

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ
ИМ. В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 669.14.018.8: 621.45.038.72

ПИЛИПЦОВ
Дмитрий Геннадьевич

**СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИНАРНО
ЛЕГИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ
ИМПУЛЬСНОЙ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ, ДЛЯ КОНТАКТНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТА И УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Гомель, 2013

Работа выполнена в Учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Научный руководитель: **Рогачев Александр Владимирович**,
доктор химических наук, профессор,
член- корреспондент НАН Беларуси,
ректор Гомельского государственного
университета имени Франциска Скорины

Официальные оппоненты: **Поболь Игорь Леонидович**,
доктор технических наук, доцент, директор
Научного инженерного центра «Плазмотег»
Физико-технического института НАН
Беларуси

Шеменков Владимир Михайлович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Металлорежущие станки и
инструменты» ГУВПО «Белорусско -
Российский университет»

Оппонирующая организация: УО «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится 20 июня 2013 г. в 14.00 часов на заседании совета по
защите диссертаций Д 01.14.01 при Институте механики металлополимерных
систем им. В.А. Белого НАН Беларуси по адресу: 246050, г. Гомель,
ул. Кирова, д. 32а; e-mail: mpri@mail.ru, тел.: +375(0232)77-52-12,
факс: +375(0232)77-52-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИММС НАН Беларуси по
адресу: г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций

Н.Б. Ростанина

Краткое введение. В последние годы постоянно проявляется интерес к разработке и совершенствованию технологических методов обработки контактных поверхностей, к которым предъявляются повышенные требования по твердости, износостойкости и ряду других эксплуатационных параметров. Важное место в числе таких методов занимает вакуумное ионно-плазменное осаждение композиционных углеродных покрытий. Как известно, однокомпонентные углеродные слои наряду с высокой твердостью и теплопроводностью характеризуются достаточно высокими внутренними механическими напряжениями и низкой термостойкостью. Эффективным технологическим приемом улучшения свойств таких покрытий является их легирование, введение в их состав различных металлов, азота. Достижимый эффект определяется природой легирующих элементов, их концентрацией, технологическими режимами легирования. Поэтому разработка соответствующих рекомендаций, комплекса мер и приемов оптимального легирования, особенно многокомпонентного, исследование структуры, механических и триботехнических свойств с целью создания тонкопленочных систем с высокими эксплуатационными параметрами представляет научный и практический интерес.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь в областях создания новых многофункциональных и специализированных материалов; синтеза материалов с новыми свойствами, обеспечивающих создание опто-, микро- и нанoeлектронных устройств, схемотехнические решения для построения таких устройств; физика, химия и механика поверхности; механика адаптивных материалов и конструкций, управление структурой и свойствами поверхности, в том числе на наноструктурном уровне.

Работа выполнялась в рамках Государственных программ ориентированных фундаментальных исследований и Республиканских научно-технических программ: ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии» (задание 1.07 № гос/р 20061264 «Исследование структуры, механических свойств наноразмерных покрытий на основе углерода, легированных атомами и кластерами металлов»), ГПНИ «Функциональные машиностроительные материалы, наноматериалы» 2011-2015 гг. подпрограмма «Высокоэнергетические технологии» задание 5.1.02 №20112844 «Изучение ионно-плазменной обработки импульсами с регулируемыми пространственно-временными и энергетическими параметрами с целью оптимизации технологий формирования наноконпозиционных углеродных

покрытий и наплавки металлических слоёв, обработки кристаллического и аморфного кварца; оптимизация технологии нанесения тонкоплёночных кремнийсодержащих покрытий для защиты металлических поверхностей от износа при действии высоких контактных давлений», ГПНИ «Электроника и фотоника» подпрограмма «Фотоника» задание 2.1.06 № гос/р 20112846 «Разработка технологии формирования оптических систем на основе тонких углеродных покрытий и приемов регулирования их оптическими свойствами в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра». Ряд результатов работы был получен при проведении исследований по заданию белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект Т08Р-223 № гос/р 20081965, «Разработка и оптимизация методов регулирования механических свойств углеродных покрытий путем их многокомпонентного легирования» и выполнения заданий по заказу ПРУП «Завод полупроводниковых приборов» «Оптимизация технологических режимов обработки инструмента и оснастки, используемой при производстве элементов электронной техники. Проведение производственных испытаний и разработка технологической документации» (дог. № 07-08 от «1» мая 2007 г.)

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение эксплуатационных параметров контактных прецизионных поверхностей инструмента и узлов трения нанесением легированных атомами металлов и/или азота покрытий на основе углерода, исследование их структуры, механических и триботехнических свойств.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Оработать методики многокомпонентного легирования углеродных покрытий, оценки их структуры, механических, триботехнических свойств покрытий;
2. Изучить закономерности влияния технологических режимов осаждения многокомпонентно легированных покрытий на их структуру, микротвердость, внутренние напряжения, триботехнические свойства;
3. Определить зависимость структуры и свойств углеродных покрытий от концентрации и природы металлов и/или азота;
4. Разработать рекомендации по совершенствованию технологии формирования, выбору состава многокомпонентно легированных углеродных покрытий с более высокими эксплуатационными свойствами.

Предмет исследования – структура, механические свойства композиционных УП, зависимость их свойств от состава, технологических условий и режимов формирования.

Объектом исследования являются покрытия контактных прецизионных поверхностей инструмента и узлов трения на основе углерода, легированные

титаном, медью, азотом, осаждаемые импульсным ионно-плазменным методом.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен потребностями в создании эффективной технологии нанесения покрытий на основе углерода, характеризующихся оптимальным комплексом физико-механических свойств: высокими триботехническими параметрами, твердостью, минимальными значениями внутренних напряжений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности изменения свойств и фазовых превращений при формировании углеродных покрытий легированных азотом, или азотом и титаном, заключающиеся в первом случае в снижении на 40% микротвердости и в 2 раза значений внутренних механических напряжений при увеличении содержания в камере азота с $2 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-1} Па, и во втором случае – в возрастании твердости покрытий при сохранении низкого уровня внутренних напряжений и коэффициента трения при повышении концентрации азота, объясняемые протеканием процессов образования нитридов и карбонитридов в объеме осаждаемых покрытий.

2. Данные о влиянии концентрации титана и меди в бинарнолегированном УП, сформированном ионно-плазменным методом, на его фазовый состав и механические свойства, включающие установленное снижение числа атомов углерода с sp^3 – сопряженными связями при возрастании содержания в покрытии меди и титана, сохранение высоких значений микротвердости при легировании углеродного покрытия титаном до концентрации 49-50% и ее возрастание при отжиге.

3. Технологические рекомендации по совершенствованию процесса нанесения легированных УП ионно-плазменными методами, повышающими их эксплуатационные свойства, в том числе обоснование эффективности электродугового испарения графитового катода импульсом, сформированным, по меньшей мере, из двух зон, причем в первой зоне импульса амплитуда напряжения 250-350 В и длительность 150 мкс, а в следующей зоне амплитуда напряжения 100-150 В и длительность не более 450 мкс.

4. Конструкция многослойного покрытия, состоящего из легированной азотом металлической основы, переходного слоя из карбонитридов и внешнего углеродного слоя, толщиной 0,1-0,5 мкм, многокомпонентно легированного металлами.

Личный вклад соискателя. Диссертация отражает личный вклад автора в разработку методик формирования легированных углеродных покрытий [1, 3, 5-11, 13-16, 18, 19, 21-24, 26-28, 30], определение и контроль их фазового состава и структуры [1, 4, 5, 7-10, 12, 17, 22, 25-28],

установление влияния природы и концентрации легирующего элемента на физико-механические свойства покрытий [2, 3, 6, 7, 10-12, 20, 22], термообработки легированных покрытий [8], определение закономерности трения и изнашивания многокомпонентно легированных покрытий [2, 8, 10, 12], формулировку технологических рекомендаций, имеющих целью повышение эксплуатационных свойств покрытий [15, 18, 19, 21, 30], обоснование методов контроля технологических параметров генерации катодной углеродной плазмы с регулируемыми временными и энергетическими характеристиками [12, 30], разработку конструкции покрытия с высокими эксплуатационными свойствами [29].

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы (2005 Могилев); ПЛЕНКИ – 2005 (2005, Москва); INTERMATIC – 2005, (2005, Москва); ФППТ-5, (2006, Минск), Inter-Academia 2007 & Inter-Academia for Young Researchers Workshop, (2007, Hamamatsu), ФТТ-2007, (2007 Минск), Юбилейная научно-практическая конференция (2009, Гомель); 8th International Conference on Global Research and Education, (2009, Warsaw); 11-й международной научно-практической конференции, (2009, Санкт-Петербург); «Полимерные композиты и трибология» (2010, Гомель), 13-й Международной научно-практической конференции, (2011, Санкт-Петербург); «Полимерные композиты и трибология» (2010, 2011, Гомель), 10th International Conference on Global Research and Education, (2011, Sucevita); Симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения академика Ф.И. Федорова, (2011, Минск), 18th International Vacuum Congress (IVC), (2011, Beijing); Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP 2010), (2010, Shenzhen); International Conference on Modern Applications of Nanotechnology “IBCN12” (2012, Minsk)

Экспериментальные образцы матриц и пуансонов штампов пресс-форм, сверл, фрез, метчиков, разверток с нанесенным упрочняющим легированным углеродным покрытием, демонстрировались и отмечены наградами на международных научно-технических выставках, в том числе на: Китайской международной промышленной ярмарке «СІІF-2006» (КНР, Шанхай, 2006); 12-й Международной практической конференции – выставке «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». (Россия, Санкт-Петербург, 2012).

Опубликованность результатов диссертации. По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 28 научных работ, из которых 12 статей в научных журналах, из них 5 (3,2 авторских

листа) в журналах, входящих в перечень ВАК, 10 статей в сборниках материалов конференций и 6 тезисов докладов на научных конференциях.

Результаты диссертации защищены 2 патентами Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержание работы изложено на 141 странице, из которых 21 страницу занимают 32 рисунка и 21 таблица; 20 страниц – список цитируемой литературы из 244 наименований, включая 30 авторских работ на 4 страницах, 8 приложений на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан общий анализ работ, проводимых в области пленочного материаловедения и технологий вакуумного плазменного упрочнения, отмечена высокая актуальность данных исследований, сформулированы методологические подходы, цели и конкретные задачи, решаемые в работе, изложены основные положения выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ методов получения легированных углеродных покрытий и их общая характеристика. Рассмотрены физические процессы, протекающие при легировании металлами и/или азотом углеродных покрытий. Проведен анализ влияния природы и концентрации легирующих элементов на структуру и механические свойства осажденных углеродных покрытий (УП). Установлены основные структурные особенности таких покрытий, закономерности взаимосвязи их структурно-фазового состояния и функциональных свойств. Отмечаются явно выраженная зависимость свойств покрытий от метода формирования и технологических параметров процесса, а также влияние природы и концентрации легирующих элементов на значения микротвердости покрытий, внутренних механических напряжений, триботехнические свойства. Приведены основные механизмы такого влияния и дано обоснование перспективности использования многокомпонентного легирования углеродных алмазоподобных покрытий с целью повышения их эксплуатационных свойств. На основании обзора литературных данных, рассмотренных в главе, определены объекты исследования и сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны использованные материалы, способы и режимы формирования легированных УП, методы их исследования. Разработан комплекс экспериментальных методик, позволяющий формировать ионно-плазменными методами УП, легированных азотом и металлами (титан, медь и др.) с заданной концентрацией легирующих элементов. Для получения легированных УП использовали установку вакуумного напыления, содержащую газовый ионный источник типа АИДА,

с помощью которого можно производить очистку и нагрев подложек, источник плазмы стационарного катодно-дугового разряда с металлическим катодом, источник плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита, используемым для нанесения УП. Легированные металлами УП (С:Ме) наносили следующими основными методами:

1 – покрытия формировали одновременным нанесением углерода из источника плазмы импульсного катодно-дугового разряда с графитовым катодом и металла из электродугового испарителя с металлическим катодом. При таком способе легирования концентрация атомов металла составляет 17 ... 60% от общего объема;

2 – покрытия осаждали из плазмы импульсного катодно-дугового разряда с составным катодом из графита и легирующих металлов. Концентрация легирующего элемента составляла 1,0 ... 7,0 объемных %;

3 – УП формировали из плазмы импульсного катодно-дугового разряда в среде с повышенным содержанием азота в условиях одновременного осаждения на поверхности атомов металла, генерируемых электродуговым испарителем с металлическим катодом;

Для очистки и нагрева подложек применяли обработку их поверхности ионами металла с энергией 0,6 – 1,2 КэВ или ионами азота (аргона) с энергией ≤ 400 эВ и плотностью ионного тока ≈ 25 А/м². Нанесение покрытия производили при начальном давлении в камере $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ Па. УП наносились при напряжении разряда 250–300 В и частоте импульсов от 5 до 20 Гц.

Изменение концентрации легирующих элементов достигалось путем варьирования тока дугового испарителя и частоты следования импульсов источника углеродной плазмы. В качестве легирующих металлов использовали титан и медь, отличающихся различной химической активностью по отношению к углероду и азоту.

В качестве основных характеристик, определяющих механические свойства покрытий, были выбраны микротвердость, уровень внутренних механических напряжений, триботехнические параметры.

Фазовый состав углеродной матрицы определяли методами спектроскопии комбинационного рассеивания. Состав, морфологию и структуру покрытий оценивали методами фотоэлектронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, а также атомно-силовой микроскопии. Триботехнические испытания проводили по схеме сфера – плоскость (шарик радиусом 3 мм из закаленной стали ШХ15). В процессе трения расчетными методами определялись значения коэффициента трения и параметры, характеризующие износостойкость. Подложки изготавливали из стали 12Х18Н10Т, кремния,

ситалла, поликора. Статистическая обработка экспериментальных данных проводили средствами математического пакета «Mathcad».

В третьей главе приведены результаты исследований механических свойств, структуры и фазового состава УП, легированных азотом и титаном.

Формирование УП в среде азота вызывает возрастание размера зерна и шероховатости поверхности. При повышении давления азота в камере от $2 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-1} Па средний размер зерна и R_a возрастают в 1,5 раза. Наиболее интенсивная сорбция покрытием азота установлена при его давлении в камере менее 0,02 Па. При увеличении содержания азота от $2 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-1} Па более чем на 40% снижаются микротвердость покрытия и, что особенно важно, в 1,5 – 2 раза — уровень внутренних механических напряжений (таблица 1). При этом коэффициент трения не меняется и составляет 0,11-0,14, что с учетом установленного значительного снижения внутренних напряжений при легировании УП азотом позволяет прогнозировать их более высокую износостойкость.

Таблица 1 – Влияние давления азота, его концентрации в углеродном покрытии на механические свойства легированных покрытий

покрытие	$P(N_2)$, Па	Концентрация азота в покрытии, %	Микротвердость, H_v , ГПа	Коэффициент трения f	Внутренние напряжения σ , МПа
C:N	$2 \cdot 10^{-3}$	< 0,5	18,14	0,11	171,5
C:Ti:N			10,20	0,17	114,4
C:N	10^{-2}	1,2	15,30	0,14	82,63
C:Ti:N			13,79	0,2	178,4
C:N	$2 \cdot 10^{-2}$	2,6	13,90	0,13	137,5
C:Ti:N			12,88	0,19	166,2
C:N	$4 \cdot 10^{-2}$	2,7	12,90	0,10	102,6
C:Ti:N			12,53	0,11	124,9
C:N	10^{-1}	3,3	10,04	0,12	93,1
C:Ti:N			13,75	0,25	210,6

Анализ представленных на рисунке 1 КР спектров показывает, что в покрытии, независимо от концентрации азота, присутствует значительная разупорядоченная графитовая фракция.

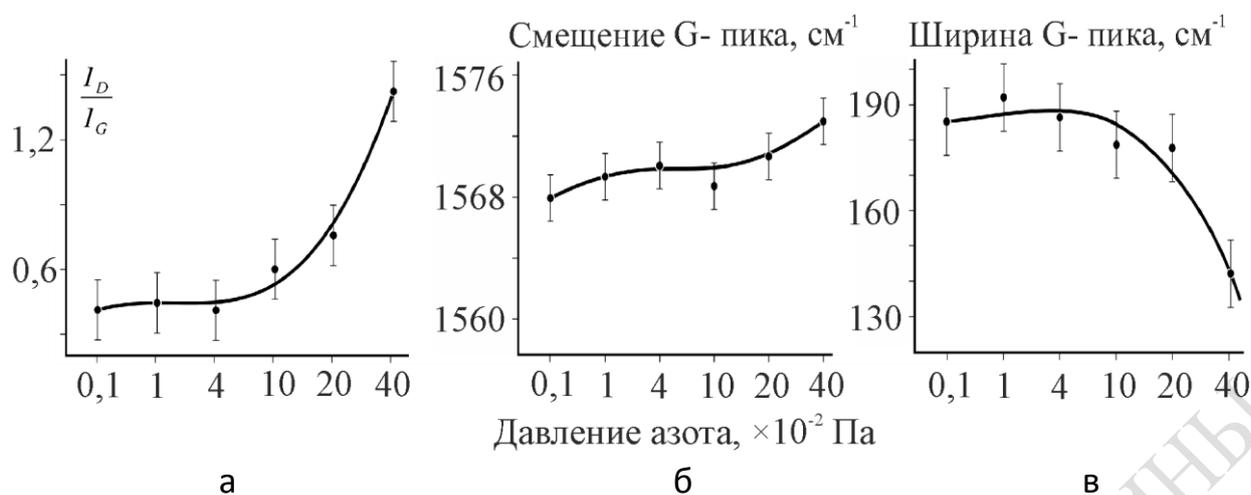


Рисунок 1 – Зависимость интегрального отношения I_D/I_G (а), смещения положения G-пика (б), ширины G-пика (в) C:N покрытий от давления азота в вакуумной камере

Установлено изменение положения пика G в зависимости от концентрации азота в покрытии: положение пика остается на одном уровне, слегка смещаясь в сторону увеличения при концентрации азота 3,3%, что косвенно указывает на образование химической связи типа C–N. Образование данного химического соединения подтверждается и данными РФЭС анализа (рисунок 2).

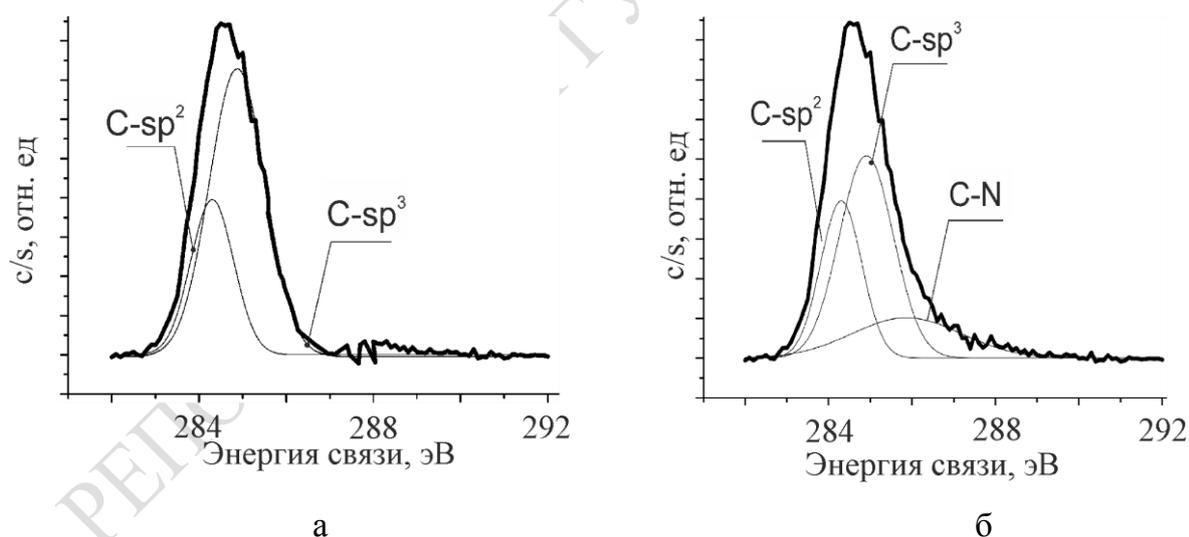


Рисунок 2 – C1s РФЭС спектры нелегированного УП (а) и C:N (б)

В C:N покрытии, содержащем 2,95% азота, энергия связи углерода ниже, чем в нелегированных УП покрытиях и составляет 284,4 эВ. Смещение C1s пика C:N покрытий указывает на возрастание концентрации sp^2 -гибридизированных атомов углерода. Таким образом, можно заключить, что азот встраивается в структуру аморфной углеродной матрицы, способствует

графитизации покрытия, тем самым снижая твердость и уменьшая коэффициент трения таких покрытий.

Более сложные физико-механические и морфологические изменения протекают при бинарном легировании УП, азотом и титаном (таблица 1). Отметим, что введение в состав УП только титана приводит к заметному снижению микротвердости, и при его азотировании микротвердость покрытия существенно возрастает пропорционально давлению азота в камере. С увеличением концентрации азота в покрытиях С:Ti:N возрастают и внутренние напряжения, коэффициент трения. Установленное противоположное влияние азота на свойства титансодержащих углеродных слоев в сравнении с однокомпонентными углеродными покрытиями может быть объяснено протеканием процессов химического взаимодействия азота с титаном, образованием нитридов и карбонитридов в объеме осаждаемых покрытий. Данный вывод согласуется с результатами изучения топографии, механических свойств УП, легированных титаном и азотом и после этого подвергнутых отжигу в вакууме при 500 °С в течение 30 мин.

Установлено, что термообработка таких покрытий стимулирует протекание двух основных процессов, оказывающих различное влияние на механические свойства таких покрытий: графитизацию, которая определяет снижение механических свойств, и образование химических соединений (карбидов, нитридов, карбонитридов), приводящее к внедрению в объём покрытия соответствующих твердых фаз. При низкой концентрации азота в камере и, соответственно, низком содержании его в покрытии доминирующим является снижение микротвердости вследствие уменьшения содержания sp^3 гибридных атомов углерода, а при высоком давлении азота в камере при высокотемпературном нагреве активизируются процессы диффузии атомов титана, стимулирующие процессы их химического взаимодействия с азотом и углеродом. В результате образуются высокодисперсные твердые фазы, которые и определяют возрастание твердости покрытия при его термообработке.

В четвертой главе проведен анализ морфологии, фазового состава и механических свойств углеродных покрытий, бинарно легированных титаном и медью. Рассматривались покрытия как с малой концентрацией легирующих элементов (до 10%), так и с концентрацией до 50%.

Показано, что покрытия, формируемые из потоков испаренных атомов металла и импульсной углеродной плазмы, характеризуются высокой структурной неоднородностью, обусловленной наличием капельной фазы металла (рисунок 3). Как видно, при формировании покрытия С:Ti:Cu плотность и размер частиц металла в сравнении с покрытием С:Cu

возрастает, в покрытии формируются достаточно протяженные скопления, значительно увеличивающие площадь основания частиц металла.

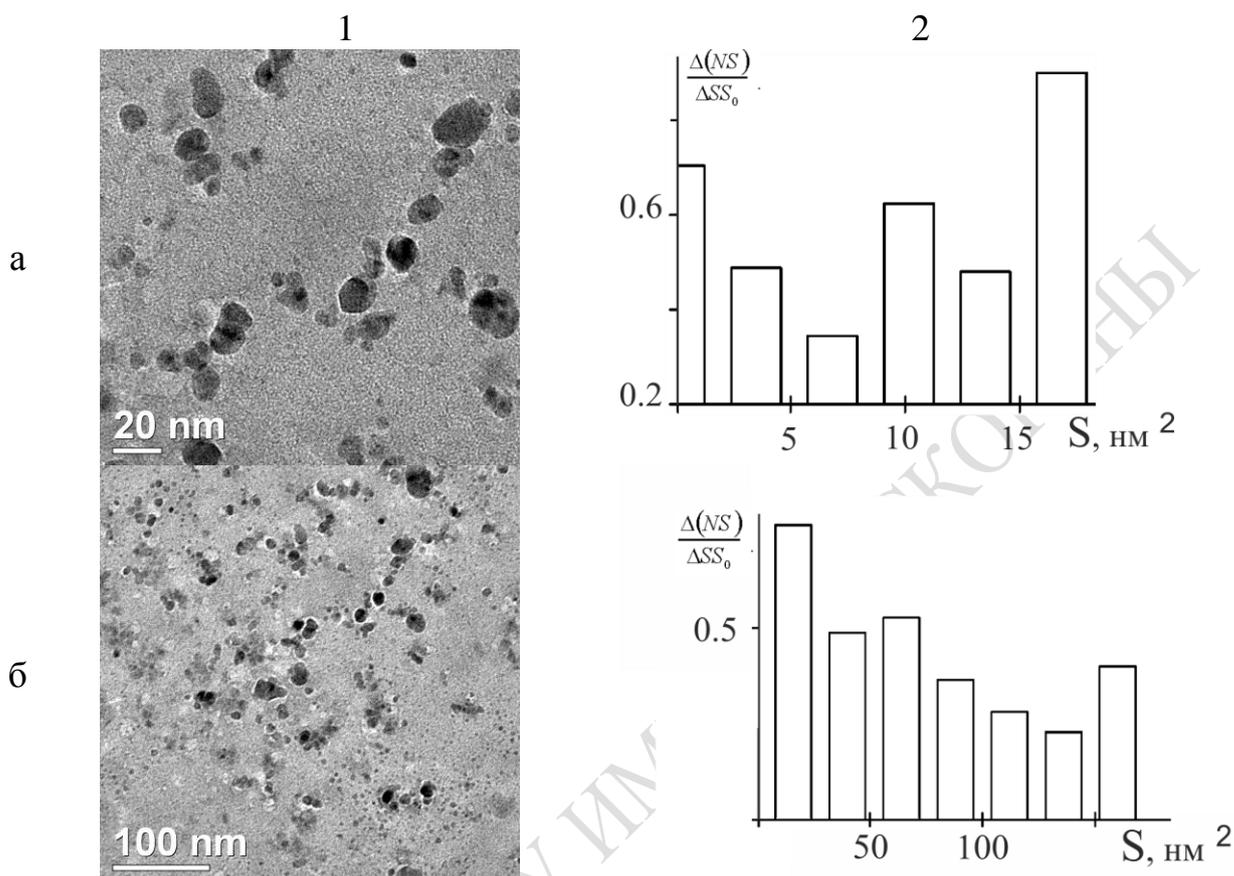


Рисунок 3 – Электронномикроскопические изображения (1) и распределение частиц легирующего металла по площади (2) в легированных УП С:Cu_{4,8%} (а), С:Ti_{31,2%}:Cu_{4,8%} (б)

Определено влияние легирования медью однокомпонентных и титансодержащих УП на их микротвердость (таблица 2).

Таблица 2 – Значения микротвердости (Н), модуля упругости (Е) и коэффициента трения (f) УП, легированных металлами

Тип покрытия	Концентрация, %		H _v *, ГПа	Е, ГПа	f*
	Ti	Cu			
C:Cu	–	1,8	13,4/11,8	–	0,13/0,11
C:Cu	–	4,1	11,7/9,5	–	0,08/0,12
C:Cu	–	4,8	11,0/10,0	–	0,21/0,25
C:Cu:Ti	38,6	1,8	14,9/16,2	407±16	0,31/0,27
C:Cu:Ti	45,4	4,1	12,5/13,4	372±26	0,26/0,24
C:Cu:Ti	41,3	4,8	10,1/11,2	314±50	0,27/0,27

* - первое значение характеризует покрытие до отжига, второе – после отжига.

Установлено, что введение только меди в углеродное покрытие всегда приводит к снижению величины внутренних напряжений. Так, легирование углеродного покрытия 2,7% меди уменьшает механические напряжения более чем в два раза. При этом изменяется характер возникающих напряжений: если в однокомпонентном покрытии возникают напряжения растяжения, то при легировании медью – напряжения сжатия. Отметим, что в таких слоях сохраняется достаточно высокая твердость, что в сочетании с относительно низкими внутренними напряжениями определяет перспективность их практического применения. При бинарном легировании влияние легирующих элементов на внутренние напряжения не однозначно, и полный анализ процессов, влияющих на механическую напряженность покрытий, возможен при определении механизма и кинетики химических изменений, протекающих в таких системах.

Значения микротвердости легированных покрытий изменяется в широких пределах, что обусловлено их фазовыми и морфологическими особенностями. При отжиге таких слоев внутренние напряжения значительно снижаются, что обусловлено, по-видимому, протеканием процессов сегрегации.

При легировании УП медью и титаном микротвердость покрытия, в целом, выше, чем при легировании только медью. При многокомпонентном легировании содержание углеродной фазы в покрытии снижается, и рассматривать возрастание твердости как результат суперпозиционного эффекта не обосновано. Высокие значения твердости наблюдаются при легировании углеродного покрытия титаном до значений 49-50%. При отжиге УП, содержащих титан, микротвердость возрастает, что объясняется образованием в объеме твердых карбидных фаз. Легирование УП металлами оказывает сильное влияние на их коэффициент трения и износостойкость.

УП, содержащие медь, имеют достаточно низкие значения коэффициента трения и высокую износостойкость. Увеличение содержания меди в однокомпонентно легированном УП снижает коэффициент трения, повышает стабильность работы контактной пары, что связано в значительной степени с формированием в зоне трения медного слоя.

При бинарном легировании УП титаном и медью наблюдается снижение коэффициента трения по отношению к однокомпонентным С:Ti покрытиям. Установлено, что для всех изученных покрытий в зоне трения повышается содержание металлического наполнителя. Высокие значения коэффициента трения характерны только для УП, содержащих концентрацию титана более 10 %. Введение небольшого количества меди в УП вызывает заметное снижение коэффициента трения, а дорожка трения не имеет

неоднородных областей, которые можно рассматривать как зоны схватывания и когезионного разрушения.

Определен фазовый состав бинарнолегированных УП. При легировании УП титаном подтверждено образование карбида и показано, что при введении в титансодержащее УП меди наблюдается снижение концентрации sp^2 связей. Установлено, что при возрастании содержания в покрытии меди и титана происходит снижение концентрации углерода с sp^3 - сопряженными связями. При легировании УП титаном наблюдается зависимость механических свойств от концентрации титана (рисунок 4.а). При возрастании содержания в покрытии меди (рисунок 4.б) существенно снижаются внутренние механические напряжения. Проведение отжига позволяет уменьшить их уровень более чем в 5 раз.

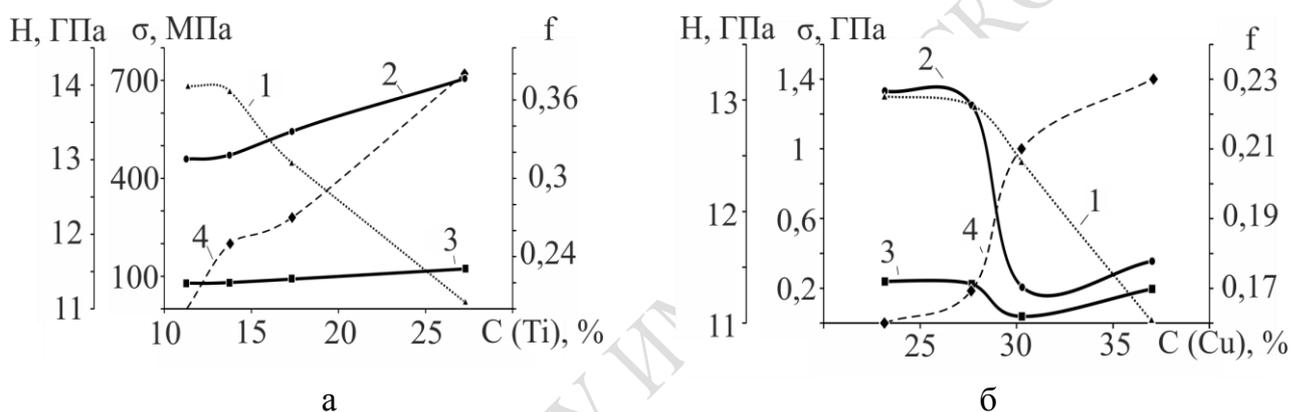


Рисунок 4 – Зависимость микротвердости H (1), внутренних напряжений σ до (2) и после отжига (3) и коэффициента трения f (4) покрытий от концентрации титана (а) и меди (б)

Важной особенностью высоколегированных УП является высокая микрогетерогенность, поверхностная неоднородность их механических свойств, в частности, микротвердости (рисунок 5). Как видно, при легировании титаном на кривой распределения числа измерений по значению твердости регистрируются три максимума, которые можно соотнести со значениями микротвердости монокомпонентного УП (максимум при $H_v=15,5\pm 0,5$ ГПа), карбида титана ($H_v=13,5\pm 0,5$ ГПа) и высокодисперсной капельной фазы титана ($H_v=12,5\pm 1,2$ ГПа). Высокие значения твердости титановой фазы объясняются строением частиц: на их поверхности образуется твердый карбидный слой, формирование которого возможно при взаимодействии микрокапель титана с термически активированными атомами углерода на стадии совместного осаждения. При легировании УП медью распределение имеет два максимума, относящиеся соответственно к различным компонентам покрытия: высокодисперсной металлической фазе и модифицированному углеродному слою.

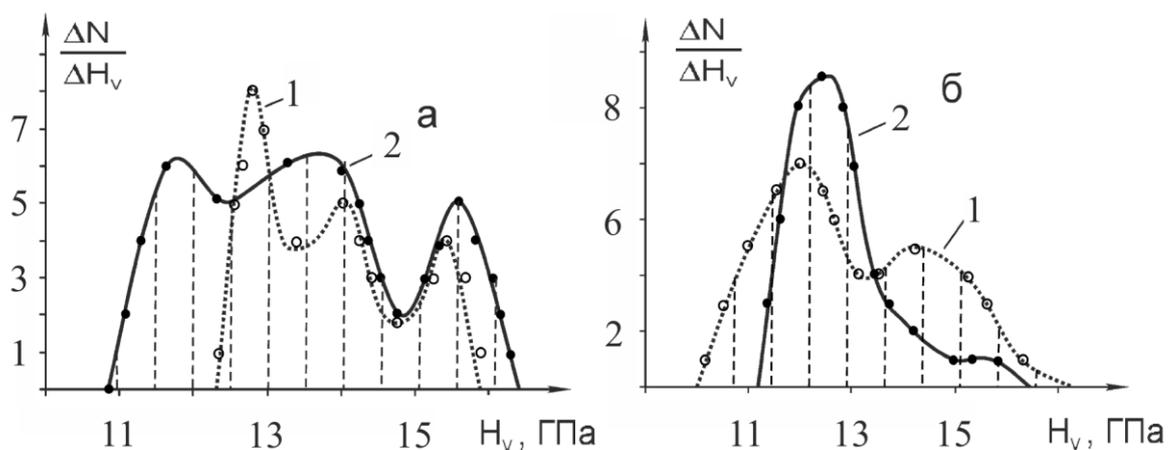


Рисунок 5 – Распределение по значениям микротвердости участков поверхности УП, легированных титаном (а), медью (б) при токе дуги 50А (1) и 70А (2)

При возрастании концентрации металла свыше 30% микротвердость слоя определяется механическими свойствами металлической фазы. Измеренные в таких покрытиях значения микротвердости, значительно превышающие значение массивной меди, обусловлены высокой дисперсностью частиц меди (размер частиц соизмерим с диаметром отпечатка индентора при измерении микротвердости 0,1 – 0,4 мкм) и по этой причине значительным влиянием более твердой углеродной матрицы на размеры зоны деформирования покрытия индентором. Отметим, что покрытия, легированные медью, характеризуются более высокими триботехническими свойствами: они имеют достаточно низкие значения коэффициента трения (0,17...0,23) и коэффициента изнашивания контртела $((0,9...0,21) \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/(\text{Н} \cdot \text{м}))$. Легированные медью углеродные покрытия проявляют, что особенно важно, способность не изнашивать рабочую поверхность контртела, что обусловлено механическими свойствами медной пленки, которая образуется в процессе трения на поверхности композиционного покрытия. Легированные же титаном углеродные покрытия имеют значительно более высокие значения коэффициента трения и вызывают интенсивный износ контртела. При увеличении содержания титана в покрытии триботехнические характеристики покрытия ухудшаются. Исследования морфологии покрытий методом АСМ показали, что при высоком содержании меди в покрытии, достаточно жестком режиме испарения медь преимущественно находится в капельной фазе. При отжиге таких покрытий размер частиц меди и их плотность значительно возрастают, по-видимому, за счет протекания процессов сегрегации, формируется более равновесная структура с минимальными значениями уровня внутренних напряжений. Высоко неоднородную структуру имеют и УП, содержащие

титан. В слое образуются частицы размером 0,1-0,3 мкм, относительно равномерно распределенные в объеме. При отжиге покрытия С:Ti структура становится более однородной, значительно снижаются размер и плотность частиц металла. Такие морфологические изменения являются следствием интенсивного протекания диффузионных процессов, сопровождающихся образованием карбида металла.

В пятой главе сформулированы рекомендации по совершенствованию технологии формирования, оптимизации состава многокомпонентно легированных УП, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами. Показано, что значительное повышение механических свойств УП может быть достигнуто путем оптимизации временных и энергетических параметров импульсного разряда при генерации углеродной плазмы. Установлено, что наиболее высокий эффект достигается при создании между графитовым катодом и анодом дугового разряда, в первой зоне которого значение напряжения значительно превышает его значение во второй зоне. Амплитуда напряжения второй зоны устанавливается в диапазоне 100-150В и является оптимальной по критерию достижения более высоких физико-механических свойств. Покрытия, полученные при таком распределении составляющих амплитуд комбинированного импульса, обладают наименьшей шероховатостью, большей однородностью структуры поверхностного слоя. Установлена зависимость механических свойств УП, полученных из плазмы катодно-дугового разряда от распределения энергии в импульсе. Наиболее высокой микротвердостью обладают покрытия, сформированные при следующих амплитудах составляющих импульса: 350 В в первой зоне; 100 В во второй зоне. Определены технологические режимы формирования многокомпонентно легированных УП на инструмент, который используется при ремонте и восстановлении элементов авиационной техники. Упрочнение инструмента из быстрорежущих сталей, многокомпонентно легированными УП с оптимальным составом, позволяет в 1,3 – 2 раза увеличить срок службы инструмента. Предложена и прошла проверку конструкция покрытия для ленточных механизмов позиционирования кремниевых заготовок больших интегральных схем. Более высокие результаты достигнуты при использовании внешнего углеродного слоя, многокомпонентно легированного металлами.

Результаты испытаний технологической оснастки и инструмента с покрытием показывают, что нанесение износостойких, бинарно легированных УП на рабочие поверхности увеличивает стойкость штампов ~ в 1,5 ... 3 раза. Количество ремонтов сократилось на 62%. Износ рабочих поверхностей пуансонов и вставок матрицы отсутствует в пределах периода нормативной эксплуатации оснастки. Сократились также поломки пуансонов

в результате отсутствия налипания штампуемых материалов на рабочие поверхности. Как следствие этого, значительно уменьшилась годовая потребность в оснастке. Экономический эффект (за период 2010-2012 года) только за счет увеличения ресурса оснастки составил на НПО «Интеграл» 168,7 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлена зависимость морфологических особенностей и механических свойств УП, легированных азотом и титаном или азотом и медью, от концентрации введенных элементов. Показано, что при повышении содержания азота в покрытии до 3% средний размер зерна и R_a возрастают в 1,5 раза, на 40% снижаются микротвердость покрытия и в 1,5 – 2 раза уровень внутренних механических напряжений, при этом коэффициент трения не меняется и составляет 0,11 – 0,14. При увеличении концентрации азота в титансодержащем УП установлен эффект возрастания твердости. Методом РФЭС показано, что данные особенности объясняются протеканием процессов химического взаимодействия азота с титаном, образованием нитридов и карбидов в объеме осаждаемых покрытий. При легировании УП медью и азотом формируется дисперсная структура, и наблюдается снижение внутренних напряжений по отношению к С:Cu покрытию [2-7, 9, 10, 17, 22].

2. Проведены комплексные исследования влияния концентрации титана и меди на морфологию и механические свойства высоконаполненных УП. Установлено, что при возрастании концентрации титана с 11 до 27%, а меди с 23 до 37% в 1,5 – 2 раза возрастает размер зерен, в 1,5 раза снижаются уровень внутренних напряжений и на 20% микротвердость. Показано, что медьсодержащие УП имеют неоднородную структуру и характеризуются более низким содержанием атомов углерода с sp^3 -сопряженными связями [8, 26, 27].

3. Определены фазовый состав, структура, микротвердость, внутренние механические напряжения и триботехнические параметры бинарно легированных медью и титаном УП. Установлено увеличение числа атомов углерода с sp^2 -сопряженными связями при возрастании содержания в покрытии меди и титана [2, 9, 10, 11, 17, 22, 26, 28].

4. Установлены особенности влияния отжига покрытий типа С:Ti:N, С:Ti:Cu на их структуру и механические свойства. Показано, что протекают два процесса, оказывающих влияние на механические свойства: графитизация, которая определяет снижение механических свойств и образование химических соединений (карбидов, нитридов), приводящее к

внедрению в объём покрытия соответствующих твердых фаз. При низкой концентрации азота в УП доминирующим является снижение микротвердости вследствие уменьшения содержания sp^3 гибридных атомов углерода, а при повышении концентрации азота в С:Ti:N покрытии при нагреве активизируются процессы диффузии атомов титана, процессы их химического взаимодействия их с азотом и углеродом. В результате образуются высокодисперсные твердые фазы внедрения, которые и определяют возрастание твердости покрытия при его термообработке [7-12].

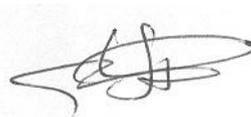
5. Определены особенности влияния на свойства осаждаемых покрытий режима генерации углеродной плазмы. Показано, что более высокие механические свойства покрытий достигаются при испарении катода импульсом, сформированным, по меньшей мере, из двух зон, причем в первой зоне импульса амплитуда напряжения 250-350 В и длительность 150 мкс, а в следующей зоне амплитуда напряжения 100-150 В и длительность не более 450 мкс [12, 30].

6. Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР и ОКР, при разработке и совершенствовании технологии обработки инструмента производства элементов электронной техники с целью повышения их ресурса по заказу УП «Завод полупроводниковых приборов» ОАО «Интеграл» (г. Минск) (ХД 06-08 от 01.03.2006, ХД 07-08 от 01.03.2007, Д 10-20 от 28.06.2010). Использование результатов диссертационной работы отражено в соответствующих отчетах НИР.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты научных исследований структуры и механических свойств легированных углеродных покрытий контактных поверхностей инструмента и узлов трения могут быть использованы для повышения ресурса работы разрабатываемого металлообрабатывающего инструмента и технологической оснастки. Результаты стендовых и эксплуатационных испытаний штампов для вырубки и загибки интегральных микросхем, сверл, фрез и элементов позиционирования больших интегральных схем с нанесенными разработанными композитами позволяет рекомендовать расширение номенклатуры деталей для массового производства, используемого при производстве интегральных микросхем (ПО «ИНТЕГРАЛ»), сельскохозяйственной технике (РУП «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике»).

Соискатель:



Д. Г. Пилипцов

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Рогачев, А.В. Структура углеродных покрытий, осажденных магнетронным распылением карбина / А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Н.И. Саян, Д.Г. Пилипцов, Д.Л. Горбачев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2006. – Т.2, №6 (39). – С. 76-79.
2. Рогачёв, А.В. Влияние природы и концентрации легирующих элементов на морфологию зоны трения углеродных покрытий / А. В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Д. Г. Пилипцов, Р.В. Бекаревич // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2009. – №5 (56). – С.100–103.
3. Пилипцов, Д.Г. Механические свойства легированных медью углеродных покрытий, осаждённых из импульсной катодной плазмы / Д. Г. Пилипцов, А. В. Рогачев, Н.Н. Федосенко // Проблемы физики, математики и техники. – Гомель. – ГГУ. 2010. – №3(4). – С. 25-30.
4. Пилипцов, Д.Г. Морфология композиционных покрытий на основе углерода, подвергнутых обработкой ионами азота / Д.Г. Пилипцов, А.С. Руденков // Проблемы физики, математики и техники. – Гомель: ГГУ, 2010. – №3(4). – С. 31-35.
5. Рогачев А. В. Механические свойства и морфология легированных азотом покрытий на основе углерода, сформированных из импульсной катодной плазмы / А.В. Рогачев, Д.Г. Пилипцов, Н.Н. Федосенко, Н. И. Саян // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – Т.15, №3. – С. 12–16.
6. Ragachou, A.V. The optical-mechanical properties of alloyed carbon coatings / A.V. Ragachou, D. G. Piliptsou, N.N. Fedosenko A.S. Rudziankou // Journal of Advanced Research in Physics. – 2011. –V. 2. – P. 61–63.
7. Пилипцов, Д.Г. Морфология и механические свойства нанокпозиционных медь-углеродных покрытий, осаждённых в импульсной плазме / Д.Г. Пилипцов, А.В. Рогачёв Н.Н. Федосенко, // Наноматериалы и наноструктуры. – 2011. – Т.2, №3. – С.28 – 33.
8. Пилипцов, Д.Г. Высоколегированные металлами углеродные покрытия: механические свойства, морфология, влияние природы и концентрации металла / Д.Г. Пилипцов, А.В. Рогачёв, Н.Н. Федосенко, А.С. Руденков // Материалы, технологии, инструменты. – 2011. – Т. 16, №3 – С. 26-30.
9. Jiang, X. Structure and Mechanical Properties of (Cu, Ti) - Binary Metal Doped Diamond-Like Carbon Films / Xiaohong Jiang, Bing Zhou, D.G.

Piliptsou, A.V. Rahachou // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 150-151. – P. 217-222.

10. Ragachou, A.V. The features of synthesis, structure and mechanical properties of alloyed diamond-like coatings / A.V. Rahachou, P. Zhu, D.G. Piliptsou, M.M. Fiadosenka, R.V. Bekarevich // *Physics Procedia*. – 2012. –V. 32. – P. 561– 565.

11. Bing, Zh. Synthesis of diamond-like carbon film on copper and titanium interlayer by vacuum cathode arc evaporation / Bing Zhou, Xiaohong Jiang, Zhubo Liu, A.V. Rogachev, Ruiqi Shen, D.G. Piliptsou // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 198. – P. 167-171.

12. Пилипцов, Д.Г. Морфология и механические свойства углеродных покрытий, полученных из плазмы импульсного катодно-дугового разряда сложной формы / Д.Г. Пилипцов, А.В. Рогачёв, Н.Н. Федосенко, А.С. Руденков // *Проблемы физики, математики и техники*. – Гомель. – ГГУ. 2012. –№3 (12). – С. 33-36

Статьи в сборниках материалов научных конференций

13. Рогачев, А.В. Кинетические закономерности формирования структуры углеродных алмазоподобных пленок из лазерного эрозионного факела / А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Д.Г. Пилипцов, Д.Л. Горбачев // материалы международной научной конференции «Межфазная релаксация в полимерах».– Москва, 22-24 ноября 2005. –С. 129-134.

14. Рогачев, А.В. Кинетические закономерности формирования структуры углеродных алмазоподобных пленок из лазерного эрозионного факела / А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Н.И. Саян, Д.Л. Горбачев, Д.Г. Пилипцов// материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения INTERMATIC».– Москва, 25-28 октября 2006. – Ч 1. – С. 143-147.

15. Саян, Н.И. Особенности формирования износостойких покрытий на медицинском инструменте ионно-лучевым методом / Н.И. Саян, Н.Н. Федосенко, М.И. Сергиенко, Е.А. Федосенко, Д.Л. Горбачев, Д.Г. Пилипцов // материалы Республиканской научно-практической конференции «Актуальные вопросы теоретической и практической медицины».– Гомель, 1-2 декабря 2006. – Т.2. – С.84-86.

16. Sayan, N.I. Laser-plasma method of diamondlike carbon films formation / N.I. Sayan, N.N. Fedosenko, D.G. Piliptsov // abstracts of the 14th International Scientific Conference «CO-MAT-TECH 2006».– Slovakia, Trnava, 19-20 October 2006. – P. 253-256.

17. Rogachev, A.V. Morfology of alloed diamonlike coverings formed from cathode pulse plasma and ionized flows of metal atoms / A.V. Rogachev, A.N. Popov, D. G. Piliptsov, N.N. Fedosenko // *materials Science 6th International*

Conference on Global Research and Education «Inter-Academia 2007 & Inter-Academia for Young Researchers Workshop».– Japan, Hamamatsu, 26-30 September, 2007. – V.1. – P. 258 – 265.

18. Рогачев, А.В. Основные технологические методы повышения триботехнических свойств композиционных покрытий на основе углерода / А.В. Рогачев, Н.И. Саян, А.Н. Попов, Д.Г. Пилипцов, Д.Л. Горбачев // материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела ФТТ-2007».–Минск, 23-26 октября 2007. – Т.3. – С. 377 – 380.

19. Рогачёв, А.В. Технология нанесения легированных металлами алмазоподобных покрытий / А.В. Рогачёв, Д.Г. Пилипцов, Н.Н. Федосенко // Материалы 11-й международной научно-практической конференции.– С-Петербург, 14-17 апреля 2009г. – Ч. 2 – С.330-332.

20. Пилипцов, Д.Г. Свойства медь-углеродных композиционных пленок, полученных в плазме // Д.Г. Пилипцов, А. В. Рогачев, Н.Н. Федосенко // материалы Международной научной конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения».– Москва, 2011. – Т.2. – С. 180 – 183.

21. Пилипцов, Д.Г. Ионно-плазменная технология упрочнения металлообрабатывающего инструмента / Д. Г. Пилипцов, А.В. Рогачев, Н.И. Саян, Н.Н. Федосенко, А.С. Руденков // материалы 13-й Международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» .– С-Петербург, 2011 г. – Ч 2. – С. 273 – 277.

22. Пилипцов, Д.Г. Влияние природы металла на фазовые состояния легированных углеродных покрытий / Д. Г. Пилипцов, А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, А.С. Руденков, Чжоу Бин // Материалы Гомельского научн. семинара по теоретич. физике, посвящённого 100-летию со дня рождения Ф.И. Фёдорова.– Гомель, 20 – 22 июня 2011. – С. 233 – 236.

Тезисы конференций

23. Саян, Н.И. Особенности осаждения покрытий из импульсных ионизированных потоков / Н.И. Саян, Н.Н. Федосенко, Д.Г. Пилипцов // материалы международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии».– Могилев, 21-22 апреля 2005 г. – Ч 1. – С. 187-188.

24. Sayan, N.I. Laser-plasma method of diamondlike carbon films formation / N.I. Sayan, N.N. Fedosenko, D.G. Piliptsov // Abstracts «14th International Scientific Conference CO-MAT-TECH 2006».– Slovakia, Trnava, 19-20 October 2006. – P. 40.

25. Саян, Н.И. Структура углеродных покрытий, осажденных магнетронным распылением карбина / Н.И. Саян, А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Д.Г. Пилипцов, Д.Л. Горбачев // тезисы II Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом». – Гомель, 1 - 3 ноября 2006. – С. 57-58.

26. Пилипцов, Д.Г. Ионно-плазменные композиционные покрытия на основе углерода: синтез, структура, механические свойства / Д.Г. Пилипцов, А. В. Рогачёв, Н. Н. Федосенко, А.С. Руденков // тезисы докладов Международной научно-технической конференции «ПОЛИКОМТРИБ-2011». – Гомель, 25 июля 2011. – С. 179.

27. Пилипцов, Д.Г. Вакуумно плазменное легирование углеродных покрытий: структура и свойства / Д.Г. Пилипцов, А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, А.С. Руденков // тезисы «III конгресс физиков Беларуси. Симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения академика Ф.И. Федорова». – Минск, 25 - 27 сентября 2011. – С.74.

28. Bing, Zhou. Technological characteristics advancement of mechanical properties of diamondlike coatings / Bing, Zhou, A.V. Rogachev, D.G. Piliptsov, N.N. Fedosenko, A.S. Rudenkov // abstracts of the «International Conference on Modern Applications of Nanotechnology». – Minsk, Belarus, 27-29 June, 2012. – P. 225

Патенты

29. Деталь с многослойным покрытием рабочей поверхности: Пат. 7481 Респ. Беларусь, МПК С23С 14/06 /А.В. Рогачев, Н. И. Саян, Н.Н. Федосенко, Д. Г. Пилипцов, А.С. Руденков; заявитель УО «ГГУ им. Ф. Скорины». – № u 20101069; заявл. 28.12.10; опубл. 06.05.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 4. – С.193.

30. Способ формирования углеродного покрытия в вакууме: Пат. 16244 Респ. Беларусь, МПК С23С 16/26, С23С 14/24, С23С 14/06 / А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Д.Г. Пилипцов // заявитель УО «ГГУ им. Ф. Скорины». – № а 20100403; заявл. 16.03.10; опубл. 11.05.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 4. – С.106.

РЭЗІЮМЕ

Піліпцоу Дзмітрый Генадзьевіч

Структура і фізіка-механічныя ўласцівасці бінарна легіраваных вугляродных пакрыццяў, асаджаемых з імпульснай катоднай плазмы, для кантактных паверхняў інструмента і вузлоў трэння

Ключавыя словы: вугляродныя пакрыцці, трыбатэхнічныя ўласцівасці, унутраныя напружанні

Мэта працы: павышэнне эксплуатацыйных параметраў кантактных прэцызійных паверхняў інструмента і вузлоў трэння нанясеннем легіраваных атамамі металаў і / або азоту пакрыццяў на аснове вугляроду, даследаванне іх структуры, механічных і трыботэхнічных уласцівасцяў.

Метады даследавання: Структура і фізіка-механічныя ўласцівасці ВП ацэньваюцца метадамі РФЭС, РЭМ, ПЭМ і АСМ, спектраскапіі камбінацыйнага расейвання.

Асноўныя вынікі: Устаноўлены заканамернасці змены ўласцівасцяў і фазавых ператварэнняў пры фарміраванні аднакампанентных і бінарна легіраваных азотам і тытанам ВП (вугляроднае пакрыцце), якія тлумачацца праходжаннем працэсаў утварэння нітрыдаў і карбанітрыдаў у аб'ёме асаджаных пакрыццяў. Вызначаны заканамернасці ўплыву канцэнтрацыі тытана і медзі ў ВП, а менавіта на яго фазавы склад і механічныя ўласцівасці. Распрацаваны рэкамендацыі па ўдасканаленні нанясення легіраваных вугляродных пакрыццяў іённа-плазменнымі метадамі, у тым ліку абгрунтаванне эфектыўнасці электрадугаваго выпарэння графітавага катода імпульсам, сфармаваным, па меншай меры, з дзвюх зон, прычым у першай зоне імпульсу амплітуда напругі 250-350 В і працягласць 150 мкс, а ў наступнай зоне амплітуда напругі 100-150 В і працягласць не больш як 450 мкс. Прапанавана аптымізаваная па эксплуатацыйных параметрах канструкцыя шматпластовага пакрыцця, якая складаецца з легіраванай азотам металічнай асновы, пераходнага пласта з карбанітрыдаў і вонкавага вугляроднага пласта, шматкампанентна легіраванага металамі таўшчынёй 0,1-0,5 мкм.

Ступень выкарыстання: вынікі даследаванняў выкарыстаны пры атрыманні зносастойкіх пакрыццяў металаапрацоўчага інструмента.

Вобласць ужывання: прыборабудаванне, інструментальная прамысловасць, машынабудаванне.

РЕЗЮМЕ

Пилипцов Дмитрий Геннадьевич

Структура и физико-механические свойства бинарно легированных углеродных покрытий, осаждаемых из импульсной катодной плазмы, для контактных поверхностей инструмента и узлов трения

Ключевые слова: легированные углеродные покрытия, трение, внутренние напряжения

Цель работы: повышение эксплуатационных параметров контактных прецизионных поверхностей инструмента и узлов трения нанесением легированных атомами металлов и/или азота покрытий на основе углерода, исследование их структуры, механических и триботехнических свойств.

Методы исследования. Состав, морфология и структура УП оценивается методами РФЭС, РЭМ, ПЭМ и АСМ, КР.

Основные результаты. Установлены закономерности изменения свойств и фазовых превращений при формировании однокомпонентно и бинарнoleгированных азотом и титаном УП, объясняемые протеканием процессов образования нитридов и карбонитридов в объеме осаждаемых покрытий. Определены закономерности влияния концентрации титана и меди в УП, на его фазовый состав и механические свойства. Разработаны рекомендации по совершенствованию нанесения легированных углеродных покрытий ионно-плазменными методами, в том числе обоснование эффективности электродугового испарения графитового катода импульсом, сформированным, по меньшей мере, из двух зон, причем в первой зоне импульса амплитуда напряжения 250-350В и длительность 150 мкс, а в последующих зонах амплитуда напряжения 100-150 В и длительность не более 450 мкс. Предложена оптимизированная по эксплуатационным параметрам конструкция многослойного покрытия, состоящего из легированной азотом металлической основы, переходного слоя из карбонитридов и внешнего углеродного слоя, многокомпонентно легированного металлами толщиной 0,1-0,5 мкм.

Степень использования: результаты исследований использованы при получении износостойких покрытий металлообрабатывающего инструмента.

Область применения: приборостроение, инструментальная промышленность, машиностроение.

SUMMARY

Piliptsov Dmitry G.

The structure and mechanical properties of binary doped carbon coatings deposited from the pulse cathode plasma for the contact surfaces of the tool and the friction unit

Key words: alloyed carbon coatings, friction, internal stresses

Aim of the paper: increasing operational parameters contact surfaces of the tool and precision of friction coating doped with metal atoms and / or nitrogen coatings on carbon-based study of structure, mechanical and tribological properties

Research techniques: composition, morphology and structure of DLC are determined by XPA, SEM, TEM, AFM and Raman spectroscopy methods.

Main results. The change laws of properties and phase transformations at formation of single component and binary carbon coatings alloyed by nitrogen and titanium have been estimated that are explained by formation processes of nitrides and carbonitrides in the volume of the deposited coatings. It has been stated that titanium and copper concentrations in a carbon coating formed by the ion-plasma method influence its phase composition and mechanic properties. The improvement recommendations on the application of alloyed carbon coatings by the ion-plasma methods have been worked out, including the efficiency ground of electroarc evaporation of graphite cathode by an impulse formed at least from two zones, where in the first zone the voltage amplitude is 250-350 V and the width is 150 microsecond, and in the following zones the voltage amplitude is 100-150 V and the width is less than 450 microsecond.

The offered construction of a multilayer coating is optimized on exploitation parameters. It includes a nitrogen alloyed metal substrate, a transitional layer of carbonitrides and a surface carbon layer that is multicomponentally alloyed by metals up to 0,1-0,5 micron thickness.

Efficiency: the research results have been used at production of anti-wear coatings of metal-working tools, matrix details of dies, punches, conveyor elements of positioning.

Application field: instrument-making industry, tool-and-die industry, engineering industry.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Научное издание

Пилипцов Дмитрий Геннадьевич

**Структура и физико-механические свойства бинарно легированных
углеродных покрытий, осаждаемых из импульсной катодной плазмы,
для контактных поверхностей инструмента и узлов трения**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Подписано в печать 15.05.2013 г. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс. Напечатано на ризографе.
Усл. Печ. Л. 1,4. Тираж 60 экз. Зак. №

ИММС НАНБ, 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32А

Лицензия № 02330/0494358 от 16.03.09