подложки, но и вблизи нее. В результате одновременно действуют два механизма роста покрытия: за счет непосредственного образования на поверхности подложки и за счет налипания на нее дисперсных частиц, конденсированных гомогенно в газовой фазе.

Изменение толщины покрытия от времени обработки носит логарифмический характер ($F = 0,4957 \ln(t) - 1,3833$), при этом максимальная толщина покрытия составляет 2 мкм и ограничивается перегревом поверхностных слоев, вследствие уменьшения теплоотдачи в подложку и сменой роста сплошного покрытия из газовой фазы на напыление дисперсными частицами.

Измерения микротвердости покрытия проводились на образцах из твердого сплава BK17, который имеет твердость, сравнимую с твердостью самого покрытия. Исследовались покрытия, содержащие разное количество SiO₂, SiC, Si₃N₄. Измерения микротвердости проводились на приборе «Micromet-2» фирмы «Bullermet» (Швейцария) методом Кнупа. Отпечатки без сколов и трещин рассматривались на растровом электронном микроскопе при увеличении $\times 10^4$. При нанесении покрытия при оптимальной температуре вблизи поверхности подложки покрытие имеет максимальную микротвердость – 18-27 ГПа.

Оценка адгезионных свойств покрытий проводилась методом истирания о нежестко закрепленные абразивные частицы. Изучение характера износа по профилограммам и при рассмотрении поверхности в оптическом микроскопе позволили сделать вывод, что износ покрытия происходит послойно, без скалывания, что говорит о высокой адгезии покрытия к подложке.

Изучение износостойкости покрытия проводилось по схеме вытирания лунки на поверхности образца. Недостатком данной схемы является непостоянство площади поверхности трения и, следовательно, непостоянство величины удельного давления при испытании с постоянной нагрузкой. Однако только данная схема дает возможность точного определения величины линейного или объемного износа на основе измерения длины вытертой лунки, что при малой толщине покрытия является наиболее существенным. В качестве контртела использовался диск из стали ШХ15 (170 HV) толщиной 3 мм и диаметром 50 мм. Материал подложки - твердый сплав BK17, толщина покрытий 2 мкм. Испытания проводились при нагрузке 50 Н и скорости вращения 480 об/мин. Анализ полученных зависимостей позволяет заключить, что износостойкость поверхности с нанесенным покрытием существенно выше, чем износостойкость подложки, причем, увеличение содержания карбида кремния в составе покрытия приводит к росту износостойкости.

Испытания на износостойкость в производственных условиях производились на вырубных штампах для листовой штамповки деталей из стали X18H10T толщиной 2 мм. Упрочнение пуансонов и матриц привело к увеличению количества отштампованных деталей в 2 раза. Критерием выбраковки штампа являлось появление недопустимого заусенца на кромках деталей. В результате изучения поверхности пуансона и матрицы до и после выбраковки штампа установлено, что имеет место послойный износ покрытия без скалывания. Повышение стойкости штампа связано с барьерными свойствами покрытия, исключая непосредственное взаимодействие ювенильных поверхностей штампующего материала с контактными зонами пуансона и матрицы и препятствующего образованию зон схватывания и микросварки.

Анализ состояния рабочих поверхностей прессформ для изготовления резинотехнических изделий на ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» показал, что рабочие поверхности пресс-форм после длительной эксплуатации в течение 3-х лет не имеют повреждений рабочих поверхностей (следов окисления под покрытием, задиров, нарушений сплошности, адгезионных и когезионных разрушений) и находятся в рабочем состоянии.

**Российский государственный аграрный заочный университет (г. Балашиха),
кафедра надежности и ремонта машин**

Под руководством зав. кафедрой, заслуженного деятеля науки РФ, профессора, д.т.н. Батищева А.Н. проведен сравнительный анализ существующих технологий нанесения упрочняющих тонкопленочных покрытий с использованием PVD и CVD - процессов и ФПУ и проанализирована целесообразность их использования в ремонтных производствах агропромышленного комплекса [25]. Делается вывод, что для ремонтного производства АПК наиболее приемлемым из возможных способов получения упрочняющих покрытий осаждением из газовой фазы является процесс ФПУ или аналогичный способ получения плазмохимических покрытий.

**Казанский государственный аграрный университет, кафедра ремонта машин,
Чистопольский филиал Камской государственной инженерно-экономической
академии, кафедра механизации агропромышленного комплекса**

Под руководством профессоров, д.т.н. Адигамова Н.Р. и д.т.н. Шарифуллина С.Н. проведен комплекс исследований по использованию технологии ФПУ для повышения безотказности и долговечности плунжерных пар топливных насосов высокого давления (ТНВД) дизельных двигателей за счет нанесения нанопокрyтия на основе оксикарбонитрида кремния на рабочую поверхность плунжера [26, 27]. Данные покрытия обладают высокой износостойкостью, химической инертностью и малым коэффициентом трения. По этим параметрам они несколько превышают покрытия из нитрида титана. Кроме того, плазменные безвакуумные тонкопленочные покрытия являются диэлектрическими. Это позволяет исключить вероятность схватывания высокоточных подвижных соединений при точечных перегревах поверхности детали.

Для экспериментов были выбраны 4 новые плунжерные пары ТНВД модели 33-02 двигателя автомобиля КамАЗ 5320. С таким же успехом плунжерные пары могли быть и восстановленными. Параметром для замера являлась гидроплотность плунжерных пар, которую оценивали с использованием прибора КП-1640А по времени просачивания топливной смеси. Усилие давления на торец плунжера зависит от массы груза и места его расположения на рычаге прибора, которые были выбраны таким образом, чтобы усилие давления на торец плунжера составлял 500 Н. Результаты замеров гидроплотности плунжерных пар до и после ФПУ представлены в табл. 3. Здесь на плунжерах с номерами 1 и 2 толщина покрытия составляла порядка 0,5 мкм, а с номерами 3 и 4 порядка 1,0 мкм. Из приведенной таблицы видно, что плазменные безвакуумные тонкопленочные покрытия позволяют в несколько раз увеличить гидроплотность плунжерных пар как новых, так и восстановленных.

Таблица 3

. Гидроплотности плунжерных пар, с

Состояние поверхности плунжера	Номера плунжеров			
	1	2	3	4
Исходное	15	18	20	16
После ФПУ с покрытием	28	30	140	120

Связь между величиной зазора в плунжерной паре и утечкой топлива через

зазор при активном ходе плунжера выражается формулой:
$$Q = \frac{\pi D l p^3}{12 \mu L}$$
, где Q – секундное количество топлива, протекающего в кольцевой зазор; D - диаметр плунжера; p - перепад давления; l - радиальный зазор в плунжерной паре; μ - абсолютная вязкость топлива; L - длина уплотняющей поверхности.

Из приведенной формулы видно, что наличие на рабочей поверхности плунжера плазменного безвакуумного тонкопленочного покрытия позволяет в 1,5 – 2,0 раза уменьшить радиальный зазор в плунжерной паре. Это соответствует примерно 5-ти кратному увеличению гидроплотности плунжерной пары за счет ФПУ.

Эмпирическая зависимость между развиваемым плунжерной парой давлением p и ее гидроплотностью τ

$$\frac{\tau_0 - \tau}{\tau} = 0,1(p_0 - p)$$

где τ_0 – исходная плотность; p_0 – исходное давление (развиваемое плунжерной парой давление при τ_0); p – развиваемое плунжерной парой давление при τ . Из данного выражения следует, что при 6-ти кратном увеличении гидроплотности плунжерной пары разность $(p_0 - p)$ составит 50 МПа. В нашем случае τ_0 и p_0 соответствуют гидроплотности и развиваемому плунжерной парой давлению с плазменным покрытием на плунжере, а p и τ – гидроплотности и развиваемому плунжерной парой давлению без покрытия на плунжере (заводская плунжерная пара). Нормальное развиваемое давление заводской плунжерной пары составляет порядка 110 МПа. Тогда развиваемое плунжерной парой давление с плазменным покрытием на плунжере будет составлять 160 МПа.

Для базовой модели 33-02 топливного насоса двигателя автомобиля КамАЗ 5320 с заводскими плунжерными парами его ресурс составляет 3000 мото-часов при исходном развиваемом плунжерной парой давлении 70 МПа. С учетом уменьшения интенсивности изнашивания плунжерной пары с покрытием минимум в два раза и с учетом более высокого давления ресурс работы ТНВД с плазменным покрытием составит 9000 мото-часов. Плазменное безвакуумное тонкопленочное покрытие на плунжере позволяет в 3 раза увеличить ресурс работы ТНВД дизельных двигателей.

Таким образом, плазменные безвакуумные тонкопленочные покрытия на основе оксикарбонитрида кремния позволяют в несколько раз увеличить гидроплотность плунжерных пар как новых, так и восстановленных. С применением плазменного безвакуумного тонкопленочного покрытия на основе оксикарбонитрида кремния возможно в 2 – 3 раза увеличить ресурс работы ТНВД отечественного производства.

Ставропольский государственный аграрный университет, кафедра технического сервиса стандартизации и метрологии, учебно-научно-производственный центр «Восстановление и упрочнение деталей машин»

Под руководством доцентов, к.т.н. Лебедева А.Т. и к.т.н. Землянушновой Н.Ю. выполнен комплекс работ по организации участка финишного плазменного упрочнения с использованием установки УФПУ-111. Оборудование для нанесения износостойких нанопокровтий на основе оксикарбонитрида кремния используется в учебном процессе, проведении научно-исследовательских работ студентов и аспирантов. Важными направлениями исследований являются разработки методов повышения ресурса деталей топливных насосов высокого давления путем упрочнения плунжерных пар, режущей пары «сегмент – противорежущая пластина» путем нанесения износостойких покрытий.

Одним из новых применений технологии ФПУ явилось использование данного процесса при восстановлении беговых дорожек колец опорно-поворотных устройств строительно-дорожных машин, определены параметры режима упрочнения, при котором обеспечивается увеличение микротвердости, залечивание микродефектов, низкий коэффициент теплопроводности [29].

Оренбургский государственный университет, кафедра технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов

Под руководством профессора Ильичева Л.Л. выполнен комплекс исследований [30] связанных с повышением работоспособности металлорежущего инструмента за счет последовательного применения двух методов поверхностной модификации – электроискрового легирования (ЭИЛ) и ФПУ с нанесением нанопокровтия системы Si-O-

C-N. В качестве объекта исследований использовались спиральные сверла диаметром 10 мм, изготовленные из быстрорежущей стали P6M5. В качестве обрабатываемого материала применялась сталь 45. Сверление производилось на сверлильно-фрезерно-расточном станке модели 400V (Стерлитамакский станкозавод) по заданной программе без СОЖ при скорости резания 31,4 м/с, подаче 0,14 мм/об, глубине сверления 40 мм. Допустимый износ по заданной поверхности $[h_3]=0,3$ мм, который измерялся с помощью цифрового USB-микроскопа Polypower – M501 (x260). Покрытия наносились на трех режимах (1-3) установки ЭИЛ «ALJER-52» при коэффициентах энергии соответственно 0,2; 0,4; 0,6. Сплошность, получаемых электроискровым методом покрытий после алмазной заточки при оставшейся толщине покрытия 40...50 мкм для электродов из ВК6 составила 92-95%, при использовании электродов из СВС – сплавов 95...100%. Ограничения выбора режимов (1, 2, 3 из 7) связано с тем, что шероховатость поверхности покрытий на более интенсивных режимах соизмерима с припуском на алмазную заточку. Сверла с нанесенными покрытиями затачивались на алмазно-заточном станке фирмы GSC Grinding Drill мод. GC-1, обеспечивая шероховатость обработанных поверхностей Ra 0,2 мкм. Толщина снимаемого слоя при алмазной заточке 0,02...0,03 мм. Половину партии сверл после заточки испытали на указанных выше режимах резания.

Результаты стойкостных испытаний сверл с покрытиями, полученными электроискровым легированием и сверл с комплексными покрытиями (ЭИЛ+ФПУ) показывает, что нанесение покрытий ЭИЛ позволяет повысить работоспособность сверл в 1,6 раз при использовании электродов из ВК6 и более чем в 2 раза при использовании электродов из СВС – сплавов. При этом наибольшую стойкость имеют сверла с покрытием из СВС – сплава СТИМ 2/20 (TiC+Ni). Сверла с комплексными покрытиями (ЭИЛ+ФПУ) показали повышение работоспособности от 3,8 раз (электрод из ВК6) до 4,5 раз (электрод СТИМ 2/20).

Коэффициент увеличения стойкости определялся как $K_T = T_{\text{покр.}} / T_{\text{станд.}}$, где T - время работы сверла до допустимого износа с покрытием и без покрытия (стандартного сверла).

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, кафедра технологий материалов и материаловедения

Под руководством профессора, д.т.н. Хмелевской В.Б. произведен спектр работ по исследованиям и направлениям промышленного использования износостойкого нанопокртия, наносимого при ФПУ применительно к деталям судовых механизмов и гидротехнических сооружений шлюзов [31-38].

С целью выбора оптимальной технологии повышения ресурса поршневых колец судовых дизелей и двигателей внутреннего сгорания проведены сравнительные триботехнические испытания покрытия хромом, нанесенного гальваническим методом на ОАО «Клинцовский завод поршневых колец», композиционного покрытия Cr_2C_3-Ni , нанесенного плазменным порошковым напылением и покрытия системы Si-O-C-N по технологии ФПУ. Испытания проводились на машине трения СМЦ-2 со смазкой маслом М14В2 (ТУ 38.101807-80) в количестве двух капель в минуту. Из натуральных колец, изготовленных по трем разным технологиям, вырезались образцы и вставлялись в оправку. Испытания проводились в сопряжении исследуемого покрытия с роликом Ø42 мм из чугуна СЧ 25. Результаты триботехнических испытаний показали, что момент трения при нагрузке 50 кгс у гальванического покрытия хромом составляет 13-15 кгс см, при нагрузке 100 кгс наблюдается схватывание. У плазменного порошкового покрытия Cr_2C_3-Ni момент трения при нагрузке 50 кгс такой же, как у гальванического хрома; при нагрузке 100 кгс схватывания не наблюдается; при нагрузке 150 кгс момент трения – 17 кгс см, проявляется схватывание. При нагрузках 50 и 100 кгс покрытие системы Si-O-C-N имеет момент трения 12-14 и 27 кгс см соответственно. Таким образом, для поршневых колец двигателей внутреннего сгорания целесообразно использовать покрытие, нанесенное методом ФПУ.

Исследовались два вида технологий – ФПУ и процесс натирания минерального материала - серпентинита дисперсностью 20-40 мкм (при малых давлениях от 2 до 5 кгс/см² и с последующей ультразвуковой обработкой).

В качестве образцов для испытаний применялись: ролики диаметром 42 мм и шириной 20 и 10 мм и плоские образцы 10x10x20 мм толщиной 10 мм. Материал образцов - стали 65Г, ШХ15, Ст45. Материалы сопряжённых деталей: стали 38ХМЮА, ШХ15, 4Х2Н4М, алюминиевый сплав АО20.

Исследование триботехнических свойств проводилось на машине СМЦ 2. Испытания на фреттинг – на магнитострикционном приборе без воды. Испытания на кавитационную стойкость – на магнитострикционном приборе с водой. Испытания на коррозионную стойкость – на приборе с платиновым и угольным электродом по методике ЦНИИ КМ «Прометей». Остаточные напряжения измерялись на приборе «СИТОН-ТЕСТ». Адгезионная прочность определялась методом вдавливания алмазного конуса по методике СПбГУВК и склерометрическим методом. Толщина покрытия определялась микрометром индикаторного типа.

Толщина покрытия при ФПУ составила 0,5-1,5 мкм, толщина минерального покрытия - 20 мкм.

Адгезионная прочность у покрытия после ФПУ естественно выше, чем у слабого минерального покрытия; стойкость против коррозии у соединений типа карбидов кремния в любом случае будет выше, чем у составляющего минеральное покрытие серпентинита, включающего примеси как самого железа, так и его соединений; угол смачивания у минерального покрытия выше, так как индекс смачивания у него значительно меньше, чем у стали или карбида кремния.

Проводились триботехнические испытания на машине трения. Вращающиеся образцы с покрытиями и без них выполнялись шириной 20 мм; неподвижные – сопряжённые - образцы имели ширину 10 мм. Все испытания проводились по 3 часа при частоте вращения 300 об/мин часов и при нагрузке 300 кгс. Число циклов нагружения при этом составляло 54000. Отдельно фиксировалась нагрузка схватывания.

Величина интенсивности изнашивания определялась по разнице средних значений диаметров роликов до и после испытаний, отнесённой к длине пути под нагрузкой.

Для случая образцов без покрытий (для пары сталь – сталь при величине линейного износа вращающегося образца 0,2 мм) интенсивность изнашивания составляет $1,4 \times 10^{-8}$, то есть в 250 раз выше, чем у детали с покрытием.

По величине интенсивности изнашивания можно определить, какой линейный путь под заданной нагрузкой может обеспечить конкретная вращающаяся деталь до полного истирания покрытия.

В случае покрытия ФПУ толщиной 3 мкм эта величина составит 85714 км; для минерального покрытия толщиной 20 мкм - 571429 км. Зная размеры детали, по данной величине можно определить (или назначить) её ориентировочный ресурс.

Результаты кавитационных и фреттинг испытаний выявили, что покрытие после ФПУ сопротивляется оказываемым воздействиям, а минеральные покрытия, при использованной технологии формирования, подверглись разрушению. Испытания на машине трения выявили, примерно одинаковые характеристики на трение и износ покрытий при ФПУ, и покрытий из серпентинита.

Исследовались нанопокртытия, наносимые методом ФПУ и покрытия из геоматериалов с сопряженной парой ШХ15, применительно к условиям работы подшипников качения.

Образцы с различными покрытиями были испытаны на трение и износ на машине трения СМЦ-2. Исследования проводились при возрастании нагрузки от 50 кгс через 15 мин, подача масла 4 капли в минуту.

Сравнительный анализ рассмотренных покрытий показал, что наилучшие результаты с точки зрения трения и износа имеют покрытие системы Si-O-C-N, наносимое с использованием технологии ФПУ.

Рассматривались методы повышения износостойкости деталей зубчатых передач портового перегрузочного оборудования. Применяемые зубчатые колеса имеют диаметр от 180 до 600 мм. В качестве материалов колес, как правило, используются стали сталь 45 и сталь 40X. Шестерни в редукторах подвергаются химико-термической обработке (азотированию или цементации).

Испытания на трение и износ проводились на машине трения СМЦ-2.

По результатам исследований установлено, что геоматериалы способствуют уменьшению коэффициента трения при работе сопряженной пары при малых нагрузках. При больших нагрузках оптимальные результаты получены при использовании процесса ФПУ. При использовании азотирования коэффициент трения незначительно уменьшается при постепенном повышении нагрузки, что делает данный метод малоэффективным. При испытаниях сопряженной пары на износ было экспериментально установлено, что износостойкость материала после азотирования почти не повышается, нанесение покрытий при ФПУ дают лучшие результаты.

Брянский государственный технический университет, кафедра триботехнологий

Под руководством заведующего кафедрой, профессора, д.т.н. Горленко А.О. выполнен комплекс триботехнических испытаний нанопокртытия системы Si-O-C-N, наносимого при ФПУ [39]. Испытания проводились в условиях трения скольжения при граничной смазке нормализованным методом на установке, созданной на базе машины трения МИ-1М. Исследовались цилиндрические образцы из стали 45, X12, У8 с нанопокртытием системы Si-O-C-N и аналогичные образцы без покрытия. При испытаниях с установленными нагрузкой и скоростью скольжения к вращающейся цилиндрической поверхности образца, частично погруженного в смазочный материал, прижимался неподвижный индентор. Для установки образцов и индентора использовалась схема со сменными держателями, обеспечивающая самоустановку индентора относительно испытываемой поверхности образца на промежуточной сферической опоре. В процессе испытаний с помощью системы датчиков непрерывно и синхронно регистрировалось время испытания, нагрузка, температура, коэффициент трения и линейный износ. Их численные значения выводились на монитор компьютера. Для измерения момента трения и нагрузки использовались тензодатчики, для измерения температуры – термopара. Для непрерывного измерения износа в процессе проведения испытаний была разработана специальная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние на результаты измерений радиального биения и тепловых деформаций испытываемого образца.

Для обработки сигналов, получаемых с датчиков, в режиме постоянного времени использовалась автоматизированная система научных исследований (АСНИ), которая состоит из испытательного блока, блоков привода и нагружения, датчиков, мобильного измерительного комплекса, компьютера и специально разработанного программного обеспечения.

Триботехнические испытания образцов с покрытием подтверждают повышение ресурса изделий с покрытием системы Si-O-C-N после ФПУ.

Димитровградский институт технологии, управления и дизайна Филиал Ульяновского государственного технического университета, кафедра машины и аппараты текстильной и легкой промышленности

Под руководством профессора Студенцова В.М. выполнен комплекс исследований [40, 41] износостойкости быстрорежущей стали P6M5, подвергнутой следующим видам обработки (испытания носили сравнительный характер и производились на образцах пяти типов): стандартная обработка (обычные); стандартная обработка и вакуумное азотирование (ВА); стандартная обработка + ФПУ; стандартная обработка и вакуумное азотирование + ФПУ (ВАФПУ); стандартная обработка + покрытие TiN (метод КИБ).

Процесс вакуумного азотирования осуществлялся на установке термодиффузионного легирования и термической обработки сталей «Магнетон 3-2000». ФПУ инструмента производилось на установке УФПУ-108. Покрытие TiN наносилось на установке ННВ 6-6-И1. Испытания на износ проводились в соответствии с ГОСТ 23.224-86 на установке СМЦ-2. При испытаниях использовались цилиндрические образцы диаметром 38 мм и толщиной 12 мм, изготовленные из стали Р6М5. Контр тело – закаленные цилиндрические образцы из стали ШХ-15 с твердостью 65 HRC. Условия контакта – трение качения с 20 % проскальзыванием со смазкой. В качестве смазки применяли масло индустриальное – 20 по ГОСТ 20779-75. Смазка трущихся поверхностей производилась за счет окунания ролика в масло. Для получения статистически представимого результата каждая серия состояла из 3-х образцов. Перед началом испытаний, а так же после их окончания производилась промывка образцов и контр тел в ацетоне по ГОСТ 2603-79 и просушка, а так же их взвешивание и измерение шероховатости. Измерение шероховатости производилось на профилометре-профилографе Perthometer S 5P. Испытания на износ проводились при частоте вращения нижнего образца 1000 мин⁻¹ при нагрузке 1650 Н. При испытаниях регистрировались значения момента трения, массового износа и интенсивности износа ролика и контртела. Результаты исследований износостойкости представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты износостойкости в зависимости от технологии упрочнения

Интенсивность изнашивания, $J \cdot 10^{-13}$	Стандартные	ВА	КИБ	ФПУ	ВАФПУ
	8,21	6,96	5,3	4,42	3,81
Коэффициент трения, $f \cdot 10^{-3}$	14,5	10,8	8,43	7,03	6,04

ОАО «АвтоВАЗ», Исследовательский центр

Под руководством начальника исследовательского центра к.т.н. Аманова С.Р. выполнен комплекс исследований по разработке технологии повышения стойкости штампов и обеспечения повышенного качества штампованных заготовок [42].

Проведены исследования по определению значений коэффициента трения при моделировании технологической операции вытяжки листового проката без покрытия (черного) и электрооцинкованного проката (ЭЦ) в штампах, изготовленных из чугуна марки ХФ. Исследовались четыре состояния материала чугунных штампов – в исходном виде, после нанесения упрочняющего нанопокртия методом ФПУ и после наплавки алюминиевой бронзы электродом EutecTrode XHD-1855 и высоколегированной бронзы электродом EutecTrode 1868 (фирма Castolin S.A., Швейцария).

Для моделирования процесса вытяжки были изготовлены образцы из чугуна в виде роликов \varnothing 50 мм и длиной 30 мм. На универсальной испытательной машине FRZ-100/1 (фирмы HECKERT, Германия) с помощью специального приспособления полосу металла перетягивали через неподвижно закрепленный ролик, чем моделировали поведение металла в вытяжном штампе. При этом один конец полосы фиксировали неподвижно в горизонтальном направлении, полоса огибала ролик, а к другому концу полосы прикладывали растягивающую силу от разрывной машины в вертикальном направлении. При такой схеме нагружения участки полосы, расположенные по разные стороны относительно ролика, получали разные степени деформации, так как в результате действия силы трения металла полосы о ролик растягивающая сила P_1 на ее горизонтальном участке меньше, чем сила P_2 на вертикальном участке. На этом явлении основывался метод определения коэффициента трения.

Условия проведения испытаний: размер полосы 450×20×0,8 мм; материал – сталь 08Ю-ОСВ; количество образцов листового металла на каждый вид испытаний – 3; смазочный материал – индустриальное масло И-20; скорость нагружения образцов –

постоянная, 10 мм/мин. Поверхность чугуновых образцов (роликов) имела разные параметры шероховатости (табл. 16) для установления ее влияния на коэффициент трения. Для каждого варианта изготовления штампа (с нанесением нанопокрyтия методом ФПУ, с наплавкой бронзовых сплавов и без покрyтия) и каждого значения шероховатости проводили по три испытания по вытяжке ЭЦ стали и стали без покрyтия из черного проката.

Анализ результатов испытаний показывает, что коэффициент трения зависит от шероховатости, способа обработки поверхности и от использования черного или ЭЦ проката.

При любом варианте обработки поверхности образцов трение для ЭЦ проката оказывалось выше, чем для черного проката. В частности, в случае с необработанным штампом коэффициент трения возрастает на 24% и выше при переходе с черного проката на ЭЦ металл при $R_a = 0,6-1,4$.

При уменьшении шероховатости поверхности до $R_a = 0,07-0,08$ коэффициенты трения для чугуна без обработки и с ФПУ практически выравниваются. С увеличением шероховатости до значений $R_a = 0,4-1,4$ линии на графиках идут практически параллельно. Для значений $R_a = 0,6-1,0$, соответствующих значениям шероховатости штамповой оснастки, ФПУ позволяет сократить коэффициент трения на 11-13% для черного проката и на 22-25% для ЭЦ проката.

Дуговая наплавка бронзой для значений $R_a=0,85-0,9$ позволяет снизить коэффициент трения, но при этом коэффициент трения нанопокрyтия при ФПУ все же остается меньше. Таким образом, технология нанесения упрочняющего нанопокрyтия может конкурировать с технологией нанесения покрyтий методами наплавки.

Для ЭЦ проката испытания показали, что дуговая наплавка бронзой марки 1868 практически не дает эффекта, а для марки 1855 коэффициент трения оказался даже выше, чем для варианта без обработки.

Заключение

Вклад в исследования технологии ФПУ с нанесением упрочняющего нанопокрyтия внесли известные ученые Санкт-Петербургского государственного политехнического университета – проректор по научной работе Райчук Д.Ю. [1], профессор, д.т.н. Кархин В.А. (кафедра сварки и лазерных технологий) [43], профессор, д.т.н. Гиршов В.Л. (кафедра пластической обработки металлов [44], профессор, д.т.н. Демидов А.И. (кафедра физической химии, микро- и нанотехнологий) [45], профессор, д.т.н. Толочко О.В. (кафедра исследования структуры и свойств материалов) [46].

Преимущества технологии ФПУ с нанесением упрочняющего нанопокрyтия наряду с другими процессами нанесения износостойких покрyтий отмечены также учеными Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова (Санкт-Петербург) [47], Морского государственного университета им. Г.И. Невельского (Владивосток) [48].

Анализ практического применения вышерассмотренными коллективами ученых показал максимальную эффективность использования технологии ФПУ для ракетно-космической техники [15], авиационной промышленности [11], судостроения [32], горнодобывающей промышленности [3], автомобильной [27], дорожно-строительной [29] и сельскохозяйственной техники [28], металлургических производств [20], подшипниковой промышленности [24], металлообрабатывающих отраслей промышленности [5], двигателестроения [26], инструментальных производств [44], швейных производств [20], штамповочных производств [42], производств резинотехнических изделий [21], ремонтных производств агропромышленного комплекса [25], медицины [10] и других отраслей.

Таким образом, результаты приведенных исследований учеными различных организаций, а также внедрение и использование технологии ФПУ на многочисленных предприятиях России: ОАО «НПО «Сатурн», ОАО «Иркут», ОАО «ПО «Стрела», ОАО

«Омутнинский металлургический завод», ОАО «Электромашиностроительный завод «Лепсе», ОАО «Тяжмаш», ОАО «Чепецкий механический завод», ОАО «Волжский подшипниковый завод», ОАО «Новочеркасский тепловозостроительный завод» и многих других показали перспективность широкомасштабного освоения передовой нанотехнологии, разработанной российскими учеными.

Литература

1. Соснин Н.А., Вичик Б.Л., Ермаков С.А., Тополянский П.А., Райчук Д.Ю. Плазменное упрочнение изделий на базе серийной установки для сварки УПС-301 // ЭИ Всесоюз. научно-исслед. института научно - техн. пропаганды и экономики промышленности строительных материалов. Серия 15. Ремонт и эксплуатация оборудования. Вып. 6., М., 1987. С. 8-11.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во Политехнического ун-та. СПб.: 2008. 406 с.
3. Шмаков А.М., Анциферов В.Н., Буланов В.Я., Ханов А.М. Проблемы порошкового материаловедения. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. - 588 с.
4. Анциферов В.Н., Ханов А.М., Матыгуллина Е.В., Ташкинова Л.А. К оценке износостойкости тонких оксидно-карбидных покрытий. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 7-й Международной практической конференции-выставки 12-15.04.2005 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2005. - С. 253-255
5. Каменева А.Л. Использование покрытий на основе SiC и SiO₂ для упрочнения режущего инструмента. Порошковая металлургия. - 2003. № 11-12. - С. 111-117
6. Ханов А.М., Сиротенко Л.Д., Ташкинова Л.А., Чигодаев Н.Е. Технологии напыления и наплавки покрытий. Сварка и контроль - 2004. Т. 3. Сварочные материалы. Технология. Сварочное оборудование: Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция, Пермь, 17-20.05.2004:- Пермь, 2004. - С. 117-123
7. Каменева А.Л., Ханов А.М. Влияние технологических и конструктивных особенностей источника плазмы на процесс формирования и стадии роста плазменных покрытий. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 8-ой практической конференции 11-14.04.2006 г. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического ун-та. Санкт-Петербург.2006. ч. 2. - С. 45-56
8. Коновалов С.И., Стефаненков П.Н. Ремонт и упрочнение хромовых покрытий. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции 14-17.04.2009 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2009, Ч. 2. С.151-153
9. Коновалов С.И., Стефаненков П.Н. Восстановление и упрочнение зубьев крупномодульных передач. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 12-й Международной научно-практической конференции 13-16.04.2010 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2010, Ч. 2. - С. 179-180
10. Летягин Е.В., Летягина Р.А., Ханов А.М. Способ протезирования при отсутствии коронковой части зуба. Патент РФ RU2284794, МПК А61С13/30 (2006.01), опубл. 10.10.2006
11. Барвинок В.А., Богданович В.И., Ананьева Е.А., Костышев В.А., Сима Л.И., Косырев С.А., Тополянский П.А. Упрочнение периферии лопаток компрессоров авиационных двигателей с целью предотвращения снижения усталостной прочности после касания о статор. Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 5-й

- Международной практической конференции-выставки 8-10.04.2003 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2003. – С. 206-227
12. Чеховой А.Н., Прокопова Т.Н., Бычков В.М. Квазиаморфный металлокерамический инструмент нового поколения. Конструкции из композиционных материалов. - 1999. № 3. - С. 13-19
 13. Чеховой А.Н. Физико-химические основы наноструктурного упрочнения металлокерамики инструментального и триботехнического назначения. Конструкции из композиционных материалов. - 2002. № 1. - С. 5-11
 14. Чеховой А.Н. Нанотехнология вокруг нас. Синергетика наноструктурирования в промышленности и экологии. М.: Изд-во ООО «Эксподизайн», 2005. - 114 с.
 15. Медведев А.А., Меньшиков В.А., Голованев И.Н., Дубовой А.Н., Чеховой А.Н. Возможности использования нанотехнологии при изготовлении изделий ракетно-космической техники. Конструкции из композиционных материалов. - 2006. № 1. - С. 64-72
 16. Чеховой А.Н. Синергетика наноструктурирования (нанотехнологии для машиностроения). Справочник. Инж. журн.-2006.- № 9. Приложение. - С. 1-24
 17. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Блинков И.В., Волхонский А.О. Исследование морфологии и элементного состава поверхностных слоев после финишного плазменного упрочнения. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 12-й Международной научно-практической конференции 13-16.04.2010 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2010, Ч. 2. – С. 286-291
 18. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Блинков И.В., Дзидзигури Э. Л. Рентгенофазовый анализ поверхностных слоев после финишного плазменного упрочнения. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 12-й Международной научно-практической конференции 13-16.04.2010 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2010, Ч. 2. - С. 292-296
 19. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Блинков И.В., Скрылева Е. А. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия поверхностных слоев после финишного плазменного упрочнения. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 12-й Международной научно-практической конференции 13-16.04.2010 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2010, Ч. 2., С. 297-299
 20. Коротков В.А., Бердников А.А., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. Челябинск: Изд-во Металл, 1993. - 144 с.
 21. Пархимович Э.М., Голозубов А.Л. Исследование физико-механических и триботехнических свойств тонкопленочных упрочняющих покрытий. Трение и износ. - 1995. Т.16. № 4. - С. 766-771
 22. Голозубов А.Л. Разработка процесса и оптимизация технологии нанесения тонкопленочных упрочняющих кремнийсодержащих покрытий осаждением из дуговой плазмы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н., Могилев, 1999, 21 с.
 23. Голозубов А.Л. Автоматизация процесса нанесения упрочняющих тонкопленочных покрытий из дуговой плазмы. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 7-й Международной практической конференции-выставки 12-15.04.2005 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2005. - С. 260-268
 24. http://uravia.narod.ru/p_php.htm

25. Батищев А.Н., Ферябков А.В., Шевченко Г.В. Упрочнение деталей машин покрытиями, синтезированными из газовой фазы. Вестник ОрелГАУ, 2009. № 1. - С. 21-24
26. Шарифуллин С.Н., Адигамов Н.Р. Пути повышения эффективности топливной аппаратуры автотракторных двигателей. – Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008. – 296 с.
27. Адигамов Н.Р., Тополянский П.А., Тополянский А.П., Шарифуллин С.Н., Михайлов В.А. Новые возможности безвакуумных плазменных технологий по увеличению ресурса работы топливных насосов высокого давления дизельных двигателей. Тр. ГОСНИТИ. М. (в печати)
28. Землянушнова Н.Ю., Лебедев А.Т., Захарин А.В. и др. Технология финишно-плазменного упрочнения. Ставрополь.: Аргус. 2008. - 64 с.
29. Землянушнова Н.Ю. Совершенствование технологии ремонта колец опорно-поворотных устройств. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. №4. - С. 34
30. Ильичев Л.Л. Повышение работоспособности осевого режущего инструмента за счет комплексного (ЭИЛ+ФПУ) метода нанесения покрытий. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: В 2 ч. Часть 2: Материалы 13-й Международной научно-практической конференции, 12-15.04.2011 г., СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 148-150
31. Хмелевская В.Б., Леонтьев Л.Б., Лавров Ю.Г. Технологии восстановления и упрочнения деталей судовых механизмов и триботехнические характеристики покрытий. – СПб.: СПГУВК, 2002. – 309 с.
32. Хмелевская В.Б., Леонтьев Л.Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами. В 3-х т. Т.1 Современные методы восстановления и упрочнения деталей. Владивосток. Дальнаука. 2003. - 283 с.
33. Хмелевская В.Б., Порозов В.А., Светлов Р.С., Лазарев С.Ю. Исследования свойств покрытий для восстановления деталей гидротехнических сооружений и судовых механизмов. Металлообработка. 2006. № 4. - С. 37-41
34. Мяконьков М.Б., Хмелевская В.Б. Сравнительные исследования способов нанесения покрытий на поршневые кольца для уменьшения их износа. Металлообработка. 2010. № 3. - С. 36-40
35. Хмелевская В.Б., Лазарев С.Ю., Порозов В.А., Слепнёв Р.Ю., Тимофеев В.И. Методика оценки триботехнических параметров покрытий применительно к деталям судовых механизмов и гидротехнических сооружений шлюзов. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 8-ой практической конференции 11-14.04.2006 г. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического ун-та. СПб.2006. Ч. 2. - с. 134-143
36. Хмелевская В.Б., Тополянский А.П., Козлов Ф.В., Алексеев С.Б., Порозов В.А. Исследования повышения надёжности зубчатых передач грузоподъёмного оборудования. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 9-й практической конференции 10-13.04.2007 г. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического ун-та. Санкт-Петербург.2007. Ч.2. - С. 285-289
37. Хмелевская В.Б., Кизилова А.А., Ярославцев А.И., Юсупов Ш.Ф. Исследование триботехнических характеристик при упрочнении механизмов гидротехнических сооружений. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции 14-17.04.2009 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2009, Ч. 2. - С. 333-336
38. Хмелевская В.Б., Федосов А.В., Тополянский А.П., Сабуров С.А., Гаврилюк Р.С., Мяконьков М.Б. Износостойкие покрытия для подшипников качения.

- Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 12-й Международной научно-практической конференции 13-16.04.2010 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2010, Ч. 2. - С. 362-364
39. Горленко А.О., Шупиков И.Л., Тополянский П.А., Тополянский А.П. Модификация рабочих поверхностей деталей из конструкционных и инструментальных материалов нанесением упрочняющего нанопокрyтия. *Металлообработка*, 2012, № 2 (в печати)
 40. Устинов А.А., Студенцов В.М., Шмельков А.Н., Баловнев М.В. Износостойкость покрытий, полученных финишным плазменным упрочнением. Технолог по сварочному производству промышленных предприятий, объектов энергетики и строительства. Материалы 2-й Всероссийской практической конференции 6-8.06.2001 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГТУ. Санкт-Петербург.2001, - С. 55-57
 41. Рязанов Д.А., Соснин Н.А., Студенцов В.М. Поверхностное упрочнение инструмента методом плазменного нанесения аморфного SiC. XXX юбилейная неделя науки СПбГТУ. Мат. межвузовской научной конференции, 26.11-1.12. 2001 г., Изд-во СПбГТУ, 2002, С. 35
 42. Аманов С.Р., Кислов А.В., Юков А.В. Влияние поверхностной обработки штампов на коэффициент трения при вытяжке. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2003, № 1, С. 35-39
 43. Кархин В.А., Соснин Н.А., Тополянский А.П., Тополянский П.А., Ермаков С.А. Моделирование теплообмена тонкопленочного покрытия с основой при финишном плазменном упрочнении//Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 8-ой практической конференции 11-14.04.2006 г. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического ун-та. Санкт-Петербург.2006. - С. 57-67
 44. Гиршов В.Л., Тополянский П.А. Металлорежущий инструмент из порошковой стали с дисперсной структурой и алмазоподобным нанопокрyтием. *Металлообработка*. - № 1(49). - 2009. - С. 43-49
 45. Демидов А.И., Батунова Л.П., Тополянский П.А., Карандашев А.Н. Электрохимический метод определения степени дефектности тонкопленочных износостойких покрытий. Материалы 11 Всероссийской конф. по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», 18-19.05.2007 г, СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2007. - С. 275-276
 46. Тополянский П.А., Толочко О.В., Рябчинская Л.В. Исследование тонкопленочных плазменных покрытий на основе кремния методом инфракрасной спектроскопии. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: В 2 ч. Часть 2: Материалы 13-й Международной научно-практической конференции, 12-15.04.2011 г., СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - С. 318-325
 47. Инструментальные материалы. Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Леонов А.Ф., Ерофеев В.К. СПб.: Политехника, 2005. - 268 с.
 48. Леонтьев Л.Б. Технологическое обеспечение надежности судового оборудования. Владивосток, Изд-во Морского гос. ун-та, 2009. – 544 с.