

Учреждение образования  
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ”

УДК 621.81: 621.781.8

САЯН Николай Иосифович

**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ  
ПОКРЫТИЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ  
И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ  
ТЕХНИКИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск, 2007

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» и научно-производственном объединении «Интеграл»

Научные руководители:

**Емельянов Виктор Андреевич**,  
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор  
технических наук, профессор, генеральный ди-  
ректор научно-производственного объединения  
«Интеграл»

**Рогачев Александр Владимирович**,  
доктор химических наук, профессор, ректор уч-  
реждения образования «Гомельский государст-  
венный университет имени Франциска Скори-  
ны»

Официальные оппоненты:

**Хмыль Александр Александрович**, доктор  
технических наук, профессор, проректор учре-  
ждения образования «Белорусский государст-  
венный университет информатики и радиоэлек-  
троники»

**Зеленин Виктор Алексеевич**, доктор техниче-  
ских наук, заведующий лабораторией государ-  
ственного научного учреждения «Физико-  
технический институт НАН Беларуси»

Оппонирующая организация: Научно-производственное унитарное республи-  
канское предприятие «КБТМ-ОМО»

Защита состоится «17» апреля 2008 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите  
диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государст-  
венный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013,  
г. Минск, ул. П.Бровки, 6, БГУИР, корп.1, ауд. 232, тел.293-89-89, e-mail:  
dissovet@bsuir.by.

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно возрос интерес к разработке новых методов упрочнения рабочих поверхностей инструмента, используемого при производстве изделий электронной техники (ИЭТ), в частности, методов вакуумного осаждения функциональных покрытий. Наиболее эффективными покрытиями, существенно повышающими служебные свойства инструмента, являются легированные металлами алмазоподобные слои, а также многослойные покрытия. Дальнейшее совершенствование составов осотвердых покрытий, технологий их формирования позволит повысить также ресурс прецизионной технологической оснастки, работающей в условиях высоких контактных нагрузок, за счет предотвращения локальной пластической деформации контактных зон и перевода их в область упругих деформаций.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации утверждена приказом ректора учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины» (№ 211 к-з от 1.04.2005 г.) и соответствует подразделам 3.4 «Новые высокоэнергетические технологии обработки материалов», 7.2 «Оптические методы исследования структуры и свойств вещества, атомно-молекулярные и плазмодинамические процессы для получения новых материалов, приборов и наукоемких технологий» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17 мая 2005 г. №512.

Работа выполнена на основе исследований, проводимых в рамках заданий государственной комплексной программы научных исследований «Нanomатериалы и нанотехнологии» «Исследование структуры, механических свойств наноразмерных покрытий на основе углерода, легированных атомами и кластерами металлов» (2006–2010 гг., № ГР 20061264); Государственной программы ориентированных фундаментальных научных исследований «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» «Исследование межфазных процессов, структуры и свойств легированных углеродных покрытий, сформированных вакуумно-плазменными методами» (2006–2010 гг., № ГР 20061260); Государственной программы Министерства образования Республики Беларусь по международно-техническому сотрудничеству «Изучение закономерностей осаждения многослойных систем, определение их

морфологии и триботехнических свойств при различных режимах контактно-го взаимодействия» (2003–2005 гг., № ГР 20031549); хозяйственных договоров с УП «Завод полупроводниковых приборов» (г. Минск, Республика Беларусь) на проведение НИР «Разработать технологию алмазоподобного покрытия для упрочнения твердосплавных и стальных деталей штампов и пресс-форм, изготовить опытную партию и провести производственные испытания с целью последующего внедрения» (2004–2006 гг., № ГР 20043884); «Совершенствование технологии обработки деталей инструмента производства элементов электронной техники с целью повышения их ресурса. Изготовление опытной партии и проведение производственных испытаний» (2006–2007 гг., № ГР 20061263).

### **Цель и задачи исследования**

Основной целью работы является разработка физико-химических основ технологии упрочнения прецизионной технологической оснастки и инструмента (с линейными размерами элементов менее 1 мм и полями допусков 2–5 мкм), использующихся при производстве изделий электронной техники, путем нанесения на их рабочие поверхности композиционных углеродсодержащих покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ характерных повреждений технологической оснастки и инструмента, возникающих при производстве изделий электронной техники, определить наиболее эффективные методы и приемы повышения их стойкости путем нанесения композиционных легированных и многослойных углерод- и титансодержащих покрытий;

- исследовать процессы структурообразования, установить закономерности и технологические особенности процессов легирования углеродных алмазоподобных покрытий (АПД), осаждаемых из импульсной катодной плазмы, магнетронным распылением и лазерным испарением;

- провести моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев элементов металлических сопряжений оснастки с нанесенными на них алмазоподобными покрытиями при действии нормальных и тангенциальных внешних нагрузок;

- исследовать влияние материала подложки, наличия подслоев, технологических режимов осаждения, состава и количества слоёв на микротвердость и триботехнические свойства легированных и многослойных алмазоподобных покрытий;

- разработать технологические рекомендации по нанесению многослой-

ных покрытий, включающих титан- и углеродсодержащие алмазоподобные слои, на матрицы и пуансоны пресс-форм, мелкоразмерный режущий инструмент, предназначенный для обработки высокоточных изделий электронной техники, провести опытно-промышленные испытания технологической оснастки и инструмента с покрытиями.

Объектом исследования являются легированные и многослойные покрытия на основе углерода, формируемые на подложках из углеродистых сталей 9ХС, Р18, монокристаллического кремния, ситалла и др. из катодной импульсной плазмы и ионизированных потоков атомов металла, магнетронным распылением углеродной мишени и из лазерного эрозионного факела, позволяющие решать проблему повышения износостойкости прецизионной технологической оснастки и инструмента для обработки ИЭТ, к которым предъявляются высокие требования по сохранению линейных размеров в процессе эксплуатации в условиях высоких контактных давлений.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Данные о влиянии природы легирующих металлов, подложки на структуру и триботехнические свойства углеродсодержащих покрытий. В том числе:

– установленный механизм влияния легирования медью на триботехнические свойства алмазоподобного покрытия, заключающийся в снижении уровня остаточных напряжений и повышении теплопроводности покрытий, снижении температуры в локальных зонах контакта сопрягаемых поверхностей и соответственно интенсивности процесса графитизации АПП, что при введении 0,8 – 20 масс. % меди повышает их износостойкость до 2000 раз;

– установленную в результате проведенных исследований корреляцию между значением коэффициента трения покрытия и твердостью подложки, на которую оно нанесено.

2. Результаты анализа с помощью предложенной математической модели распределения полей максимальных касательных напряжений в поверхностных слоях элементов сопряжений с алмазоподобными покрытиями при действии нормальных и тангенциальных внешних нагрузок, позволившие определить толщину, твердость и коэффициент трения покрытий высоконагруженных прецизионных узлов технологической оснастки, необходимые для предотвращения локальной пластической деформации контактных зон и перевода их из области локального пластического деформирования в область упругих деформаций.

3. Результаты исследований влияния технологических режимов осаждения, состава и количества слоёв на микротвердость и триботехнические свойства покрытий. Установленные закономерности трения и изнашивания много-

слоистых покрытий, состоящих из чередующихся слоев, на основе углерода и титана, позволившие разработать физико-химические основы технологии упрочнения оснастки и инструмента, используемого при производстве ИЭТ.

4. Разработанные многослойные покрытия системы  $(Ti+AlP)_n$  ( $n \geq 2$ ) и технологические рекомендации по их нанесению на матрицы и пуансоны пресс-форм, режущий инструмент, обеспечивающие формирование слоёв с мелкодисперсной структурой, обладающих высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения.

#### **Личный вклад соискателя**

В диссертации изложены результаты работ, полученные автором лично или в соавторстве. Вклад научных руководителей профессора Емельянова В.А. и профессора Рогачева А. В. состоит в определении структуры, целей и задач теоретической и экспериментальной частей работы, обсуждении и обобщении основных научных результатов исследований. Разработка методов получения и исследования алмазоподобных покрытий выполнялась совместно с к.т.н. Федосенко Н. Н. и к.т.н. Поповым А. Н. В совместно опубликованных работах автору принадлежат: определение целей и постановка задач исследования, выбор методов исследования, непосредственное участие в проведении экспериментов по получению покрытий, изучению их свойств, разработка математической модели напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев элементов сопряжений с нанесенными на них покрытиями при действии внешних нагрузок, а также обработка, анализ и интерпретация полученных результатов, разработка технологических рекомендаций по нанесению покрытий на матрицы и пуансоны штампов, пресс-форм, режущий инструмент для производства ИЭТ, формулировка выводов.

#### **Апробация результатов диссертации**

Результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались и обсуждались на одиннадцати международных и республиканских научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Тонкие пленки и наноструктуры» (Россия, Москва, 2004 г.); 7-я Международная практическая конференция «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», (Россия, Санкт-Петербург, 2005 г.); Международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы», (Беларусь, Могилев, 2005 г.); Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», (Россия, Москва, 2005г.); Республиканская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы теоре-

тической и практической медицины», (Беларусь, Гомель, 2005 г.); 5-я Международная научно-техническая конференция «Физика плазмы и плазменные технологии», (Беларусь, Минск, 2006 г.); 14<sup>th</sup> International Scientific Conference CO-MAT-TECH 2006», (Словакия, Трнава, 2006 г.);

2-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», (Беларусь, Гомель, 2006 г.); Международная научно-техническая конференция «Материалы, технологии и оборудование в производстве», (Беларусь, Новополоцк, 2007 г.); 9-я Международная практическая конференция-выставка «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», (Россия, Санкт-Петербург, 2007 г.); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела», (Беларусь, Минск, 2007 г.).

Экспериментальные образцы матриц и пуансонов штампов пресс-форм с нанесенными по разработанной технологии покрытиями, использующиеся в производстве элементов ИЭТ, демонстрировались на трех международных выставках, в том числе на: Международной специализированной выставке и семинаре «Мир металла – 2006» (Беларусь, Минск, 2006 г.); Китайской международной промышленной ярмарке «СІП–2006» (КНР, Шанхай, 2006 г.); 9-й Международной практической конференции - выставке «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». (Россия, Санкт-Петербург, 2007 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 26 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, 11 статей в материалах конференций и семинаров, 8 тезисов докладов конференций, 2 патента.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 14,2 авторских листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе проведен анализ процессов, протекающих при осаждении алмазоподобных покрытий при использовании различных методов их формирования. Во второй главе приведено описание методик экспериментальных исследований структуры и свойств покрытий. В третьей главе при-

ведены результаты исследований процессов легирования АПП при различных условиях их синтеза. Четвертая глава посвящена изучению влияния условий и режимов формирования на структуру, триботехнические свойства многослойных покрытий на основе углерода, осаждаемых ионно-плазменными методами. В пятой главе проведен анализ характерных повреждений оснастки и инструмента, возникающих при производстве компонентов электронной техники, и определены технологические особенности нанесения многослойных и легированных алмазоподобных слоев, предлагаемых для повышения их ресурса.

Общий объем диссертации составляет 134 страницы, из которых 64 страницы основного текста, 61 рисунок на 43 страницах, 12 таблиц на 7 страницах, список использованных источников из 178 наименований на 14 страницах, список собственных публикаций автора из 26 наименований на 4 страницах и 2 приложения на 2 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена оценка современного состояния решаемой проблемы, показана научная и практическая значимость работы.

**В первой главе** проведен анализ процессов, протекающих при осаждении (АПП) при использовании различных методов их формирования, а также результатов, полученных при исследовании свойств покрытий и влияния на них технологических режимов и условий нанесения. Показано, что структура и свойства углеродных покрытий в значительной степени зависят от условий и режимов их синтеза. Основными методами, позволяющими активно воздействовать на свойства АПП, являются их легирование и формирование многослойных структур.

На основании результатов анализа опубликованных работ определены цель и задачи исследований.

**Во второй главе** приведено описание методик экспериментальных исследований структуры и свойств покрытий. Объектами исследования являются легированные и многослойные покрытия на основе углерода, формируемые из катодной импульсной плазмы и ионизированных потоков атомов металла (с помощью установки УРМЗ.279.070), магнетронным распылением углеродной мишени (установка ВУ2-МП с планарным магнетроном) и из лазерного эрозионного факела (с помощью вакуумной установки УВН-73П-2, оснащенной лазерами Г-Ои-16-1 и ГОС-301). Покрытия наносили на подложки из сталей 9ХС, Р18, монокристаллического кремния и ситалла.

Скорость осаждения покрытий и их толщину измеряли с помощью кварцевого резонатора, многолучевого микроинтерферометра МИИ-11 и прибора



для измерения оптической плотности Macbeth TD 932.

Определение триботехнических свойств тонких покрытий производили по схемам «сфера–плоскость» (микротрибометр ММТ) и «плоскость–ролик» (машина трения СМТ-1). Для установления момента полного разрушения отдельных слоев и всего покрытия в целом разработан метод, основанный на регистрации в процессе трения величины контактного электрического сопротивления.

Изучение морфологии поверхности покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью приборов НАНОТОП-202 и НАНОТОП-203 по известным методикам. Шероховатость покрытий измеряли с помощью профилометра модели 170621 «Калибр». Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М.

Химический состав покрытия определялся методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с помощью прибора РН15300 ESCA/610 SAM, вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на приборе РН1-7200 TOF-SIMS и ОЖЭ-микроскопии с помощью прибора РН1-670.

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнялась средствами математического пакета «Mathcad».

**В третьей главе** приведены результаты исследований процессов легирования АПП при различных условиях их синтеза методами генерации углеродных частиц из импульсной плазмы, магнетронным распылением и лазерным испарением.

Установлено, что морфология и свойства легированных металлами углеродных покрытий, осаждаемых из импульсной катодной плазмы, зависят от метода легирования, природы металла.

Установлено, что легированные металлами АПП имеют более высокие механические свойства. Легирование приводит к повышению твердости покрытий, снижению коэффициента изнашивания контртела до 10 раз и увеличению стойкости покрытий к истиранию.

Изучены триботехнические свойства углеродных покрытий толщиной ~0,1 мкм, легированных карбидообразующими металлами (титан, молибден, вольфрам) и медью. Установлено, что коэффициент трения углеродного покрытия уменьшается до значений 0,2–0,4 на стадии приработки (таблица 1), что связано с графитизацией покрытия в процессе трения.

При трении углеродных покрытий, легированных медью, в продуктах износа и в зоне контакта присутствует большое количество меди. На основании полученных данных сделан вывод об изменении механизма изнашивания АПП при их легировании. Если при трении нелегированного АПП основными процессами являются графитизация и последующее термическое окисление углерода, то при введении в покрытие металлов, в частности, при легиро-

вании медью, проявляется влияние на процессы контактного взаимодействия образующейся в зоне трения металлической пленки, снижающей интенсивность процесса графитизации. В результате повышения теплопроводности покрытия снижается температура на пятнах фактического контакта. Изменение механизма разрушения приводит к значительному повышению износостойкости покрытий (см. таблица 1).

Таблица 1 – Триботехнические свойства легированных углеродных покрытий

Покрытие	Коэффициент изнашивания контртела, $\times 10^{15}$ [ $\text{м}^3/(\text{Н}\times\text{м})$ ]	Коэффициент трения	Число циклов истирания до разрушения покрытия
АПП	1,38	0,3 – 0,35	~ 15
Cu+ АПП	1,43	0,3 – 0,4	>38 000
Mo+ АПП	0,76	0,26	~3 200
W+ АПП	1,03	0,35	~4 000
Ti+АПП (составной катод)	0,13	0,3	~ 200
Ti+АПП (отдельные потоки)	0,77	0,3 – 0,4	–

Наиболее высокой износостойкостью обладают АПП, легированные медью. В сравнении с нелегированными АПП их ресурс выше более чем в 2000 раз. Износостойкость покрытия зависит от природы материала подложки, на которую оно нанесено. Данный эффект, а также установленные данные о влиянии скорости трения на коэффициент трения покрытий подтверждают представления о значительном влиянии температуры в зоне трения на процессы изнашивания. Замена подложки на более теплопроводную и уменьшение скорости трения снижают контактную температуру и соответственно интенсивность графитизации и термического окисления.

Рассмотрены особенности структурного и фазового состояния легированных углеродных слоев, формируемых методом высокоскоростного магнетронного распыления карбина.

Установлены закономерности осаждения алмазоподобных углеродных пленок из лазерной эрозионной плазмы, генерируемой внутри торцевого холловского ускорителя с открытым анодным слоем. Показано, что содержание  $sp^3$ -фазы в АПП зависит от плотности мощности лазерного излучения и расстояния мишень–подложка и в меньшей степени – от частоты следования импульсов. При оптимальных параметрах лазерного испарения графитовой мишени обеспечивается максимальное содержание  $sp^3$ -фазы (85–87 %) в получаемых покрытиях.

Установлены режимы получения углеродных легированных алмазоподобных пленок, отличающихся повышенной адгезионной прочностью к подложкам различной природы.

Сравнительный анализ методов формирования легированных алмазоподобных покрытий с целью использования их для повышения ресурса инструмента, прецизионной технологической оснастки для производства ИЭТ показал, что наиболее перспективно применение легированных АПП, формируемых из импульсной катодной плазмы.

**Четвертая глава** посвящена изучению влияния условий и режимов формирования на структуру, триботехнические свойства многослойных покрытий на основе углерода, осаждаемых ионно-плазменными методами.

Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев элементов контактных металлических сопряжений, на рабочие поверхности которых нанесено алмазоподобное углеродное покрытие. Рассмотрены два характерных случая: деформирование статического контактного сопряжения и деформирование контактного сопряжения при трении при различных схемах внешнего нагружения.

В соответствии с видом решений бигармонических дифференциальных уравнений функции интенсивности распределения внешней нормальной  $p(x)$  и тангенциальной  $q(x)$  нагрузок с помощью косинус- и синус-преобразований Фурье представляются в интегральном виде следующим образом:

$$p(x) = \int_0^{\infty} \tilde{p}(\alpha) \cos(\alpha x) d\alpha; \quad q(x) = \int_0^{\infty} \tilde{q}(\alpha) \sin(\alpha x) d\alpha, \quad (1)$$

где  $p(x)$  – функция описывающая закон распределения внешней нормальной нагрузки,  $q(x)$  – функция описывающая закон распределения внешней касательной нагрузки,  $\alpha$  – параметр распределения нагрузки,  $\cos$ - и  $\sin$ -трансформанты Фурье определяются интегралами:

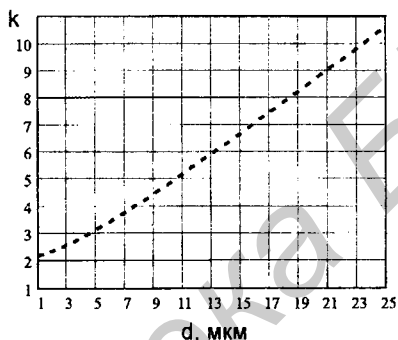
$$\tilde{p}(\alpha) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} p(x) \cos(\alpha x) dx; \quad \tilde{q}(\alpha) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} q(x) \sin(\alpha x) dx. \quad (2)$$

В качестве основных параметров, характеризующих напряженное состояние слоистой системы, использовали значения максимальных касательных напряжений  $\tau_{max}$ , определяемых по соотношению:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (3)$$

где  $\tau_{xy}$  – компоненты напряжений, связанные уравнениями обобщенного закона Гука для ортотропного материала,  $\sigma_x$  – значение механических напряжений в координате  $x$  (т.е. в плоскости, параллельной плоскости покрытия);  $\sigma_y$  – значение механических напряжений координате  $y$  (т.е. в плоскости, перпендикулярной плоскости покрытия).

Расчеты показали, что при толщине покрытия  $h = 1$  мкм уровень максимальных касательных напряжений при трении уменьшается в 2,2 раза по сравнению со значениями, полученными при расчетах сопряжений без покрытия (рисунок 1). Показано, что влияющим на данный эффект фактором является уменьшение коэффициента трения от 0,35, характерного для стали, до 0,1 у АПП.



**Рисунок 1 – Зависимость  $k$  (отношения максимальных напряжений покрытия ( $f = 0,35$ ) к максимальным напряжениям с покрытием ( $f = 0,1$ )) от толщины покрытия**

При нанесении слоёв АПП толщиной 5–7 мкм, которые, как правило, используются при упрочнении технологической оснастки, инструмента, достигается снижение уровня максимальных касательных напряжений в 3–4 раза. Показано, что нанесение АПП позволяет значительно снизить напряжения в поверхностных слоях при жестких режимах эксплуатации контактных сопряжений и перевести их из области локального пластического деформирования в область упругих деформаций, обеспечив тем самым повышение их ресурса не только за счет снижения износа, но и предотвращения локальной пластической деформации контактных зон.

Изучено влияние природы материала подложки, отжига алмазоподобных покрытий на их триботехнические свойства, кинетику их изменения в процессе трения. Показано, что использование промежуточного слоя нитрида титана позволяет снизить коэффициент трения и повысить износостойкость алмазоподобных покрытий.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о наличии кор-

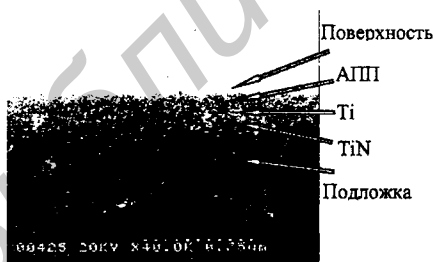
реляции между твердостью поверхности подложки, на которую наносится АПП, и значением коэффициента трения: при повышении твердости подложки наблюдается повышение износостойкости и снижение коэффициента трения покрытия (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние материала подложки на коэффициент трения АПП

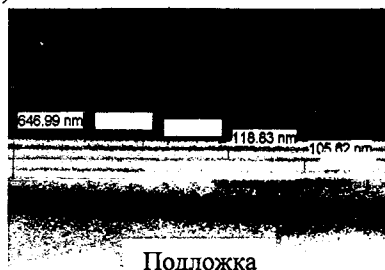
Характеристика	Материал подложки			
	Сталь ШХ15, отжиг	Ситалл	Кремний	Покрытие TiN на закаленной стали ШХ15
Твердость, ГПа	1,8	8,5	13,3	22
Коэффициент трения	0,40 – 0,50	0,3 – 0,38	0,18 – 0,22	0,10 – 0,12

Рассмотрены особенности фазового состояния, трения и изнашивания многослойных покрытий на основе углерода и титана. На рисунке 2, а приведено изображение скола многослойного покрытия, полученное методом электронной микроскопии. Видно, что слой нитрида титана, прилегающий к подложке, имеет зернистую структуру с размерами зерен 0,07 мкм. Слои титана и АПП имеют мелкодисперсную структуру с явно выраженными размытыми межфазными зонами диффузионной природы. При нанесении многослойного покрытия в условиях, исключающих их термообработку, образование диффузионной границы не наблюдается (рисунок 2, б).

При изнашивании многослойных покрытий установлены согласованные, находящиеся в противофазе периодические изменения коэффициента трения и контактного электрического сопротивления, связанные с последовательным разрушением отдельных слоев (рисунок 3).



а



б

а – термообработанный образец; б – образец до термообработки

Рисунок 2 – Поперечные сколы покрытий  $TiN-(Ti-AПП)_2$  и  $TiN-(Ti-AПП)_4$  (4 и 5-число слоев  $Ti-AПП$ ) на монокристалле кремния

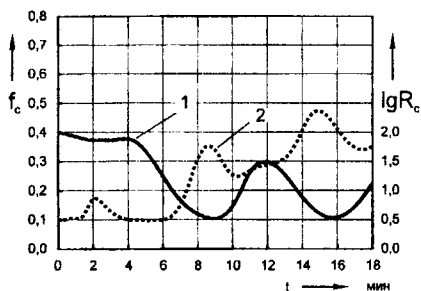


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения  $f_c$  (1) и контактного сопротивления  $R_c$  (2) от времени испытания покрытия  $(Ti-АПП)_2$

Из рисунка 3 следует, что при данных режимах испытания разрушение слоев  $Ti-АПП$  происходит за 7–8 мин.

Экспериментально установлена высокая эффективность многослойных систем на основе алмазоподобных слоев при использовании их в узлах трения (таблица 3).

Таблица 3 – Объемный износ покрытия  $J_v$ , коэффициент изнашивания контртела  $J$  и шероховатость многослойных покрытий  $R_a$

Покрытие	Материал подложки	$J_v, м^3$	$J, \times 10^{-16} м^3/(Н \times м)$	$R_a, мкм$
$TiN-(Ti-АПП)_{20}$	Сталь P18	$1,515 \cdot 10^{-13}$	2,972	0,22
$TiN-(Ti-АПП)_7$	Сталь P18	$3,198 \cdot 10^{-14}$	0,628	0,13
$TiN-(Ti-АПП)_5$	Сталь P18	$1,327 \cdot 10^{-12}$	26,05	0,33
$(Ti-АПП)_2$	Сталь 9ХС	$1,016 \cdot 10^{-12}$	19,93	0,36
$(Ti-АПП)_{10}$	Сталь 9ХС	$1,746 \cdot 10^{-13}$	3,427	0,3
$(Ti-АПП)_7$	Сталь 9ХС	$1,574 \cdot 10^{-13}$	3,089	0,26

В качестве наиболее перспективных покрытий рекомендуются многослойные системы типа  $TiN-(Ti-АПП)_n$  (где  $n \geq 2$ ), характеризующиеся комплексом высоких механических свойств. Коэффициент трения таких покрытий составляет 0,15–0,20.

В пятой главе проведен анализ характерных повреждений оснастки и инструмента, возникающих при производстве компонентов электронной техники, и определены технологические особенности нанесения многослойных и легированных алмазоподобных слоев, предлагаемых для повышения их ресурса.

С целью обеспечения заданной равномерности покрытия определено пространственное распределение потока частиц титана, генерируемых при электродуговом испарении, и частиц углерода – в факеле импульсного катодного разряда.

Определен характер влияния технологических режимов осаждения (частоты следования импульсов, температуры поверхности) на твердость покры-

тий. Установлено, что при осаждении АПП на детали из закаленной стали частота импульсов должна устанавливаться в пределах до 20 Гц: в этом случае температура нагрева не превышает температуру низкого отпуска и, таким образом, обеспечиваются высокие значения твердости.

Предложена технология нанесения многослойных покрытий для повышения эксплуатационных свойств мелкогабаритного инструмента. В частности, рекомендуется наносить покрытия нитрида титана в условиях магнитной сепарации плазменного потока, алмазоподобные покрытия, легированные титаном (Ti+C), и слоистые покрытия (Ti-АПП), состоящие из чередующихся слоев титана и АПП, толщиной 0,1–0,5 мкм.

Оптимизирована конструкция покрытия, наносимого на рабочую поверхность прецизионного мелкогабаритного инструмента на рабочую поверхность которого нанесено композиционное покрытие из титаносодержащих и углеродсодержащих алмазоподобных слоев; в качестве материала титаносодержащего слоя используется карбид титана, а в качестве материала углеродсодержащего алмазоподобного слоя – алмазоподобный углерод, легированный металлами. Рекомендуется алмазоподобный углеродный материал легировать медью, содержание которой составляет 0,8–20 масс. %, или же карбидом титана, содержание которого – 1,5–15 масс. %.

Установлены основные причины низкой стойкости рабочих частей штампов, используемых при изготовлении интегральных микросхем: 40–45 % всех дефектов составляет интенсивный износ пуансонов и вставок матрицы, 40–45 % — поломка рабочих частей штампов.

Результаты опытно-промышленных испытаний технологической оснастки и инструмента с покрытием свидетельствуют, что нанесение износостойких покрытий на основе углерода на рабочие поверхности пуансонов и вставок матрицы увеличивает стойкость штампов в 3–4 раза (ресурс составляет до 90–120 тыс. приборов). При этом количество ремонтов сократилось примерно на 75 %. Износ рабочих поверхностей пуансонов и вставок матрицы практически 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.

Годовой экономический эффект только за счет увеличения ресурса оснастки составил на НПО «Интеграл» 140 млн рублей.

В приложениях представлены акт испытания промышленной партии вставок матриц и пуансонов, прошедших ионно-плазменную обработку и справка об экономической эффективности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты

1. Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев элементов металлических сопряжений прецизионной оснастки, на рабочие поверхности которых нанесено алмазоподобное покрытие.

Установлено, что при толщине покрытия  $h = 1$  мкм уровень максимальных касательных напряжений при трении уменьшается в 2,2 раза по сравнению со значениями, полученными в сопряжениях без покрытия. Показано, что влияющим на данный эффект фактором является уменьшение коэффициента трения от 0,35, характерного для стали, до 0,1 у АПП. При нанесении слоя АПП толщиной 5–7 мкм уровень максимальных касательных напряжений снижается в 3–4 раза.

Показано, что снижение уровня напряжений в поверхностных слоях высоконагруженных прецизионных сопряжений позволяет перевести их из области локального пластического деформирования в область упругих деформаций, обеспечив тем самым повышение их ресурса не только за счет снижения износа, но и предотвращения локальной пластической деформации контактных зон [5–А, 17–А, 22–А].

2. Исследованы процессы структурообразования углеродсодержащих легированных титаном, молибденом, вольфрамом и медью покрытий при использовании различных методов их синтеза.

Установлено, что при одновременном осаждении углерода в импульсном катодно-дуговом разряде и карбидообразующего металла из электродугового испарителя формируются не содержащие карбидных фаз покрытия с развитым микрорельефом поверхности. При импульсном испарении составной мишени из графита и карбидообразующего металла в газовой фазе активно протекают процессы химического взаимодействия и на подложку осаждаются высокодисперсные слои карбидов. При импульсном испарении составного катода графит–медь формируются покрытия с равномерно распределенными по площади кристаллитами меди размером до 0,15 мкм.

Показано, что углеродные покрытия, осаждаемые методом высокоскоростного магнетронного распыления карбина, являются гетерофазными системами, атомы углерода в них связаны между собой тремя типами гибридных  $sp^1$ ,  $sp^2$  и  $sp^3$  межатомных связей. При лазерном испарении графитовой мишени при энергии ионов углерода от 10 до 50 эВ формируются нанокристаллические покрытия с преобладанием межатомных  $sp^3$ -связей (до 85–87 %) [2–А, 4–А, 10–А, 12–А, 18–А, 21–А].



3. Исследовано влияние материала подложки и наличия подслоев на триботехнические свойства легированных алмазоподобных покрытий.

Установлена корреляция между твердостью поверхности подложки, на которую наносится АПП, и установившимся коэффициентом трения: при повышении твердости подложки повышается износостойкость и снижается коэффициент трения покрытия. Показано, что при повышении твердости подложки уменьшается деформация покрытия и соответственно фактическая площадь контакта. Это приводит к возрастанию контактного давления и температуры на участках фактического контакта при трении, интенсификации процесса графитизации и к снижению коэффициента трения. Нанесение АПП на сталь ШХ15 с твердостью 1,8 ГПа промежуточного подслоя из нитрида титана с твердостью 22 ГПа позволяет снизить коэффициент трения АПП с 0,40–0,50 до 0,10–0,12 и повысить износостойкость покрытий.

Установлено, что легирование АПП 0,8–20 масс. % меди повышает их износостойкость более чем в 2000 раз. Предложен механизм влияния легирования на триботехнические свойства АПП, заключающийся в изменении при введении металлов (Cu, Ti, Mo, W) интенсивности протекающих в зоне контакта процессов графитизации [1–А, 9–А, 12–А, 22–А, 24–А, 25–А].

4. Исследовано влияние технологических режимов осаждения из плазмы импульсного катодно-дугового разряда (частоты следования импульсов, температуры подложки), состава и количества слоёв на микротвердость и триботехнические свойства покрытий. Показано, что при осаждении АПП на детали из закаленной углеродистой стали частота следования импульсов не должна превышать 20 Гц. Нагрев деталей при этом не превышает температуру низкого отпуска (232 °С), а микротвердость покрытий составляет 3–5 ГПа. Установлены закономерности трения и изнашивания многослойных покрытий, состоящих из чередующихся слоёв на основе углерода и титана. Показано, что периодические изменения коэффициента трения при испытаниях связаны с последовательным разрушением отдельных слоёв. Установлено, что наименьшие коэффициенты трения, (порядка 0,15), имеют покрытия С + Ti, (Ti–АПП)<sub>2</sub>, TiN–(Ti–АПП)<sub>7</sub> и TiN–(Ti–АПП)<sub>20</sub> [1–А, 2–А, 6–А, 7–А, 11–А, 13–А, 19–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Проведен анализ характерных повреждений оснастки и инструмента, возникающих при производстве изделий электронной техники, и определены наиболее эффективные методы и приемы повышения их стойкости путем нанесения композиционных легированных и многослойных углерод- и титаносодержащих покрытий при различных условиях их синтеза методами генерации

из плазмы импульсного катодно-дугового разряда, магнетронным распылением и лазерным испарением [3-А, 6-А, 11-А, 13-А 18-А, 21-А].

2. Разработана технология нанесения многослойных покрытий, включающие титан- и углеродсодержащие алмазоподобные слои, на матрицы и пуансоны пресс-форм, мелкогабаритный режущий инструмент, предназначенный для обработки высокоточных изделий электронной техники. Для повышения их эксплуатационных свойств предложены слоистые покрытия (Ti-АПП), состоящие из чередующихся слоев титана и АПП. В качестве материала титансодержащего слоя использован карбид титана, а в качестве углеродсодержащего – легированный алмазоподобный углерод. Слой из алмазоподобного углеродного материала легировали медью в пределах от 0,8 до 20 масс. % или же карбидом титана с концентрацией в слое от 1,5 до 15 масс. %. В качестве наиболее перспективных покрытий рекомендованы многослойные системы типа  $TiN-(Ti-АПП)_n$  (где  $n > 1$ ), характеризующиеся высокой микротвердостью  $\sim 5$  ГПа и низкой шероховатостью поверхности  $R_a \approx 0,13-0,17$  мкм. На конструкцию многослойных композиционных покрытий получен патент Республики Беларусь № 3518 [7-А, 8-А, 14-А-17-А, 23-А, 24-А, 26-А].

3. Опытные-промышленные испытания технологической оснастки и инструмента (с линейными размерами элементов менее 1 мм и полями допусков 2 – 5 мкм) с нанесенными на рабочие поверхности пуансонов и вставок матриц по разработанной технологии композиционных углеродсодержащих покрытий показали увеличение стойкости штампов в 3 – 4 раза (с 25–30 до 90–120 тыс. приборов). Ресурс сверл из стали P18, P6M5 диаметром 0,8 мм на 21,6 %, а восьмислойного покрытия (Ti-АПП)<sub>4</sub> – на 35 %. Количество ремонтов оснастки сократилось на 75 %. Износ рабочих поверхностей пуансонов и вставок матриц в пределах периода нормативной эксплуатации оснастки практически отсутствовал. Сократились также механические разрушения пуансонов в результате отсутствия налипания штампуемых материалов на их рабочие поверхности с нанесенным покрытием, вследствие чего в 2 раза уменьшилась годовая потребность в оснастке, что дает основание рекомендовать применение разработанных конструкций и технологии нанесения композиционных углеродсодержащих покрытий для повышения ресурса технологической оснастки и инструмента на предприятиях электронной промышленности [7-А, 14-А, 15-А, 24-А, 26-А].

Годовой экономический эффект за счет увеличения ресурса оснастки и инструмента составил на НПО «Интеграл» 140 млн рублей.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в научных журналах

1-А. Sayan. N.I. Effect of substrate nature and heat treatment of diamond-like coatings on their tribological characteristics / N.I. Sayan, A.V. Rogachev, A.N. Popov, V.P. Kazachenko // Friction and Wear. – 2005. – Vol.26, № 2. – P. 61–64.

2-А. Rogachev, A.V. Morfology and triboengineering properties of diamond-like coatings alloyed with metals / A.V. Rogachev, N.I. Sayan, V.A. Emel'yanov, A.N. Popov. – Friction and Wear. – 2006. – Vol.27, №5. – P.53–56.

3-А. Федосенко, Н.Н. Особенности лазерного напыления защитных покрытий на основе тугоплавких оксидов / Н.Н. Федосенко, Н.И. Саян, Д.Л. Горбачев // Вестник Полоцкого государственного университета. – Новополоцк, 2005. – Серия В, Технические науки. – №6. – С. 143–147.

4-А. Рогачев, А.В. Структура углеродных покрытий, осажденных магнетронным распылением карбина / А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Н.И. Саян, Д.Г. Филиппов, Д.Л. Горбачев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2006. – Т.2, №6 (39). – С. 76–79.

5-А. Марьин, С.А. Особенности деформирования слоистых поверхностных структур, содержащих твердое упругое покрытие / С.А. Марьин, Н.И. Саян, Н.А. Марьина, А.А. Рогачев // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2007. – Т.12, №2. – С. 5–11.

### Статьи в материалах конференций

6-А. Саян, Н.И. Особенности формирования углеродной алмазоподобной пленки из лазерного эрозионного факела при ионно-лучевом ассистировании / Н.И. Саян, С.В. Шалушаев, В.П. Морозов, Н.Н. Федосенко // «Тонкие пленки и наноструктуры», матер. междунар. науч. конф. Москва, 7–10 сент. 2004 г. – М.:МИРЭА, 2004. – Ч.2 – С. 139–142.

7-А. Саян, Н.И. Использование многослойных и легированных покрытий на основе углерода для повышения ресурса мелкогабаритного инструмента и технологической оснастки / Н.И. Саян, А.Н. Попов, А.В. Рогачев, В.П. Казаченко, А.И. Егоров // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 7-ой Междунар. практич. конф.-выставки. Санкт-Петербург, 12–15 апреля 2005 г. – СПб: 2005. – С.358–364.

8-А. Саян, Н.И. Технологические особенности нанесения многослойных покрытий на основе углерода на матрицы и пуансоны пресс-форм / Н.И. Саян // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, меха-

низмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 7-й Междунар. практич. конф.-выставки. Санкт-Петербург, 12–15 апреля 2005г. – СПб: 2005. – С.354–358.

9-А. Рогачев, А.В. Кинетика изнашивания многослойных покрытий на основе титана и углерода / А.В. Рогачев, А.Н. Попов, С.В. Короткевич, Н.И. Саян // «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»: Матер. Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 25–28 октября 2005г. – М.: МИРЭА, 2006. – Ч 1. – С. 204–207.

10-А. 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 // «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»: Матер. Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 25–28 октября 2005 г. – М.: МИРЭА, 2006. – Ч 1. – С. 143–147.

11-А. Федосенко, Н.Н. Лазерно-плазменный метод формирования углеродных алмазоподобных пленок / Н.Н. Федосенко, Н.И. Саян, Д.Г. Пилипцов, Д.Л. Горбачев. // «Физика плазмы и плазменные технологии»: Сб. докл. 5-й Междунар. конф., Минск, 18–20 сентября 2006 г. – Минск, 2006. – Т 2. – С. 684–687.

12-А. Рогачев, А.В. Морфология и триботехнические свойства легированных алмазоподобных покрытий, формируемых из катодной импульсной плазмы и ионизированных потоков атомов металла / А.В. Рогачев, В.А. Емельянов, А.Н. Попов, Н.И. Саян // «Физика плазмы и плазменные технологии»: Сб. докл. 5-й Междунар. конф., Минск, 18–20 сентября 2006 г. – Минск, 2006. – Т 2. – С. 552–555.

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

14-А. Саян, Н.И. Эффективность использования композиционных углеродосодержащих покрытий для повышения ресурса оснастки / Н.И. Саян // «Матер., технол. и оборуд. в производст.»: VI Междунар. науч. техн. конф, Новополоцк, 24–26 апреля 2007 г. – Новополоцк 2007. – С. 196–201.

15-А. Саян, Н.И. Оптимальные технологические методы повышения ресурса инструмента, используемого при производстве интегральных схем / Н.И. Саян // «Техн. ремонта, восстановл. и упрочнен. деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и техн. оснастки»: материалы 9-й Междунар. практ. конф.-выст. Санкт-Петербург, 1–5 июля 2007 г. – СПб: 2007. – С.203–207.

16-А. Рогачев, А.В., Основные технологические методы повышения триботехнических свойств композиционных покрытий на основе углерода / А.В. Рогачев, Н.И. Саян, А.Н. Попов, Н.Н. Федосенко, Д.Г. Пилипцов, Д.Л. Горбачев // «Актуальные проблемы физики твердого тела»: сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 23–26 октября 2007 – Минск, 2007 – Т 3 – С. 377–380.

#### **Тезисы докладов на научных конференциях**

17-А. Рогачев, А.В. Вакуумные легированные и многослойные покрытия триботехнического назначения / А.В. Рогачев, В.А. Емельянов, Н.И. Саян // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апреля 2005 г. – Могилев, 2005. – Ч 1. – С. 182–183.*

18-А. Федосенко, Н.Н. Особенности осаждения покрытий из импульсных ионизированных потоков / Н.Н. Федосенко, Н.И. Саян, Д.Г. Пилипцов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апреля 2005 г. – Могилев, 2005. – Ч 1. – С. 187–188.*

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

20-А. Rogachev, A.V. Chemical processes during carbon coatings alloying, their morphological and tribotanical properties./ A.V. Rogachev, N.I. Sayan, A.N. Popov // *Abstracts «14th International Scientific Conference CO-MAT-TECH 2006», Slovakia, Trnava, 19–20 October 2006. – Trnava, 2006. – P. 171.*

21-А. 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 // «Проблемы взаимодействия излучения с веществом»: матер. Междунар. науч. конф., Гомель, 1–3 ноября 2006 г. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2006. – С. 57–58.

22-А. Rogachev, A.V. Tribological properties of multilayered vacuum coatings / A.V. Rogachev, V.P. Kazachenko, N.I. Sayan // *Abstracts & Souvenir International Conference on Industrial Tribology – 2006, IISc, India, Bangalore, 30 November – 2 December 2006. – Bangalore, 2006. – P. 47.*

23-А. Федосенко, Н.Н. Особенности формирования износостойких покрытий на медицинском инструменте ионно-лучевым методом / Н.Н. Федосенко, М.И. Сергиенко, Н.И. Саян, Е.А. Федосенко, Д.Л. Горбачев, Д.Г. Пилипцов // «Актуальные вопросы теоретической и практической медици-

ны»: материалы Республ. науч.-практич. конф., Гомель, 1–2 декабря 2005 г. – Гомель, 2006. – Т.2. – С.84–86.

24-А. Рогачев, А.В. О механизмах изнашивания углеродных покрытий и основные технологические методы повышения их износостойкости / А.В. Рогачев, А.Н. Попов, Н.И. Саян, Shao Tianmin\«Полимерные композиты и трибология (Поликонтриб-2007)»: материалы междунар. научн.-технич. конф., Гомель, 16–19 июля 2007г. – Гомель: ИММС НАНБ, 2007- С.67–68.

### Патенты

25-А. Способ контроля износостойкости покрытий: заявка пат. Респ. Беларусь, МПК7 G 01 C 21, C23 / Н.И. Саян, Я. Цуан, С.В. Короткевич, А.Н. Попов; заявитель НПО «Интеграл». – № а20060414; заявлено 03.05.06.

26-А. Мелкогабаритный инструмент для обработки высокоточных изделий: пат. 3518 Респ. Беларусь, В 26 F 1/00 / А.В. Рогачев, В.А. Емельянов, Н.И. Саян, А.Н. Попов, Н.Н. Федосенко, заявители УО «ГТУ им. Ф. Скоринь», НПО «Интеграл» – № 20060690; заявл. 26.10.06; опубл. 02.02.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007.



**РЭЗЮМЭ**  
Саян Мікалай Іосіфавіч

**Фарміраванне кампазіцыйных вугляродзмяшчальных пакрыццяў  
прэцызійнай тэхналагічнай аснасткі і інструмента для вытворчасці вы-  
рабаў электроннай тэхнікі**

*Ключавыя словы:* алмазападобныя вугляродзмяшчальныя пакрыцці, умацненне аснасткі і інструмента, легіраваныя і шматслойныя пакрыцці, каэфіцыент трэння, зносастойкасць, вырабы электроннай тэхнікі.

*Мэта працы* заключаецца ў распрацоўцы фізіка-хімічных асноў тэхналогіі ўмацавання прэцызійнай аснасткі і інструмента, якія выкарыстоўваюцца ў вытворчасці вырабаў электроннай тэхнікі, шляхам нанясення на рабочыя паверхні кампазіцыйных вугляродзмяшчальных пакрыццяў.

*Метады даследавання і апаратура:* эксперыментальныя даследаванні працэсаў легіравання АПП пры розных умовах іх сінтэзы і іх трыбатэхнічных свойстваў пры дапамозе спецыяльнага тэхналагічнага ізмяральнага і стэндавага абсталявання.

*Атрыманыя вынікі, іх навізна.* Вызначаны тэхналагічныя і фізіка-хімічныя асаблівасці атрымання легіраваных алмазападобных пакрыццяў (АПП) з імпульснай катоднай плазмы, магнетронным распыленнем вугляроднага матэрыялу і лазерным выпарэннем. Распрацаваны тэхналагічныя рэкамендацыі па павялічэнні доўгавечнасці і зносастойкасці матрыцаў і пуансонаў прэс-форм, дробнапамернага рэжучага інструмента, якія ўключаюць нанясенне легіраванага іённа-плазменным метадам АПП, выбар канструкцыі пакрыцця і канцэнтрацыі легіруючага элемента, рэжымы тэрмаапрацоўкі.

Прапанавана канструкцыя шматслойнага кампазіцыйнага пакрыцця, якое наносіцца на рабочыя паверхні прэцызійнага дробнапамернага інструмента і складаецца з тытан- і вугляродзмяшчальных алмазападобных слаёў, легіраваных меддзю, утрыманне якой складае ад 0,8 да 20 мас. %, або карбідам тытана, утрыманне якога складае ад 1,5 да 15 мас. %.

*Ступень выкарыстання:* Прапанованыя канструкцыі пакрыццяў прэцызійнай тэхналагічнай аснасткі, інструмента і распрацаваны тэхналагічны працэс выкарыстоўваецца у інструментальным вытворчасці НПА «Інтэграл».

*Вобласць ужывання:* Інструментальныя вытворчасці прадпрыемстваў электроннай, радыётэхнічнай прамысловасці і дакладнага прыборабудавання.

## РЕЗЮМЕ

Саян Николай Иосифович

### **Формирование композиционных углеродсодержащих покрытий прецизионной технологической оснастки и инструмента для производства изделий электронной техники**

*Ключевые слова:* алмазоподобные углеродсодержащие покрытия, упрочнение оснастки и инструмента, легированные и многослойные покрытия, коэффициент трения, износостойкость, изделия электронной техники.

*Цель работы* состоит в разработке физико-химических основ технологии упрочнения прецизионной оснастки и инструмента, использующихся при производстве изделий электронной техники, путем нанесения на их рабочие поверхности композиционных углеродсодержащих покрытий.

*Методы исследования и аппаратура:* экспериментальное исследование процессов легирования АПП при различных условиях их синтеза и их триботехнических свойств выполнялись при помощи специального технологического, измерительного и стендового оборудования.

*Полученные результаты и их новизна.* Определены технологические и физико-химические особенности осаждения легированных алмазоподобных покрытий из импульсной катодной плазмы, магнетронным распылением и лазерным испарением. Разработаны технологические рекомендации по повышению долговечности и износостойкости матриц и пуансонов пресс-форм, мелкоразмерного режущего инструмента, включающие нанесение легированного ионно-плазменным методом АПП, выбор конструкции покрытия, концентрации легирующего элемента, режимы термообработки.

Предложена конструкция многослойного композиционного покрытия, наносимого на рабочие поверхности прецизионного мелкоразмерного инструмента. Композиционное покрытие состоит из титансодержащих и углеродсодержащих алмазоподобных слоев, легированных медью, содержание которой составляет 0,8–20 масс. %, или же карбидом титана, содержание которого составляет 1,5–15 масс. %.

*Степень использования:* предложенные конструкции покрытий прецизионной технологической оснастки, инструмента и разработанный технологический процесс используется в инструментальном производстве НПО «Интеграл».

*Область применения:* инструментальные производства предприятий электронной, радиотехнической промышленности и точного приборостроения.



## SUMMARY

Sayan Nikolay Iosifovich

### **Formation of composite carbon-containing coatings of precise toolings and implements for making electronics devices**

*Keywords:* diamond-like carbon-containing coatings (DLC), toolings and implements reinforcement, alloyed and multiplayer coatings, friction factor, wear resistance, electronic devices.

*Objective of thesis* consists in developing physical and chemical principles of technology for precision tooling and implements reinforcement, which are used during manufacture of electronic devices through coating their abrasive surface with composite carbon-containing coatings.

*Research methods and equipments:* experimental research of processes of DLC alloying under different conditions of their synthesis, as well as research of their tribotechnical properties were conducted using special process and measuring equipments and test benches.

*The results obtained and their novelty.* Established were technological, physical and chemical principles of depositing alloyed DLC from pulse cathodic plasma by magnetron sputtering and laser evaporation. Developed were technological recommendations regarding increase in durability and wear resistance of matrixes and punches of moulds and fine-sized cutting tools, including herein recommendations on applying alloyed DLC using ionic-plasma method, on selection of coating pattern, on alloying element concentration and on heat treatment conditions.

Proposed was optimal pattern of coating to be coated onto abrasive surfaces of precision fine-sized tools. The composite coating consists of titan-containing and carbon-containing diamond-like layers which are alloyed with copper the content of which is 0,8–20 mass percent, or which are alloyed with titan carbide the content of which is 1,5–15 mass percent.

*Extent of usage:* the proposed patterns of coating of precise toolings and implements, and the developed technology is used for making toolings and implements at RPC "Integral".

*Field of application:* tool-making lines of enterprises of electronics, radioelectronics and precise instrument building.

*Научное издание*

**Саян Николай Иосифович**

**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ  
ПОКРЫТИЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ  
И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ  
ТЕХНИКИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

---

Подписано в печать	11.03.2008.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.		Заказ 137.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6.