

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТУ СЛОЖНОГО КОНТАКТНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

*Рассмотрена износостойкость трибосопряжений в условиях многокомпонентного динамического нагружения. Обоснована целесообразность формирования износостойкого поверхностного слоя деталей на основе многослойно-композиционной архитектуры с нанометрической структурой различного композиционного состава и функционального назначения. Показана перспективность создания покрытия с совмещением второго и третьего слоев в единый слой, состоящий из нанокристаллитов разного размера и противоположной ориентации.*

*Ключевые слова:* изнашивание; многокомпонентное нагружение; трение; поверхностный слой; покрытие.

## Введение

В настоящее время коммерческий и исследовательский интерес в области совершенствования износостойких материалов направлен на разработку композиционных материалов в которых варьирование структурными эффектами и выбор фазовых составляющих позволяет конструировать покрытие—материал так, чтобы комбинировать свойства, необходимые для условий эксплуатации детали. При этом сочетаются высокие физико-химические свойства поверхностного слоя и необходимые свойства основы (высокая прочность, ударная вязкость, трещиностойкость и т.д.). Механическая прочность деталей и конструкций обеспечивается одним материалом, а специальные свойства — другим, т.е. материалом покрытия или нового структурного состояния поверхностных слоев материала детали. Эти задачи решаются методами инженерии поверхности.

## Постановка задачи

Одним из перспективных направлений является создание на поверхности детали материала слоистой структуры с градиентным распределением свойств по глубине. Анализ работ по созданию износостойких композиционных материалов с покрытиями показал, что на современном этапе работы направлены на разработку и совершенствование покрытий, приведших к созданию многослойных покрытий на основе карбидов, нитридов, боридов и других соединений тугоплавких металлов, в том числе с подслоями из чистых металлов. Такое покрытие состоит из нескольких промежуточных слоев, каждое из которых имеет собственное функциональное назначение.

Однако возможность создания новых покрытий за счет изменения их фазового и химического состава в основном исчерпана. Дальнейшим перспективным направлением в разработке новых износостойких материалов является создание требуемой структуры материала (например, образование на поверхности детали слоистой структуры).

Особую актуальность имеют вопросы создания износостойких покрытий для деталей трибосопряжений, которые работают в условиях сложного динамического нагружения. Необходимо учитывать, что большая часть деталей трибосопряжений различных машин и механизмов в процессе эксплуатации находится в условиях удара с проскальзыванием и удара с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях в связи с функциональными взаимными перемещениями в разных направлениях, наличием вибраций или их комбинациями (рис. 1).

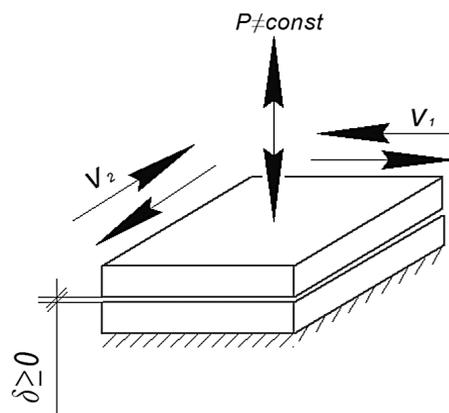


Рис. 1. Схема трехкомпонентного нагружения трибосопряжений плоских деталей при осциллирующем скольжении с ударной нагрузкой

В большой мере это относится к деталям газотурбинных установок (ГТУ). Как показывает анализ конструкционного исполнения и особенностей изнашивания деталей авиационного двигателя, ряд деталей эксплуатируются в большей степени в условиях нагружения в виде соударения с проскальзыванием (двухкомпонентное нагружение) — бандажные полки рабочей лопатки турбины и лопатки соплового аппарата, корпус внутренний соплового аппарата, штифт фиксирующий камеры сгорания. Нагружению в виде соударения с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях (трехкомпонентное нагружение) в большей степени подвержены зубья ведущей и ведомой шестерен, козырек межпазового выступа диска IV ступени, трактообразующий козырек диска II ступени и диск КВД, хвостовик лопатки компрессора и III ступени КНД, контрвочный замок в месте контакта с хвостовиком лопатки компрессора низкого давления, торцевые шлицы диска, центробежного колеса компрессора и торцевые поверхности внутреннего полукольца шарикоподшипника вспомогательной силовой установки и другие [1]. При этом указанное разделение трибозлоупотреблений по видам нагружения условно, учитывая их изменение в процессе работы вследствие возникновения вибраций, действующих в различных направлениях.

### Основная часть

В изделиях авиационной техники практически на все металлические детали и узлы наносятся те или иные покрытия в целях защиты их от коррозии, действия высоких температур и придания требуемого декоративного вида. К применяемым в производстве летательных аппаратах покрытиям предъявляются требования: высокая износостойкость, способность к многоцикловому динамическому воздействию (сопротивлению динамическим нагрузкам), высокая трещино-коррозионная стойкость [2].

Покрытия триботехнического назначения должны обеспечивать, с одной стороны, низкий коэффициент трения, определяемый малым значением сдвигового сопротивления, а с другой — достаточно высокую твердость и прочность поверхностного слоя, которые определяют сопротивление механическим видам разрушения и изнашивания. Износостойкий материал с идеальными свойствами должен обладать сбалансированным сочетанием высокой твердости и вязкости, иметь химическую инертность относительно материала сопряженной детали и сохранять свойства при повышении температуры. Более твердые и более износостойкие материалы обладают меньшей вязкостью и стабильностью свойств при циклических нагрузках,

также как при нестабильных условиях или при прерывистом резании. Материалы, которые лучше сопротивляются различным механическим и термическим нагрузкам часто хуже сопротивляются изнашиванию. Таким образом, твердость и вязкость являются противоположными свойствами и в настоящее время не существует материала, который бы интегрировал все указанные свойства одновременно [3-5]. Для преодоления двойственности противоречий свойств производят различные износостойкие материалы композиционного типа.

В частности, разработаны слоистые инструментальные материалы, в которых комбинируются слои из вязких и прочных твердых сплавов и высокопрочной и теплостойкой керамики [6]. Эффективность и надежность покрытий для режущего инструмента в значительной степени определяется адекватным критериальным подходом к оценке их прочностной надежности, которая является основой для оптимизации структурных типов. Являясь механической характеристикой сопротивления материала пластической деформации, микротвердость, однако, не содержит информации о разрушении, которое, как известно, является основной причиной преждевременного выхода хрупких износостойких покрытий из строя.

В реальных условиях, чтобы повысить сопротивление деформированию необходимо создать на пути движения дислокаций барьеры. Анализ механизмов разрушения и изнашивания показал, что необходим материал с плавным изменением физико-механических свойств от поверхности к объемам, с высокими триботехническими свойствами поверхностей. Получение объемных субмикроструктурных и нанокристаллических материалов, обладающих уникальными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками, становится одной из важнейших задач. В этой связи разработка износостойкого материала в виде слоистого композита является актуальной научной проблемой, рассматриваемой в настоящей статье.

Оценка закономерностей формирования структурно-фазового и упруго-напряженного состояния таких композиций на основе вариации состава и условий создания позволяют, как сформировать многофазную систему, так и целенаправленно менять величины параметров структурного состояния по толщине покрытия, регулируя эффективность его функциональных слоев. При этом в условиях переменных нагрузок в зоне контактирования большие перспективы имеют наноструктурированные покрытия. Ультрадисперсные материалы с увеличенной площадью межзеренных границ имеют более сбалансированное соотношение между твердостью, оказывающей определяющее положительное влияние на износостойкость и прочностными характеристиками материала, в том числе и в усло-

виях действия циклических термомеханических напряжений. Известно, что первопричиной разрушения материалов стандартной (микрометрической) структуры с размерами зерен свыше  $d > 1$  мкм является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов. В наноструктурированных материалах с размерами зерен менее  $d < 80...100$  нм проявляется иной механизм разрушения. Для подобных материалов превалирующей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах.

Как показали предварительно проведенные исследования состояние поверхностного слоя деталей трибосопряжений изменяется в процессе структурной приспособляемости материала при трении. При этом величина и распределение износа по контактной поверхности зависит от распределения нормальной динамической нагрузки. Существует взаимосвязь износостойкости и структурного состояния поверхности трибосопряжений при многокомпонентном термомеханическом нагружении. Повышенный износ происходит у деталей с однородным по величине кристаллитов (фрагментов) равнопрочным поверхностным слоем, который характеризуется снижением прочности, более равномерной микрогеометрией поверхности, низкими значениями величины и разброса работы выхода электрона по поверхности [1, 7, 8]. Сформированная в процессе многокомпонентного термомеханического трения дисперсная структура выполняет функцию диссипативной структуры в рамках синергетического подхода, которая самоорганизуется в условиях сложного динамического контактирования с получением оптимального по износостойкости состояния. Пластически-деструктивный характер поведения металла при трении должен рассматриваться как физико-химический, т.е. процесс который сопровождается комплексом структурных, физических и физико-химических изменений поверхностного слоя деформируемого металла. Это позволяет сформулировать триботехнический принцип минимизации износа и износостойкой способности материалов, состоящий в создании таких условий контактирования, когда формируется поверхностный слой с неоднородным по прочности и величине кристаллитов структурным состоянием повышенной прочности [9].

С учетом тяжелых условий термомеханического нагружения деталей рассматриваемых трибосопряжений была сформулирована концепция градиентного износостойкого материала со сбалансированным сочетанием основных свойств, способного противостоять нагружению в виде соударения с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2).

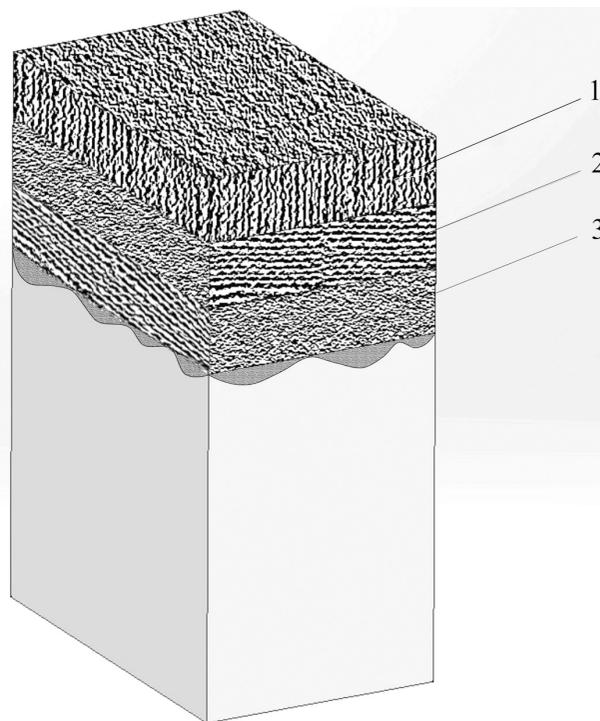


Рис. 2. Архитектура градиентного слоисто-композиционного материала с нанодисперсным многослойным покрытием устойчивого при трехкомпонентном нагружении

1 – ударостойкий слой; 2 – слой противостояния продольному проскальзыванию; 3 – слой противостояния поперечному проскальзыванию

Материал имеет трехслойную нанодисперсную архитектуру различной твердости, включающую ударостойкий слой столбчатой или игольчатой структуры и двух текстурированных слоев с противоположно направленным расположением кристаллитов для противостояния изнашиванию при проскальзывании деталей в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом верхний и третий слой должны иметь повышенную твердость, а более мягкий средний слой будет способствовать релаксации контактных нагрузок.

Под действием направленного внешнего воздействия система концентраций напряжений эволюционирует, стремясь к равновесию. Происходит постоянная конкуренция процессов деформационного упрочнения в локальных областях деформируемой среды, с одной стороны, и релаксации напряжений, с другой. Наличие предложенного слоистого покрытия позволит исключить затраты энергии на проведение процесса структурной организации поверхностного слоя контактирующих деталей и будет способствовать повышению его износостойкости.

Установлено, что границы раздела слоевой структуры и нанокристаллический поверхностный слой являются местами преимущественного торможения радиальных трещин вдоль границ столбчатых кристаллов и распространения наклонных тре-

щин, интенсивное ветвление которых наблюдается в нанокристаллическом слое. Факторами, способствующими повышению прочности (вязкости разрушения) покрытий при переходе от однослойных к градиентно-слоистым покрытиям являются: упрочнение поверхностного слоя за счёт перевода его в нанокристаллическое состояние; ветвление мелкодисперсных трещин в поверхностном слое; градиентно-слоистая структура с протяжёнными границами раздела, тормозящими распространение трещин вглубь материала; развитие полос локализованной деформации в градиентно-слоистом нанокристаллическом покрытии [10].

Различные условия нанесения и химический состав покрытий позволяют варьировать дисперсность и структурное состояние градиентного слоистого материала. Характерное трансформирование текстуры формируемого покрытия, которое сопровождается изменением твердости и износостойкости, дает возможность получать оптимальные структуры с соответствующим комплексом свойств. В том числе получение анизотропной (столбчатой) структуры, что соответствует возрастанию прочности и твердости, но снижению пластичности [11,12]. Высокопрочная игольчатая структура может быть достигнута в процессе диффузионного барирования [13]. Наличие игольчатой структуры, пророщенной в стальную подложку, предотвращает отслоение покрытия. Чем выше скорость нагружения, тем выше текущее напряжение течения стальной основы, тем меньше разница в механических свойствах между упругим покрытием и пластичной подложкой, тем меньше концентрация напряжений и, соответственно, тем позднее происходит разрушение покрытия.

Для покрытий столбчатой структуры характерно расположение зерен перпендикулярно границе раздела «покрытие — основа». Разрушение таких покрытий происходит именно в этом направлении. Учитывая, что развитие трещины в покрытии происходит перпендикулярно границе раздела «покрытие — инструментальная основа» (в направлении роста зерен), разрушение покрытия будет определять напряжения, которые действуют в покрытии вдоль этой границы [14]. Изменяя конструкцию многослойного покрытия, можно влиять на его структурные параметры, механические свойства и управлять интенсивностью износа, динамикой разрушения покрытия в процессе эксплуатации детали.

Согласно работе [15] возникновение адгезионного взаимодействия между поверхностями возможно при образовании общих связей за счет электронного обмена, что приводит к уменьшению общей энергии системы. Это является следствием увеличения локализации элементов в стабильные конфигурации, повышение доли конфигураций

промежуточного спектра [16]. Поэтому для реализации предлагаемой концепции архитектуры нанодисперсного многослойно-композиционного покрытия текстурирование второго и третьего слоев должно осуществляться с ориентацией кристаллитов по направлению перпендикулярном проскальзыванию поверхностей контактирования. Преимущественная ориентация кристаллитов в одинаковом направлении способствует анизотропии свойств материала покрытия, что может благоприятно влиять на эксплуатационные параметры, приводя, например, к росту микротвердости и износостойкости.

Требуемая направленность кристаллитов второго и третьего слоя предлагаемого нанодисперсного композиционного материала может быть достигнута за счет определенных условий нанесения [2,11-13]. При этом возможно формирование в пленках сильной аксиальной текстуры в направлении нормали к поверхности, росту количества дефектов кристаллического строения и увеличению сжимающих остаточных напряжений. Высокая твердость обусловлена крайне дефектной кристаллической решеткой и высоким уровнем сжимающих остаточных напряжений, которые препятствуют движению дислокаций и развитию пластической деформации [17]. Например, в электроэрозийноустойчивых покрытиях всех систем выявлены дислокационные субструктуры различных типов — ячеистая, полосовая, фрагментированная, хаотическая и сетчатая. Основным типом является полосовая субструктура. Ячеистая, полосовая, фрагментированная, субзеренная структуры являются разориентированными — от 2,7 до 4,7 град, что имеет существенное значение, т.к. источниками полей напряжений в покрытиях являются границы раздела: внутрифазные (границы раздела зерен, субзерен, полосовой субструктуры) и межфазные (границы раздела частица/матрица) [18]. Следует отметить, что границы субзерен или ячеек, создающие лишь слабую разориентировку соседних областей кристалла (порядка 1°), легко преодолеваются дислокациями и поэтому не являются эффективными барьерами, приводящими к зарождению микротрещин [14].

Кроме того, в случае послойного получения требуемого покрытия перспективными средствами формирования направленных текстурированных субмикрокристаллических и нанокристаллических материалов на сегодня, являются методы интенсивной пластической деформации. При этом могут быть использованы механизмы образования и трансформирования вторичных структур, возникающих в процессе структурной приспособляемости материалов при трении. Определенная величина, однородность и направленность кристаллитов поверхностного слоя достигается за счет изменения условий нагружения при трении [8, 19, 20].

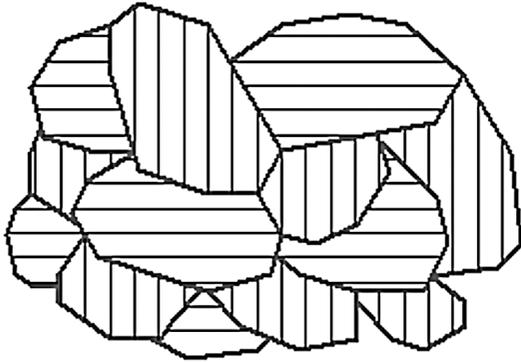


Рис. 3. Схематическое изображение нанокристаллитов разного размера и противоположной ориентации

Причем, необходимо учитывать, что эффективное повышение износостойкости рассматриваемых трибосопряжений с наличием слоистых покрытий возможно в случае восприятия трехкомпонентного динамического контактного нагружения одновременно всеми слоями покрытия, т.е. покрытие должно функционировать как целостный материал. В связи с этим одним из перспективных направлений создания подобного покрытия является совмещение второго и третьего слоев в единый слой, состоящий из нанокристаллитов разного размера и противоположной ориентации (рис. 3).

Ввиду структурной неоднородности материала его пластическая деформация как целого может осуществляться лишь путем совместной деформации отдельных структурных элементов, под которыми мы понимаем однородные участки кристаллитов. По мере деформации материала происходит блокирование сдвигов в пределах структурных элементов, в результате чего растут внутренние микронапряжения, которые являются основной причиной деформационного упрочнения при относительно малых пластических деформациях.

Возможность получения подобных структур была подтверждена экспериментально [21]. Повышенную твердость могут образовывать покрытия, состоящие из смеси нанозерен одного и того же материала, но различных кристаллографических ориентаций и решетчатых структур. Как отмечено в работе [22], для увеличения твердости подобных материалов важным является два фактора: размер кристаллитов должен в общем случае быть меньше 10 нм в направлении деформации, чтобы помешать движению дислокаций, а среднее расстояние между зернами не должно превышать 0,5 нм, чтобы препятствовать зарождению и развитию трещин. Тем не менее, зависимость твердости и предела текучести от размера зерен имеет сложный и неоднозначный характер, что связывают с особенностями деформирования наноструктурных материалов — взаимным проскальзыванием зерен по границам (иногда называемом ротационным разупрочнени-

ем). Кроме того, для больших зерен рост прочности и твердости при уменьшении их размера обусловлен введением дополнительных границ зерен, которые являются препятствием для движения дислокаций. При малых наноразмерных зернах рост прочности происходит благодаря низкой плотности имеющихся дислокаций и трудности образования новых.

Существуют различные способы получения поверхностного слоя с разноориентированными кристаллитами [23]: метод шаблонов (темплатный метод), получение наноструктур в нанореакторах, литографически индуцированная самосборка наноструктур, интенсивная пластическая деформация.

В частности, к фрагментированию и разориентированию структуры приводят большие деформации (например, кручение при сжатии, равноканальное угловое прессование). Основной особенностью наноструктур, полученных под действием пластической деформации, является наличие неравновесных границ, которые служат источником больших упругих напряжений. Это приводит к возникновению большого количества дислокаций, которые, в основном, сосредоточены на поверхности нанокластеров, и сохранению избыточной энергии наноструктуры. При этом формируются наноструктуры с нанокристаллитами разного размера и ориентации [24, 25]. Однако степень деформации и даже скорость деформации не являются определяющими факторами размера зерна. Наиболее важна схема деформации, обеспечивающая как можно большее количество изменений направлений максимальных сдвигающих напряжений, как это имеет место, например, в винтовой экструзии [26].

На примере винтовой экструзии и прокатки со сдвигом показано, что данные схемы деформации приводят к измельчению структуры, однородному распределению зерен, формированию преимущественно высокоугловых границ зерен [27]. В частности винтовая экструзия приводит к снижению текстурированности в поперечном сечении, формированию мелкодисперсной структуры с преимущественно равноосными зернами и выраженной разнотекстурностью. При этом наблюдается неоднородность структуры в продольном сечении — преобладают вытянутые зерна [28].

Причем, как указано в работе [29], поля остаточных упругих напряжений, локализованные в таких слоях, влияют на морфологические и фазовые изменения структуры, что приводит к изменению свойств материалов не только на их поверхностях, но и в объеме. Очевидно, что приповерхностная структура должна зависеть от ориентации зерна исходной фазы относительно направления внешней действующей силы. Показано, что для него характерна существенная неоднородность микроструктуры, обусловленная высокой локальной

неоднородностью полей внутренних напряжений, вызванной, главным образом, несовместностью деформации различно ориентированных зерен.

Существенное значение на эффективность эксплуатации износостойкого градиентного слоисто-композиционного материала оказывает толщина каждого слоя нанодисперсного многослойного покрытия. Согласно рекомендациям большинства авторов толщина слоев композиционного материала с реализацией эффекта дисперсного упрочнения должна быть до 60 нм. Причем, чем меньше толщина слоя покрытия, тем выше значение критической нагрузки его разрушения. При этом прочность нанокompозита увеличивается путем предотвращения сдвига границ зерен (проскальзывания) [30]. Оптимальной является толщина покрытия в 2...2,5 раза превышающая характерный размер неровностей границы раздела «покрытие-подложка». Неровность границы раздела может быть связана с шероховатостью поверхности изделия, на которое наносится покрытие [31].

### Выводы

Таким образом, создание износостойких покрытий наиболее эффективно осуществлять при использовании инновационной концепции многослойно-композиционных архитектуры с нанометрической структурой и чередующимися слоями наноразмерной толщины различного композиционного состава и функционального назначения.

Разработана концепция износостойкого материала в форме слоистой композиционной структуры. Предложена и обоснована физическая модель строения износостойкого материала слоистой структуры с градиентом свойств по глубине поверхностного слоя, состоящая из трех основных слоев различной текстуры. При этом сочетаются твердая и мягкая фазы для придания покрытию упругопластических свойств. Применение рекомендованного градиентно-слоистого покрытия позволит противостоять воздействию нагружения в виде удара с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Одним из перспективных направлений создания подобного покрытия является совмещение второго и третьего слоев в единый слой, состоящий из нанокристаллитов разного размера и противоположной ориентации.

### Литература

[1] Ивченко, Л.И. Повышение износостойкости трибосопряжений ГТД при сложном термомеханическом нагружении изменением структурного состояния поверхностного слоя /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Технологические системы.– 2013.– №2.– С.13-21.  
[2] Андреев, А.А. Эффективные наноструктурные многослойные покрытия для режущих инструментов и

деталей медицинского назначения, работающих в динамическом режиме /А.А. Андреев, Г.И. Костюк, Н.А. Минаев //Авиационно-космическая техника и технология. – 2012.– № 2 (89).– С.28-33.

[3] Верещака, А.А. Слоистый композиционный инструментальный материал с нано-дисперсным покрытием /А.А. Верещака // Сборники научных работ НТУ "ХПИ" : Високи технології в машинобудуванні №1 - НТУ "ХПИ". –2012.– С.34-44.  
[4] Елютин, А.В. Методологические принципы создания высокопрочной градиентно-слоистой керамики с покрытием для скоростной лезвийной обработки без применения СОТС /А.В. Елютин, В.Н. Аникин, И.В. Блинков, А.С. Верещака //Труды конгресса "Конструкторско-технологическая информатика 2000".– Том 1. –М.: МГТУ "СТАНКИН". – 2000. – С.180 – 182.  
[5] Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием /А.С. Верещака – М.; Машиностроение. –1993. – 368 с.  
[6] Верещака, А.С. Методические принципы создания функциональных покрытий нового поколения в инструментальном производстве /А.С. Верещака, С.Н. Григорьев, В.П. Табаков //Инженерный журнал. Справочник, –2011.–№12 (177).– С.13 – 22.  
[7] Ивченко, Л.И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, И.М. Закиев //Трение и износ. – 2011.– Т.№32, №1.– С.500 – 509.  
[8] Ивченко, Л.И. Структурная самоорганизация деталей трибосопряжений в условиях сложного термодинамического нагружения /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, М.В. Фролов //Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – 2012. – №3(59) – С.5–11.  
[9] Ивченко, Л.И. Моделирование износостойкости трибосопряжений при сложном динамическом нагружении /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов //Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – №7. – С.31–36.  
[10] Овчинников, С.В. Структурные особенности деформации наноструктурированных легированных покрытий на основе нитрида титана /С.В. Овчинников, А.Д. Коротаев, Ю.П. Пинжин //Материалы 55-й Междунар. конф. Актуальные проблемы прочности. 9-13 июня 2014 года. Харьков, Украина: Сборник материалов.– Харьков: ННЦ ХФТИ. –2014. – С.99.  
[11] Андреев, А.А. Исследование фазового состава, структуры и свойств многослойных вакуумно-дуговых нанокристаллических покрытий Ti-Mo-N / А.А. Андреев, О.В. Соболев, В.Ф. Горбань, В.А. Столбовой, В.В. Мамон //ФІП ФІП PSE.– 2010.– т. 8, № 1. – С.28-35.  
[12] Гречанюк, Н.И. Современное состояние и перспективы применения технологии высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для

- получения материалов электрических контактов и электродов /Н.И. Гречанюк, Р.В. Минакова, О.П. Василега, Г.Е. Копылова, И.Н. Гречанюк, Б. Медзинский //Электрические контакты и электроды. – К.: ИПМ НАН України, 2010. – С.54-67.
- [13] Балохонов, Р.Р. Численный анализ механизмов деформации и разрушения материалов с покрытиями на мезоуровне /Р.Р. Балохонов, В.А. Романова, Р.А. Бакеев, Е.А. Шваб //Междунар. конф. Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика, Новосибирск, Россия, 30.05-04.06.2011. – Новосибирск.– 2011.– С.1-6.
- [14] Табаков, В. П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания /В.П. Табаков, А.В. Чихранов. Ульяновск: УлГТУ. – 2007.– 255 с.
- [15] Мацевитый, В.М. Влияние износостойких покрытий на контактное взаимодействие режущих инструментов с обрабатываемым материалом /В.М. Мацевитый, Е.С. Удовенко, И.Б. Казак и др. //Сб. науч. трудов “Физика износостойкости поверхности металлов”. – Ленинград: ФТИ им.А.Ф.Иоффе. – 1989. – С. 201-205
- [16] Самсонов, Г.В. Конфигурационная модель вещества /Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко– К.: Наукова думка. – 1971. – 229 с.
- [17] Васильев, В.В. Структура и твердость Ti-N- и Ti-Si-N-покрытий, осажденных из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы /В.В. Васильев, А.А. Лучанинов, Е.Н. Решетняк, В.Е. Стрельницкий, Г.Н. Толмачева, М.В. Решетняк //Вопросы атомной науки и техники.– 2009.– №2.– С. 173-180.
- [18] Романов, Д.А. Исследование дислокационной субструктуры, формирующейся в электроэрозионных покрытиях /Д.А. Романов, О.В. Олесюк, Е.А. Будовских, Е.А. Громов //Тезисы докл. Междунар. конф. Физическая мезомеханика многоуровневых систем-2014. Моделирование, эксперимент, приложения.– 3-5 сентября 2014 г., Томск, Россия. – Томск: ИФПМ СО РАН.– 2014. – С.290-292.
- [19] Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении /Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов, Л.И. Бершадский, Н.Б. Костецкая, В.А. Ляшко, М.Ф. Сагач . – Киев: Техніка. – 1976.– 296 с.
- [20] Ившенко, Л.И. Структурная организация материалов сложнонагруженных трибосопряжений / Л.И. Ившенко, В.В. Цыганов // Вестник двигателестроения. – 2014. – №1. – С.28–33.
- [21] Brazkin, V.V. Harder than diamond: Dreams and reality /V.V. Brazkin, A.G. Laupin, R.J. Hemely //Philos. Mag. – 2002.– Vol. A82. No. 2.– P.231-253.
- [22] Азаренков, Н.А. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: учеб. пособие /Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Л.В. Маликов, П.В. Турбин.– Х.: ХНУ.– 2009.– 209с.
- [23] Минько, Н.И. Методы получения и свойства нано-объектов: учеб. пособие /Н.И. Минько, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, В.М. Нарцев. - М.: Флинта: Наука, 2009. – 168 с.
- [24] Birringer, R. Nanocrystalline Materials /R. Birringer, H. Gleiter //Clusters of Atoms and Molecules II .– Ed. H. Haberland. Berlin: Springer-Verlag.– 1994.– P. 384.
- [25] Суздальев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов /И.П. Суздальев. –М.: КомКнига.– 2006.– 592с.
- [26] Константинова, Т.Е. Эволюция дислокационной структуры металлических систем в условиях высоких давлений /Т.Е. Константинова //Физика и техника высоких давлений.– 2009. – том 19, № 1.– С.7-29.
- [27] Варюхин, В.Н. Применение метода ДОЭ для анализа структуры малоуглеродистой стали при различных деформационных обработках, включающих простой сдвиг /В.Н. Варюхин, А.В. Завдоев, Е.Г. Пашинская, В.М. Ткаченко, Ф.И. Глазунов //Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии (НАНСИС–2013): Тезисы IV Междунар. науч. конф. (Киев, 19–22 нояб. 2013 г.). – Киев.– 2013.– С.108.
- [28] Пашинская, Е.Г. Винтовая экструзия малоуглеродистой стали 20Г2С: структура и свойства /Е.Г. Пашинская, С.В. Добаткин, А.В. Завдоев, Н.Н. Белоусов, А.В. Макарова, А.А. Максакова //Матер. 55-й Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности» 9-13 июня 2014 года, Харьков, Украина: Сборник материалов. – Харьков: ННЦ ХФТИ. 2014. – С.176.
- [29] Мейснер, Л.Л. Механизмы фрагментации структуры приповерхностного слоя никелида титана в результате воздействия на него ионными пучками /Л.Л. Мейснер, Т.М. Полетика, С.Н. Мейснер, А.В. Твердохлебова, С.Л. Гирсова //Тез. докл. Междунар. конф. Физическая мезомеханика многоуровневых систем – 2014. Моделирование, эксперимент, приложения.– 3-5 сент. 2014 г, Томск, Россия. – Томск: ИФПМ СО РАН.– 2014. – С. 387-388.
- [30] Погребняк, А.Д. Влияние толщины наноразмерного слоя на структуру и свойства многослойных покрытий TiN/MoN /А.Д. Погребняк, В.М. Береснев, О.В. Бондар, Г. Abadias, Р. Chartier, Б.А. Постольный, А.А. Андреев, О.В. Соболев //Письма в ЖТФ.– 2014.– Т. 40, вып. 5.– С.59-66
- [31] Balokhonov, R.R. Influence of the coating thickness on strength of the coating–base material composite /R.R. Balokhonov, V.A. Romanova //Numerical simulation. Composites: Mechanics, Computations, Applications.– 2010.– 1. – P.1–13.

Ivschenko L. I., Tsyganov V. V.

Zaporozhye National Technical University. Ukraine, Zaporozhia

**METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF ENGINEERING OF SURFACE  
OF DETAILS OF GTU OF DIFFICULT PIN DYNAMIC LADENING**

*The wearproofness of tribojoints is considered in the conditions of multicomponent dynamic ladening. Expediency of forming of wearproof superficial layer of details is reasonable on the basis of multi – layered – composition architecture with the nanometrical structure of different composition composition and functional setting. Perspective of creation of coverage is shown with combination of second and third layers in a single layer consisting of nanofragments of different size and opposite orientation.*

Keywords: wear; multicomponent ladening; friction; superficial layer; coverage.

**References**

- [1] Ivschenko, L.I. Increase of wearproofness of tribojoints GTD at a difficult thermal and mechanical ladening the change of the structural state of superficial layer /L.I. Ivschenko, V.V.Tsyganov //Technological systems. – 2013. – №2. – P. 13–21.
- [2] Andreev, A.A. Effective nanostructural multi-layered coverages for toolpieces and details of the medical setting, working in the dynamic mode /A.A. Andreev, G.I. Kostyk, N.A. Minaev //Air-space technique and technology. – 2012. – № 2 (89). – P. 28–33.
- [3] Vereschaca, A.A. Composition instrumental laminate with nanodispersible coverage /of A.A. Vereschaca // Collections of the advanced studies of of NTU "HPI" : High-tech in engineer №1 – NTU "HPI". – 2012. – P. 34–44.
- [4] Elutin, A.V. Methodological principles of creation of the highly durable gradient are stratified ceramics with coverage for speed blades of treatment without application of SOTS /A.V. Elutin, V.N. Anekin, I.V. Blencov, A.S. Vereschaca //Labours of congress «Design – engineering informatics 2000». – Tom 1. – M.: MGTU "STANKIN". – 2000. – P. 180 – 182.
- [5] Vereschaca, A.S. A capacity of toolpiece with wearproof coverage / A.S. Vereschaca, – M.; Engineer. – 1993. – 368 p.
- [6] Vereschaca, A.S. Methodical principles of creation of functional coverages of new generation are in the instrumental production /A.S. Vereschaca, S.N. Gregorev, V.P. Tobacov //Engineering magazine. Reference book, – 2011. – №12 (177). – P. 13 – 22.
- [7] Ivschenko, L.I. Features of wear of tribojoints in the conditions of three-dimensional ladening /L.I. Ivschenko, V.V.Tsyganov, I.M. Zakiev //Friction and wear. – 2011. – T.№32, №1. – P. 500 – 509.
- [8] Ivschenko, L.I. Structura independent organization of details of tribojoints in the conditions of difficult thermodynamics ladening / L.I. Ivschenko, V.V.Tsyganov, M.V. Frolov //Announcer ChDTU. Series «Technical sciences». – 2012. – №3(59) – P. 5–11.
- [9] Ivschenko, L.I. Design of wearproofness of tribojoints at the difficult dynamic ladening /L.I. Ivschenko, V.V.Tsyganov //Friction and greasing in machines and mechanisms. – 2011. – №7. – P. 31–36.
- [10] Ovchinnirov, S.V. The structural features of deformation of the nanostructured alloyed coverages on the basis of nitrid of of titan /S.V. Ovchinnirov, A.D. Korotav, Yu.P. Pinyin //Materials of 55th the Internat. conf. of Issues of the day of durability. June, 9–13, 2014. Kharkiv, Ukraine: Collection materials. – Kharkiv : NNTs XFTU. – 2014. – P. 99.
- [11] Andreev, A.A. Research of phase composition, structure and properties of multi-layered vacuum-arc nanocrystalline coverages of Ti – Mo – N /A.A. Andreev, O.V. Sobole, V.F. Gorbane, V.A. Stolbovoy, V.V. Mamon //FIP FIP PSE. – 2010. – т. 8, № 1. – P. 28–35.
- [12] Grechanyk, N.I. Modern state and prospects of application of technology of high-speed cathode-ray evaporation and subsequent condensation in the vacuum of metals and non-metals for the receipt of materials of electric contacts and electrodes /N.I. Grechanyk, O.P. Vasilega, Y.V. Minakova, G.E. Kopylova, I.N. Grechanyk, B. Medzinsky //The electric contacts and electrodes. – K: IPM of NAN of Ukraine, 2010. – P. 54–67.
- [13] Balohonov, R.R. Numerical analysis of mechanisms of deformation and destruction of materials with coverages on mezolevel /R.R. Balohonov, V.A. Romanova, R.A. Bakeev, E.A. Shvab //Internat. conf. Modern problems of the applied mathematics and mechanics: theory, experiment and practice, Novosibirsk, Russia, 30.05–04.06.2011. – Novosibirsk. – 2011. – P. 1–6.

- [14] Tobacov, V.P. Wearproof coverages of toolpiece working in the conditions of the continuous cutting /V.P. Tobacov, A.V. Shihranov. — Ulyanovsk: UIGTU. — 2007. — 255 p.
- [15] Matsevitskiy, V.M. Influence of wearproof coverages on the pin co — operating of toolpieces with the processed material /V.M. Matsevitskiy, E.S. Udovenko, I.B. Cozack and other Coll. scient. labours of "Physicist of wearproofness of surface of metals". — Leningrad: FTI. — 1989. — P. 201–205.
- [16] Samsonov, V. The configuration model of substance /V. Samsonov, I.F. Preadco, L.F. Preadco — K.: Naukova dumka. — 1971. — 229 p.
- [17] Vasilev, V.V. Structure and hardness of Ti — N — and Ti — Si — N — the coverages, besieged from the filtered vacuum — arc plasma /V.V. Vasilev, A.A. Luchaninov, E.N. Reshetnyk, V.E. Strelnitskiy, M.V. Reshetnyk, G.N. Tolmacheva //Questions of atomic science and technique. — 2009. — №2. — P. 173–180.
- [18] Romanov, D.A. Research of the dislocation substructure, formed in electro — erosive coverages /D.A. Romanov, O.V. Olesyk, E.A. Budovskiy, E.A. Gromov //Theses of Internat. conf. Physical mezolevel of the multilevel systems — 2014. Design, experiment, appendixes. — September, 3–5, 2014, Tomsk, Russia. — Tomsk: IFPM RAN. — 2014. — P. 290–292.
- [19] Kostetsky, B.I. Superficial of durability of materials at the friction /B.I. Kostetsky, I.G. Nosovsky, A.K. Karaulov, L.I. Bershadsky, N.B. Kostetskay, V.A. Liashko, M.F. Sagach. — Kyiv : Technique. — 1976. — 296 p.
- [20] Ivschenko, L.I. Structural organization of materials of difficult ladening of tribojoints /L.I. Ivschenko, V.V.Tsyganov //Announcer of the propulsion engineering. — 2014. — №1. — P. 28–33.
- [21] Brazkin, V.V. Harder than diamond: Dreams and realiti /V.V. Brazkin, A.G. Laypin, R.J. Hemely //Philos. Mag. — 2002. — Vol. A82. No. 2. — P.231–253.
- [22] Azarenkov, N.A. Nanomaterials, nanocoverages, nanotechnologies : studies. manual /N.A. Azarenkov, V.M. Beresnev, A.D. Pogrebnyk, L.V. Malikov, P.V. Turbin. — H.: HNU. — 2009. — 209 p.
- [23] Minko, N.I. Methods of receipt and property of nanoobjects: studies. manual /N.I. Minko, V.V. Strokova, I.V. Jerenovsky, V.M. Nartsev. — M.: Flinta: Science, 2009. — 168 p.
- [24] Birringer, R. Nanocrystalline Materials /R. Birringer, H. Gleiter //Clusters of Atoms and Molecules II. — Ed. H. Haberland. Berlin: Springer — Verlag. — 1994. — P. 384.
- [25] Suzdalev, I.P. Nanotechnology: physics-chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials /I.P. Suzdalev. — M.: KomKniga. — 2006. — 592 p.
- [26] Konstantinova, T.E. Evolution of dislocation structure of the metallic systems in the conditions of high pressures / T.E. Konstantinova // Physicist and technician of high pressures — 2009. — V 19, — № 1. — P. 7–29.
- [27] Varyhin, V.N. Application of method of DOE for the analysis of structure of low-carbon steel at different deformation treatments, including the simple change /V.N. Varyhin, A.V. Zavdeev, E.G. Pashinskay, V.M. Tkachenko, F.I. Glazunov //Nanosize systems: structure, properties, technologies (NANSIS-2013): Theses of IV Internat. conf. (Kyiv, 19–22. 11. 2013). — Kyiv. — 2013. — P. 108.
- [28] Pashinskay, E.G. Spiral extrusion of low-carbon steel of 20Г2С: structure and properties /E.G. Pashinskay, S.V. Dobatkin, A.V. Zavdoveev, N.N. Belousov, A.V. Makarova, A.A. Maksakova //Exper. 55th Internat. conf. «Issues of the day of durability» of June, 9–13, 2014, Kharkiv, Ukraine : Collection of materials. Kharkiv: HFTU. 2014. — P. 176.
- [29] Meysner, L.L. Mechanisms of fragmentation of structure near a surface layer of nikelida of titan as a result of affecting him the ionic bunches /L.L. Meysner, T. M. Poletika, S. N. Meysner, A.V. Tverdohlebova, S.L. Girsova //Theses of Internat. conf. «Physical мезомеханика of the multilevel systems — 2014. Design, experiment, appendixes» — 3–5 сент. 2014, Tomsk, Russia. — Tomsk: IFPM. — 2014. — P. 387–388.
- [30] Pogrebnyk, A.D. Influence of thickness of nanosize layer on a structure and properties of multi-layered coverages of TiN/MoN /A.D. Pogrebnyk, V.M. Beresnev, O.V. Bondar, G. Abadias, P. Chartier, B.A. Postolnyy, A.A. Andreev, O.V. Sobole //Letter in YTF. — 2014. — T. 40. — V. 5. — P. 59–66.
- [31] Balokhonov, R.R. Influence of the coating thickness on strength of the coating–base material composite / R.R. Balokhonov, V.A. Romanova //Numerical simulation. Composites: Mechanics, Computations, Applications. — 2010. — 1. — P.1–13.