



Министерство образования  
Республики Беларусь  
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

# **Инженерно-педагогическое образование в XXI веке**

## **МАТЕРИАЛЫ**

**VII Республиканской научно-практической  
конференции молодых ученых  
и студентов БНТУ**

**Часть 2**

**Минск  
БНТУ  
2011**

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

# Инженерно-педагогическое образование в XXI веке

МАТЕРИАЛЫ  
VII Республиканской  
научно-практической  
конференции молодых ученых и студентов БНТУ

(67-й студенческой научно-технической конференции БНТУ)

21–22 апреля 2011 года

В 3 частях

Часть 2

Минск  
БНТУ  
2011

УДК 62:378 (06)

ББК 74я431

И 62

Редакционная коллегия:

*С.А. Иващенко* (гл. редактор), *А.А. Дробыш* (зам. гл. редактора), *И.А. Иванов*, *В.А. Клименко*, *Е.Е. Петюшик*, *И.И. Лобач*,

*А.А. Соловянчик*, *В.А. Федорцев*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *И.А. Иванов*;

д-р социол. наук, проф. *В.А. Клименко*;

канд. психол. наук, доц. *И.И. Лобач*;

канд. пед. наук, доц. *А.А. Соловянчик*;

канд. техн. наук *А.А. Дробыш*

В сборнике содержатся материалы VII Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов БНТУ «Инженерно-педагогическое образование в XXI веке» по направлениям: современные образовательные технологии и методики преподавания в общеобразовательной, средней специальной, средней технической и высшей школе, совершенствование системы инженерно-педагогического образования, психология, новые материалы и перспективные технологии обработки материалов.

ISBN 978-985-525-622-0 (Ч.2)

ISBN 978-985-525-624-4

© БНТУ, 2011

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЗОМЕТРИИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ**

*БНТУ, г. Минск,*

*Научный руководитель: Данильчик С.С.*

Для изучения процесса вибрационного точения, в частности сил резания и виброперемещений, может использоваться тензометрия. Устройства, позволяющие осуществлять электротензометрирование, т.е. измерение электрическими методами деформаций твердых тел, называются электрическими тензомерами. Электрический тензомер состоит из воспринимающего устройства (тензодатчика), передающего устройства и регистрирующего прибора. Наибольшее распространение получили тензодатчики сопротивления, выполненные на базе тензорезисторов, действие которых основано на их свойстве изменять под влиянием деформации (растяжения или сжатия) своё электрическое сопротивление. Деформацию тензорезисторы получают вместе с упругим элементом, на который наклеиваются. Широкое применение тензодатчиков объясняется целым рядом их достоинств:

- малые габариты и вес;
- малоинерционность, что позволяет применять тензодатчики как при статических, так и при динамических измерениях;
- обладают линейной характеристикой;
- позволяют дистанционно и во многих точках проводить измерения;
- способ установки их на исследуемую деталь не требует сложных приспособлений и не искажает поле деформаций исследуемой детали.

В практике измерений используются проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. Для изготовления тензорезисторов применяются материалы,

имеющие высокое значение коэффициента тензочувствительности. Коэффициент тензочувствительности определяется по формуле

$$k = (\Delta R / R) / (\Delta l / l),$$

где  $\Delta R / R$  – относительное изменение удельного электросопротивления тензорезистора,  $\Delta l / l$  – относительное изменение длины проволоки под действием приложенной нагрузки. Для проволочных тензорезисторов  $k \leq 2 - 2,5$ , для полупроводниковых –  $k = 100..200$ .

Наиболее часто в качестве материала для проволочных тензорезисторов используется константан, нихром, различные сплавы на основе Ni, Mo, Pt (таблица 1).

Таблица 1 – Материалы для изготовления тензорезисторов

Материал	Состав, %
Константан	45Ni, 55Cu
Карма	74Ni, 20Cr, 3Al, 3Fe
Изоэластик	36Ni, 8Cr, 0.5Mo, 55.5Fe
Нихром V	80Ni, 20Cr
Платиновольфрам	92Pt, 8W
Армюр Д	70Fe, 20Cr, 10Al

Проволочные тензорезисторы изготавливаются в виде наклеенных на тонкую бумагу или лаковую пленку зигзагообразных петель (витков) тонкой проволоки (рисунок 1).

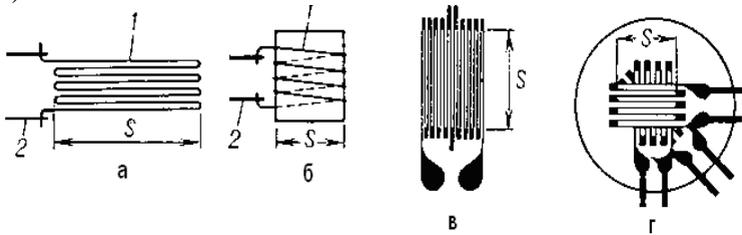


Рисунок 1 – Типы тензорезисторов:

проволочные – петлевая (а), витковая (б); фольговые – для изменения одной компоненты деформации (в), трех компонент (г), 1 – проволока; 2 – выводы решетки; S – база датчика

Наиболее употребительным материалом является константановая проволока диаметром 20–30 мкм. Номинальное сопротивление выпускаемых проволочных тензорезисторов на бумажной и пленочной основе составляет от 50 до 400 Ом с длиной базы 5–30 мм. Коэффициент тензочувствительности серийно выпускаемых тензорезисторов  $\pm 0,2$ , номинальный рабочий ток около 30 мА, максимальные допустимые относительные деформации не более 0,3%.

Фольговые тензорезисторы (рисунок 1) имеют решетку из тонких полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4–12 мкм, нанесенных на лаковую основу. Основное преимущество таких тензорезисторов – возможность изготовления решеток сложного профиля, которые наиболее полно отвечают условиям измерения.

Полупроводниковые тензорезисторы, по сравнению с рассмотренными выше, имеют следующие преимущества: их чувствительность в 50–80 раз выше, чем у проволочных; высокий уровень выходного сигнала в ряде случаев не требуют применения усилителя. К недостаткам полупроводниковых тензорезисторов относится их малая механическая прочность и гибкость.

Изменение сопротивление тензорезистора зависит от величины его относительной деформации

$$\Delta R(\varepsilon) = \pm k \cdot R \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ . Оно мало и составляет от нескольких тысячных до десятых долей Ома. Но величина  $\Delta R$  зависит не только от деформации, но и от температуры упругого элемента

$$\Delta R(\Theta) = \alpha \cdot \Delta \Theta \cdot R,$$

где  $\Delta \Theta$  – изменение температуры упругого элемента,  $\alpha$  – температурный коэффициент относительного изменения сопротивления тензорезистора. Для уменьшения погрешности требуется термокомпенсация. Термокомпенсация осу-

ществляется включением тензорезисторов в полумостовую или мостовую схемы. Наиболее широко используется мостовая схема. Мостовая схема тензодатчика представлена на рисунке 2.

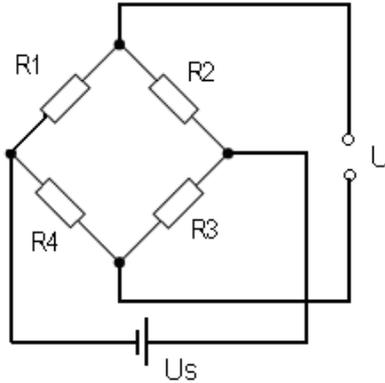


Рисунок 2 – Мостовая схема включения тензорезисторов

Она подключается к источнику тока  $U_s$ . Выходное напряжение  $U$  снимается с измерительной диагонали. Мостовая схема при одинаковых тензорезисторах гарантирует сохранение стабильности показаний, поскольку

ку при изменении температуры изменения упругой деформации в тензорезисторах будут одного знака и поэтому компенсируются. При  $R_1R_4 = R_2R_3$  ток в измерительной диагонали отсутствует. Такое состояние мостовой схемы обеспечивается балансировкой. При деформации хотя бы одного из тензорезисторов меняется его сопротивление. Баланс моста нарушается и в измерительной диагонали течет ток. Величина сигнала, снимаемого с измерительной диагонали, пропорциональна относительной деформации  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4,$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  – относительные деформации тензорезисторов. Выходной сигнал  $U$  моста с проволочными тензорезисторами составляет не более 10..50 мВ при деформации 1%.

Для измерения амплитуды колебательного движения резца и исследования его траектории движения в процессе

точения с вибрациями тензодатчики крепились на упругую балку равного сопротивления, а для измерения сил резания – на державку резца (рисунок 3).

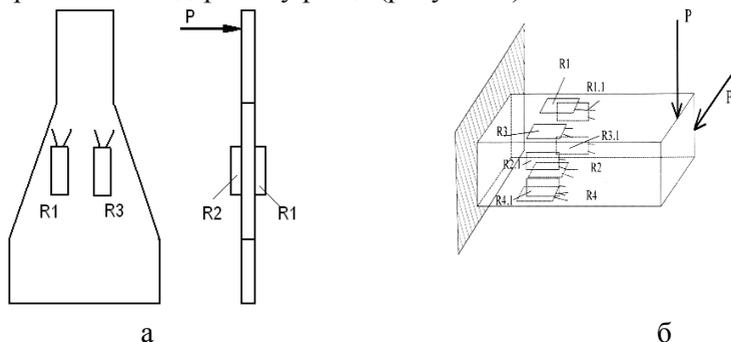


Рисунок 3 – Схема расположения тензорезисторов на балке равного сопротивления (а) и державке резца (б)

Сигналы измерительной диагонали усиливались восьмиканальным усилителем Spider 8 и поступали на персональный компьютер. Предварительно тензометрическая система была оттарирована с использованием индикатора часового типа и динамометра.

УДК 629.331.027.5-049.32

Аникина А.А.

## **АВТОМОБИЛЬНЫЕ ШИНЫ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Плевко А.А.*

Как известно без колесной техники немислимо современное человеческое общество. Автомобильная шина является одной из самых важных элементов автомобиля. Она предназначена для поглощения незначительных колебаний, вызываемых несовершенством дорожного покрытия, компенсации погрешности траекторий колес, реализации и восприятия сил, возникающих в пятне контакта и обеспечения высокого коэффициента сцепления. Поэтому, особенно повышенное внимание должно уделяться бе-

режнему отношению к шинам. Хорошее состояние покрышек – это гарантия прочного и надежного контакта автомобиля с дорожным полотном, что является основой для обеспечения безопасности пассажиров и водителя [1, с. 127].

Однако в процессе эксплуатации шины изнашиваются и их приходится ремонтировать из-за проколов, порезов, вздутий и нарушений геометрии. Основными способами ремонта являются ремонт без разбортирования и с разбортированием шины.

Ремонт без разбортирования шины специалисты считают временным (упрощенным, дорожным) и рекомендуют позже окончательно отремонтировать шину, сняв ее с обода. Этот вид ремонта помогает завершить поездку, когда нет инструмента (домкрата, баллонного ключа) или запаски, недостаточно времени или неподходящие условия для ее установки. При этом способе ремонта применяют герметики, жгуты или вставки [2].

Ремонт с разбортированием шины без горячей вулканизации оправдан только при проколах на беговой дорожке.

Бескамерные шины. Небольшие проколы можно заклеить изнутри универсальной заплатой. Повреждения, после обработки, которых остается отверстие до 6 мм в диаметре, ремонтируют:

- грибком, если ось отверстия приблизительно перпендикулярна поверхности беговой дорожки;
- ножкой – при углах наклона более  $25^\circ$  – сначала заделывают канал отверстия, а затем, изнутри наклеивают универсальную заплату.

Камерные шины. При их ремонте необходимо восстановить герметичность камеры соответствующей заплатой, а кроме того ликвидировать отверстие в покрышке, даже если внешне ее корд не пострадал. Это нужно, чтобы к нему не попадала влага и не разрушала его, а также для усиления каркаса. Камеру с поврежденным вентилем ре-

монтируют, приклеивая в другом месте специальный ремонтный вентиль.

В шиномонтажной мастерской, помимо перечисленных видов, делают горячий ремонт при проколах в плечевой зоне, боковине и при крупных повреждениях беговой дорожки, а также работы, для которых нужны специальный инструмент и приспособления (буры, кусачки, шарошки, дрели с разной скоростью вращения и т.д.).

На сегодняшний день известно три способа «обуть» автомобиль:

1. Купить комплект новых качественных шин. Это самый дорогой способ. Если экономия сотен тысяч рублей – не решающий фактор, то это лучший вариант.

2. Самый выгодный вариант – это поставить качественно восстановленные шины.

3. Поставить б/у резину. Часто такая резина выхаживает очень мало, несмотря даже на приличный запас рисунка протектора, потому что стерт верхний, препятствующий износу слой. Выглядеть такие шины могут почти как новые, однако ходимость таких шин не соответствует даже их небольшой цене. Этот факт можно легко подсчитать, разделив стоимость шины на количество км пробега и сравнив его со стоимостью км пробега новой или восстановленной шины.

В настоящее время существуют два метода восстановления шин. Это так называемые горячий и холодный метод «реинкарнации» восстановления покрышки. Рассмотрим эти две технологии в сравнении [3].

Общим для этих двух методов является: отбор пригодных для восстановления изношенных шин; удаление остатков старого протектора (шероховка); ремонт очищенной основы: удаление осколков стекла, щепы, металлических включений, заделка сырой резиной мест повреждений.

Отличие технологий:

При холодном восстановлении на каркас наносится клеящий слой, затем на него укладывается специальная вулканизированная протекторная лента с готовым рисунком или надевается протекторное кольцо – в зависимости от технологии. Далее шина попадает в устройство, где в нее вставляется специальная камера и сверху надевается резиновый конверт. Потом шина направляется в камеру-вулканизатор (автоклав), где при давлении не менее 6 бар и температуре 100..115 градусов по Цельсию, ее выдерживают 3-4 часа.

Преимущества: Благодаря сравнительно не высокой температуре вулканизации каркас не теряет свои качественные характеристики, и срок эксплуатации такой шины выше, чем у восстановленной горячим методом. При холодном способе восстановления шина теоретически имеет возможность быть отреставрированной второй, третьей, четвертый раз.

Недостатки: Не идеальный внешний вид, нет возможности нарезки протектора

По этой технологии восстанавливают шины размером от 15" до 24". В основном это изношенные шины грузовиков, самосвалов и покрышки класса «Джип».

При горячем способе наварки, на шину наносят слой не вулканизированной резины, рисунок протектора формируется на ней в процессе вулканизации. Рисунок соответствует рисунку пресс-формы, в которой под давлением и температурой 140 градусов происходит вулканизация. Сейчас этот метод устарел и применяется в основном для легковых шин, размером 13"-16", микроавтобусов.

Преимущества: Идеальный внешний вид – как у нового колеса, возможность нарезки протектора.

Недостатки: Из-за высокой температуры нарушается структура каркаса. Так как все дефекты будут скрыты под новым слоем резины, зачастую в восстановление идут каркасы второго сорта, которые уже не идут в холодное восстановление (либо из-за серьезных повреждений, либо

из-за старости каркасов) или каркасы неизвестных производителей.

В процессе анализа литературы было выявлено, что выгоднее восстанавливать шины размером от 15" до 24" холодным методом, в основном это изношенные шины грузовиков, самосвалов и покрышки класса «Джип». Так как, это экономически выгодно – применяется более простое и дешевое оборудование, достигается превосходное качество восстановленного протектора, из-за невысокой температуры вулканизации протектора, а также есть возможность восстановить шину несколько раз. А также при сравнении цен и качества белорусской новой шины R14 и восстановленной (наваренной) немецкой оказалось, что изготовление нового отечественного колеса R14 сопоставимо по стоимости с наваренным в Германии. В тоже время межремонтный пробег наваренного импортного колеса составляет 1,37 от нового R14 белорусского производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко, Н.А. Техническая эксплуатация автомобилей: учебное пособие / Н.А. Коваленко, В.П. Лобах, Н.В. Вепринцев. – Минск: Новое издание, 2008. – 352 с.
2. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Ремонт автошин. – Минск, 2011. – Режим доступа: <http://ukrbbs.com>
3. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Восстановление шин холодным способом. – М, 2011. – Режим доступа: <http://navarkashin.ru>.

УДК 667.633.2

Ардынович А.А., Журавлева М.В.  
**МОДИФИКАЦИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ  
ПОЛИАМИДОКИСЛОТОЙ**

*БГТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Крутько Э.Т.*

*Эпоксидные олигомеры и эпоксидные композиции, модифицированные соединениями, содержащими имидные цик-*

*лы, в последние годы представляют значительный научный и практический интерес. Имидные фрагменты теплоустойчивы, и их присутствие в структуре полимерных материалов приводит к высокой термостабильности. Целью данной работы являются разработка и исследование пленкообразующего композита с улучшенными физико-механическими и термическими свойствами путем модификации эпоксидианового олигомера форполимером полиимида – полиамидокислотой.*

Эпоксидные олигомеры и эпоксидные композиции, модифицированные соединениями, содержащими имидные циклы, в последние годы представляют значительный научный и практический интерес [1]. Это объясняется тем, что имидные фрагменты обладают рядом уникальных свойств. Таких свойств, как высокая термическая стабильность, хорошие механические и электрофизические показатели, устойчивость к воздействиям высоких энергий, сохраняющимся в широком температурном интервале. Таким образом, присутствие имидных фрагментов в составе полимерных композиций будет обеспечивать улучшение эксплуатационных свойств покрытий.

Целью данной работы являются разработка и исследование пленкообразующего композита с улучшенными физико-механическими и термическими свойствами путем модификации эпоксидианового олигомера форполимером полиимида – полиамидокислотой.

Основным объектом настоящего исследования являлась промышленно производимая эпоксидная смола Э-41 в растворе (Э-41р) (ТУ 6-10-607-78), представляющая собой раствор смолы Э-41 с массовой долей  $(66\pm 2)\%$  в смеси ксилола (ГОСТ 9410-78, ГОСТ 9949-76) с ацетоном (ГОСТ 2768-84) в соотношении 4:3 по массе.

Раствор смолы Э-41 в смеси ксилола с ацетоном (смола Э-41р) применяется для изготовления лакокрасочных материалов.

Смола Э-41р относится к средномолекулярным (мол. масса 900-2000) эпоксидным диановым смолам. Ее плотность – (1,03-1,06) г/см<sup>3</sup>.

Синтез полиамидокислоты (ПАК) осуществляли путем низкотемпературной поликонденсации (10-15°С) тщательно очищенных исходных мономеров в свежеперегнанном в вакууме диметилформамиде (ДМФА) при их эквимольном соотношении.

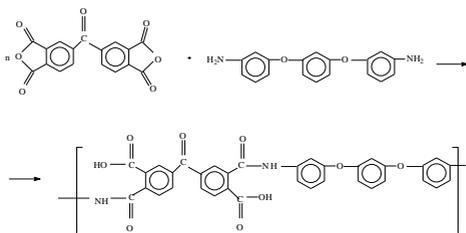


Рисунок 1

Синтез осуществляли по схеме:

Наличие большого числа активных функциональных групп (карбокисильных, амидных, карбонильных,

концевых ангидридных и аминогрупп) в ПАК предопределяет принципиальную возможность их взаимодействия с эпокси- и гидроксильными группами эпоксидианового олигомера, обеспечивающего формирование густосшитой сетчатой структуры в пленкообразователе при термообработке системы [2].

Предварительными опытами было установлено, что наилучшие результаты в процессе модифицирования достигаются при использовании ПАК с удельной вязкостью 0,5% – ных растворов ПАК 0,25-0,35.

Экспериментально установлено, что растворы ПАК в ДМФА любой вязкости хорошо совмещаются с эпоксидиановыми олигомерами, не расслаиваясь в течение заданного времени хранения композитов [3].

Пленкообразующие композиты получали путем введения в эпоксидиановую смолу Э-41Р с отвердителем (полиамидная смола в ксилоле) 20%-ного раствора ПАК в ДМФА в количестве 0,5-5%, от массы сухого остатка с последующим перемешиванием компонентов смеси до

получения однородной массы. Из полученных лаковых растворов отливали пленки на металлические (медные, стальные) и стеклянные подложки. Отверждение покрытий осуществляли путем прогрева пленкообразующих композитов в термощкафу при температуре 100°C в течение 60-220 мин.

Адгезионную прочность сформированных покрытий определяли по стандартной методике в соответствии с ISO 2409 и ГОСТ 15140-78 методом решетчатого надреза с обратным ударом.

Прочность при ударе образцов покрытий оценивали с использованием прибора «Удар – Тестер» в соответствии со стандартом ISO 6272 и ГОСТ 4765-73.

Прочность покрытий при изгибе определяли с помощью устройства, состоящего из стойки с креплением и набора цилиндров различного диаметра (ISO 1519, ГОСТ 6806-73).

Важной характеристикой лакокрасочных покрытий является твердость. Этот показатель определяли на маятниковом приборе (ISO 1522).

ИК-спектры образцов пленок, полученных на стеклянных подложках, снимали на приборе FI-IR (ИК-Фурье спектрометр фирмы «Thermo Nicolet» США).

Развитие сетчатой структуры в присутствии полиамидокислоты ускоряется благодаря тому, что ПАК дополнительно превносит в систему эпоксид – полиамин дополнительно карбоксильные и амидные активные центры, способствующие не только более эффективным химическим взаимодействиям, но и автокатализу целого ряда протекающих в системе конкурирующих реакций благодаря подвижным протонам карбоксиамидных фрагментов ПАК и отвердителя. Кроме того, в молекулах ПАК не исключены реакции: имидизации, деструкции, гидролиза, декарбоксилирования, протекающие под действием температурно-временных полей и выделяющейся циклизационной воды в процессе высокотемпературной обработки защитных

слоев при формировании покрытий [4]. Эти превращения генерируют еще большее количество функциональных групп, способствующих структурообразованию в покрытии и увеличению адгезионного сцепления с субстратом.

В ИК-спектрах пленок модифицированных эпоксидиановых композитов, препарированных в адекватных режимах с немодифицированными, четко прослеживается появление полос поглощения в области  $1725\text{ см}^{-1}$  (в дуплете с  $1780\text{ см}^{-1}$ ), характерных для валентных колебаний карбонильных групп и групп имидных циклов. Причем интенсивность этих полос изменяется в зависимости от температуры и продолжительности прогрева образцов.

В ИК-спектрах также четко регистрируются полосы поглощения в области  $1650\text{-}1660\text{ см}^{-1}$  (амидные группы), и широкая полоса поглощения в области  $3200\text{-}3600\text{ см}^{-1}$  (карбоксильные и гидроксильные группы).

На основании проведенного исследования синтезирована новая пленкообразующая имидосодержащая композиция, с улучшенными адгезионными свойствами, повышенной твердостью, ударопрочностью, влаго- и водостойкостью. Установлено, что модифицирующий компонент катализирует процесс отверждения эпоксидианового покрытия, и повышает его термическую стабильность и коррозионную стойкость к агрессивным воздействиям внешней среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асланов, Т.А. Теплостойкие полимеры на основе эпоксидных олигомеров и ароматических диэфирдисульфимидов / Т.А. Асланов [и др.] // Пластические массы. – 2008. – № 2. – С. 20–22.
2. Способ получения термо- и теплостойких эпоксидных материалов на основе эпоксидиановых олигомеров, содержащих диимиды пиромеллитовой кислоты: а.с. 639882 СССР, МКИЗ C08G2/30 Ю. В. Гулиев, И. Д. Волков, С. М. Карякин; Казан. техн. ин-т. № 639882; заявл. 24.10.76; опубл. 08.11.78 // Бюл. изобр. – 1979. – № 48. – С. 134.

3. Николайчик, А.В. Химическая модификация эпоксидного олигомера форполимером полиимида / А.В. Николайчик [и др.] // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2004. – Т. 9. – №4. – С. 44–49.

4. Крутько, Э.Т. Полиимиды. Синтез. Свойства. Применение / Э.Т. Крутько [и др.]; под общ. ред. Н.Р. Прокопчука. – Минск: БГТУ, 2002. – 302 с.

УДК 621.1

Басаранович А.В.

## **СПЕКАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ГРАНИТА**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Дробыш А.А.*

Гранит – одна из самых распространенных кристаллических горных пород, традиционно применяющихся в индустрии. Благодаря своим уникальным качествам: механической прочности, морозостойкости, долговечности гранит является перспективным сырьем для получения пористых материалов. Прочность любого материала определяется уровнем его влагопоглощения. Гранит превосходит по этому показателю все остальные материалы

В состав гранита входят полевой шпат, слюда, кварц, а также некоторые другие минералы. Их соотношение определяет прочность и цвет камня. По величине зерен различают граниты крупнозернистые (>10 мм), среднезернистые (2–10 мм) и мелкозернистые (<2 мм).

Согласно модели гранитообразования по типу эвтектидного плавления, предложенной финским ученым П. Эскола соотношение компонентов в сплаве всегда остается постоянным. Температура плавления кварца около 1600°C, температура плавления альбита (натрового полевого шпата) на 200°C ниже. Логично предположить, что добавка более легкоплавкого компонента облегчает плав-

ление. Так и происходит на самом деле. Поэтому химический состав гранита практически не изменяется, а физико-механические характеристики значительно выше, чем у других минералов.

#### Химический состав гранита, %

$\text{SiO}_2 - 49,5 \div 51,5;$

$\text{Al}_2\text{O}_3 - 15,0 \div 16,5;$

$\text{TiO}_2 - 0,8 \div 1,5;$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 - 11,5 \div 13,5;$

$\text{CaO} - 9,0 \div 10,0;$

$\text{MgO} - 4,8 \div 6,6;$

$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - 3,5 \div 4,5.$

#### Физико-механические характеристики гранита:

1. Объемная масса – 2,6 -3,2 г/см<sup>3</sup>.
2. Твердость по шкале Мооса – 6-7.
3. Водопоглощение – не более 0,9%.
4. Прочность на сжатие Мпа – 250.
5. Удлинение при разрыве % –  $\approx 2,5$
6. Температура плавления °С –  $\approx 1200$ .
7. Морозоустойчивость – 300.

По химическому составу граниты Микашевичского месторождения отвечают требованиям, предъявляемым промышленностью для производства тонких и супертонких базальтовых волокон.

Для исследования кинетики перераспределения фаз в процессе спекания дисперсных сред из эвтектических композиций на основе гранита исходное сырье подвергалось дроблению. После чего производилось радиальное прессование экспериментальных образцов и последующее спекание. В результате исследований установлено следующее.

При большем содержании альбита, температура образования жидкой фазы располагается ниже предыдущих, что соответствует снижению температуры плавления смеси. Однако все это происходит лишь до определенного

предела. Существует такая смесь альбита и кварца, которая является наиболее легкоплавкой, и дальнейшее увеличение доли альбита уже не снижает, а повышает температуру, необходимую для образования достаточного количества жидкой фазы. Исходя из диаграммы следует, что наиболее легкоплавкой будет смесь с 40% кварца и 60% альбита. Это соответствует составу кварц-альбитовой эвтектики. Подобной эвтектике и отвечают соотношения главных компонентов гранита (кварца, плагиоклаза и калиевого полевого шпата). Это означает, что в спекаемых экспериментальных образцах, содержащей какое-то количество этих минералов, при нагревании ее до температуры плавления эвтектики обязательно появится гранитный расплав.

Сравнение исследуемых составов по количественному содержанию в них гранитного расплава затруднено, так как на интенсивность рентгеновских рефлексов помимо концентрации фазы значительное влияние оказывают сложность структуры гранита и ориентация его чешуйчатых агрегатов в объеме исследуемого материала. Присутствие в исследуемых пробах гидрослюдистых минералов и кварца не позволило оценить степень упорядоченности кристаллической структуры гранита ввиду недостаточной степени разрешения соответствующих рентгеновских рефлексов на дифрактограммах. Согласно проведенной ИК-спектроскопии максимум полосы поглощения при  $1100\text{ см}^{-1}$  отчетливо выражен, что в совокупности с достаточной разрешенностью двух средних полос поглощения альбита в области валентных колебаний его гидроксильных групп является качественным критерием высокой кристаллическости породообразующего минерала (альбита) в исследуемых составах. Применительно к исследуемым материалам вы-

сокие показатели физико-механических характеристик полученных образцов, скорее всего, обусловлены высоким содержанием в ней тонкодисперсных минералов, присущих эвтектическим композициям.

Результаты рентгенографического исследования показали, что основными кристаллическими фазами, фиксируемыми на дифрактограммах всех проб, являются кварц, полевой шпат и кристобаллит. Установлено, что образование кристобаллита в количестве 6-7 % при спекании фиксируется уже при температуре 1000°C и протекает через индукционный период в температурном интервале 1000-1150°C с последующим резким ускорением процесса синтеза в достаточно узком температурном интервале 1150-1200°C, обеспечивая увеличение выхода кристобаллита с 7 до 18 %.

Дальнейшее повышение температуры спекания с 1100 до 1300°C сопровождается не только накоплением кристобаллита, но и совершенствованием его структуры и стабилизацией состава, о чем свидетельствует степень разрешения рентгеновского дуплета кристобаллита. Резкое уменьшение содержания кварца при спекании в интервале температур 1100-1200°C связано с процессом трансформации его в кристобаллит (особенно в тонкодисперсной части), что проявляется в появлении на соответствующих дифрактограммах интенсивных рефлексов кристобаллита, в то время как снижение содержания кварца в образцах с повышенным содержанием добавок каолина при аналогичных температурах обусловлено, скорее всего, процессами его растворения в образовавшемся к этому моменту силикатном расплаве, доказательством чему служит отсутствие либо крайне незначительное (на уровне следов) рентгенографическое проявление кристобалита.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ПРОНИЦАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Дробыш А.А.*

Технологические схемы получения пористых проникаемых изделий (ППИ) из оксидной керамики характеризуются общностью этапов, на каждом из которых заготовка (порошок) приобретает свойства, необходимые для осуществления последующих операций, формирования структуры пористого материала.

Производство порошков осуществляют, как правило, на специализированных предприятиях. В зависимости от способа получения порошков форма их частиц может быть самой разнообразной, а размер частиц колеблется от долей микрометра до 1 мм и более. Порошки поставляются изготовителем готовыми к использованию в соответствии со стандартами или техническими условиями, регламентирующими их характеристики, основными из которых являются химический и гранулометрический состав, механические свойства материала.

При подготовке к непосредственному использованию керамические порошки могут дополнительно подвергать сушке, рассеву на фракции, сфероидизации либо, напротив, активированию частиц усложнением их формы (увеличением удельной поверхности) путем обработки в атриторах, прессования и размола и др. Консолидацию керамического порошка в ППИ традиционно осуществляют посредством формообразования заготовок и их последующего спекания. В силу технологических особенностей керамических порошков, обусловленных их низким ресурсом пластичности и высокими температурами плавления, эти операции в подавляющем большинстве случаев

требуют использования добавок к основному материалу (приготовления минеральных композиций): пластифицирующих, связующих, упрочняющих, активирующих, порообразующих. В качестве связующих добавок используют жидкое стекло, водные суспензии глин, клеи и др. К упрочняющим относят цемент, глины, сульфитцеллюлозный экстракт и др. Активирующие спекание добавки – волластонит и др. Порообразующие добавки – опилки, древесная мука, уголь (антрацит), графит, сахароза, доломит, нефтяной кокс и др. Процесс подготовки шихты, таким образом, включает дозирование всех ее компонентов и смешивание в заданной последовательности при определенных условиях (режимах). В технологии получения керамических ППИ операция подготовки шихты является одной из ключевых, поскольку ее результат оказывает определяющее влияние и на процесс формообразования заготовок и на процесс спекания.

Важнейшей технологической операцией при получении любых ППИ, в том числе, из керамических материалов, придающей им форму, размеры, плотность, предварительную прочность и формирующей структуру порового пространства, является формообразование заготовок, которое осуществляют формованием с приложением давления (прессованием) и без приложения давления.

Формование без приложения давления уплотняемых материалов позволяет изготавливать изделия в широком диапазоне форм и размеров, но не находит широкого практического применения из-за низкой производительности и невозможности получения ПМ с достаточно высокой плотностью и прочностью.

В связи с этим большее распространение получили способы обработки давлением уплотняемых материалов, различающиеся по ряду условий реализации процесса: температуре, скорости приложения нагрузки и др.

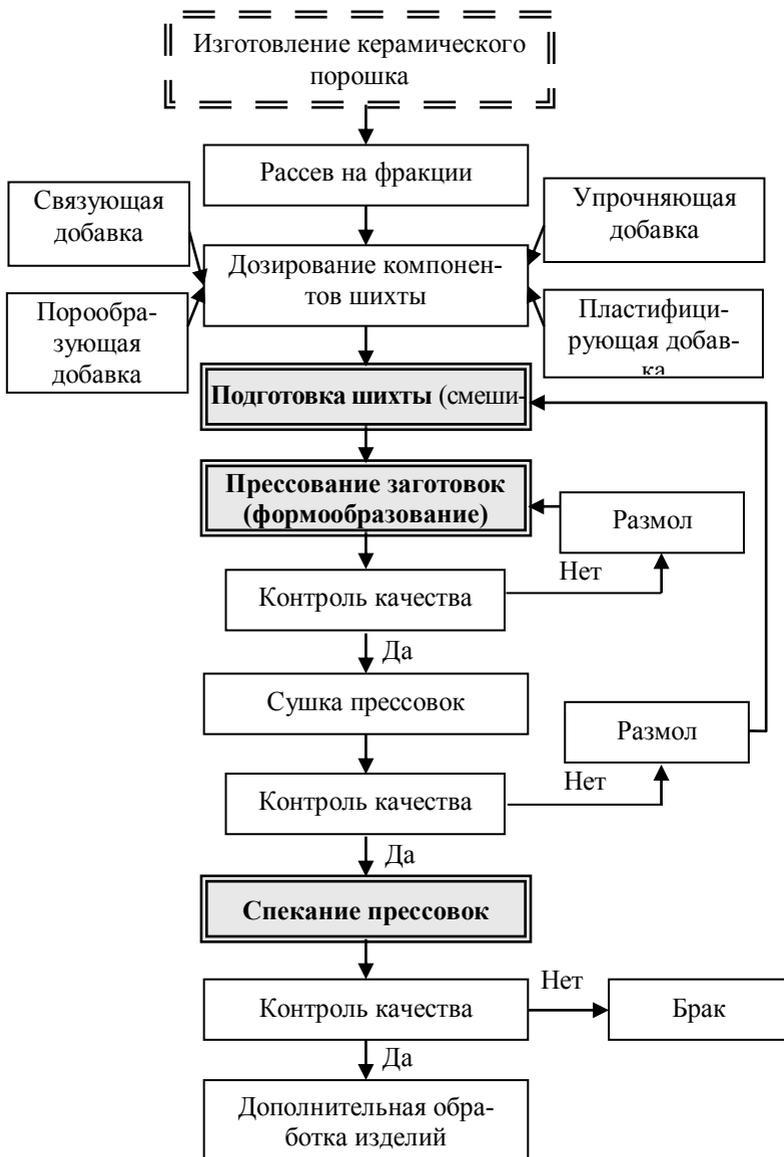


Рисунок 1 – Типичная технологическая схема получения ППИ на основе керамики

Высокотемпературные способы прессования направлены преимущественно на получение высокоплотных материалов и в производстве ППИ практически не используются.

Высокоскоростные способы прессования не позволяют получать ППИ с высокой пористостью, и поэтому также мало распространены в производстве ППИ.

Способы прессования шихты со статическим приложением нагрузки позволяют варьировать свойствами прессовок в более широком диапазоне. В зависимости от реализуемой схемы, вида технологического оборудования и инструмента конкретные способы прессования ориентированы на получение того или иного вида изделий. Так, прессование в жестких прессформах с одноосным нагружением используют преимущественно для изготовления ППИ в форме дисков, таблеток. Прокаткой порошков получают ППИ в форме листов. Мундштучным прессованием (экструзией) получают длинномерные ППИ разнообразной формы. Однако необходимость использования при экструзии значительного количества вспомогательных материалов в составе шихты отрицательно сказывается на прочностных свойствах отформованных заготовок, способствует загрязнению материала продуктами сгорания в процессах спекания. Кроме того, может иметь место искажение формы изделий на стадиях сушки и спекания, чем ограничен выход годных. Гидростатическим прессованием получают изделия разнообразной формы и типоразмеров с равномерным распределением плотности по объему. Ограничениями к широкому распространению способа при получении ППИ является относительно низкая производительность, сложность подготовки прессформ (нужны герметизация и вакуумирование), низкая культура производства из-за контакта рабочей жидкости с прессформой.

Способ радиального прессования позволяет получать длинномерные осесимметричные ППИ в форме труб, ста-

канов, конусов, с развитой поверхностью. Изделия такой формы находят наибольшее применение в процессах фильтрации и разделения сред, что в совокупности с достаточно высокой производительностью и низкими энергозатратами способа прессования позволяет эффективно использовать его для прессования заготовок ППИ, в том числе, из малопластичных керамических порошков. Это позволяет рассматривать способ сухого радиального прессования как базовый при разработке технологии получения ППИ на основе кварцевого песка.

Придание основных механических свойств (каркасных характеристик) порошковым изделиям происходит на стадии спекания. Спекание керамических ПМ осуществляют обычно в электрических печах сопротивления, газовых печах. Процесс реализуют преимущественно по твердофазному механизму, чем обеспечиваются малые значения объемной усадки. Спекание многокомпонентных систем в основном осуществляют по жидкофазному механизму, позволяющему получать изделия с высокой прочностью: жидкая фаза, кристаллизуясь, играет роль связки, цементирующей изделие в целом. Но спекаемые по жидкофазному механизму изделия дают большую усадку. Поэтому существуют проблемы технологического управления структурными характеристиками изделий на стадии спекания, которые решают, например, использованием порообразующих добавок, удаляемых при спекании путем их выгорания. Порошки, склонные к окислению, спекают в защитных средах. Высокая устойчивость оксидной керамики к окислению позволяет осуществлять спекание без использования защитных сред.

Процессы спекания характеризуются высокой энергоемкостью. Снижения температуры спекания добиваются введением активирующих добавок. Поскольку этот способ имеет физические ограничения, обусловленные природой материала в каждом конкретном случае, получают развитие и новые способы консолидации керамических

спрессованных заготовок или непосредственно порошков в пористые изделия: самораспространяющийся высоко-температурный синтез, гидротермальный синтез, позволяющие получать изделия с высокой химической и термической стойкостью, бипористые изделия. Однако эти способы пока не получили широкого практического распространения.

Дополнительная обработка может включать операции, формирующие комплекс окончательных свойств готовых керамических ППИ. Это и механическая обработка с целью придания заданных размеров и формы изделий, и химико-термическая упрочняющая обработка, направленная на повышение механических свойств, и формирование заданных структурных характеристик материала пористого изделия (например, нанесение мембранных слоев с использованием методов коллоидной химии).

Из рассмотрения технологической схемы получения ППИ на основе керамических материалов можно отметить следующее. Достаточно разработанные технологические схемы получения керамических ППИ содержат резервы для совершенствования практически на всех стадиях их реализации как с точки зрения снижения материальных и трудовых затрат, так и с точки зрения повышения качества и конкурентоспособности, расширения номенклатуры получаемых изделий.

УДК 621.5

Богач Н.Л.

## **ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВИДЫ ВАКУУМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Шахрай Л.И.*

Оптические покрытия позволяют существенно изменять оптические параметры поверхности детали: управлять интенсивностью отраженного и пропущенного излучения (просветляющие и высокоотражающие покрытия), изменять

спектральный состав отраженного и пропущенного излучения (спектроделительные и фильтрующие покрытия), изменять состояние поляризации и фазовые характеристики излучения (интерференционные поляризаторы и фазовые вращатели). Получили развитие покрытия, выполняющие одновременно несколько функций в различных участках спектра – многоспектральные покрытия.

С помощью тонкослойных покрытий можно существенно повысить механическую и химическую устойчивость поверхности (токопроводящие покрытия), изменить ее электрические свойства (токопроводящие покрытия) т.д.

Основными критериями качества пленочных материалов являются: прозрачность, показатель преломления, однородность, плотность, адгезия, твердость, механическое напряжения, устойчивость к воздействию окружающей среды и т.д.

Свойства оптических покрытий определяется конструкцией интерференционных систем (число слоев, их последовательностью, толщинами, показателями преломления и др.), методом нанесения слоев, их природой и материалом оптической детали. Контроль и стабилизация технологических параметров и режимов нанесения слоев в процессе формирования покрытий обеспечивает высокую воспроизводимость свойств покрытий.

Теория интерференционных покрытий к настоящему моменту достаточно развита. У нас в стране и за рубежом разработаны современные методы синтеза покрытий (нахождение конструкции покрытия, обеспечивающей необходимых оптические и эксплуатационные параметры), которые в сочетании с современными ЭВМ позволяют решать сложнейшие задачи с достаточно хорошим приближением к оптимальному решению. Например, сверхширокополосные просветляющие покрытия высокой оптической эффективности, различные многоспектральные просветляющие и спектроделительные покрытия со

сложным распределением интенсивности отраженного и пропущенного излучений по спектру, выполняющие одновременно определенные функции в различных участках оптического спектра.

Современный каталог оптических покрытий включает в себя широкий ассортимент покрытий, различных по назначению, конструкции, составу и свойствам для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра:

1) *ахроматические просветляющие* покрытия в видимом диапазоне спектра с шириной полосы  $\Delta\lambda = 300$  нм и остаточным коэффициентом отражения  $r < 0,5$  %;

2) *просветляющие* покрытия на подложках из полупроводниковых материалов и оптической керамики (Ge, ZnS, ZnSe,  $MgF_2$ ) для ИК диапазона спектра;

3) *защитно-просветляющие* покрытия на гигроскопичные кристаллы (KCl, NaCl) с остаточным коэффициентом отражения  $r < 2$  %;

4) *защитно-просветляющие* покрытия на кварцевых стеклах, устойчивые к агрессивным, в т.ч. фторсодержащим средам для выходных окон эксимерных лазеров с  $\lambda = 248$  нм (взамен дорогостоящих и нестойких кристаллов CaF);

5) *многослойные диэлектрические отражающие* покрытия для генераторов лазерного излучения на различных подложках из полупроводниковых материалов (CaAs, GaInAs, AsSb), лейкосапфира ( $Al_2O_3$ ) для ближнего ИК диапазона (0,88–3,5 мкм);

6) *высокоотражающие* покрытия с коэффициентом отражения  $r > 99$  % («суперзеркала») на основе многослойных диэлектрических интерференционных пленочных структур;

7) *высокопрочные металлические зеркальные* покрытия с защитой на основе окислов на оптических деталях диаметром до 400 мм;

8) *светоделительные* покрытия на основе металлов (Ti) и многослойных интерференционных пленочных структур без заклеивания с любым соотношением прошедшего и отраженного световых потоков со стабильными характеристиками;

9) *интерференционные фильтры* в УВИ-диапазоне спектра с требуемой спектральной характеристикой (в т.ч. полосовые, отрезающие, имитирующие характеристики цветных и ультрафиолетовых стекол УФС) со стабильными характеристиками;

10) *узкополосные многослойные фильтры* для видимого и ИК-диапазонов с полосой пропускания  $\Delta \lambda_{0,5}/\lambda_{\text{макс}} = 0,005$ .

Таким образом, уровень современного оптического прибора во многом определяется наличием покрытий с необходимыми оптическими или эксплуатационными параметрами.

Для нанесения покрытий используются различные вакуумные и химические методы и оборудование, выбор которых определяется требованиями к поверхностям и возможностями их производства.

УДК 681.5.017

Боровская Т.В.

## **АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ САПР T-FLEX CAD**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Койда С.Г.*

*Знание основ автоматизации проектирования и умение работать со средствами САПР требуется практически каждому инженеру-разработчику. Компьютерами насыщены проектные подразделения, конструкторские бюро и офисы. Работа конструктора за обычным кульманом или оформление отчета на пишущей машинке стали анахронизмом. Предприятия, ведущие разработки без САПР или*

*лишь с малой степенью их использования, оказываются неконкурентоспособными как вследствие больших материальных и временных затрат на проектирование, так и из-за невысокого качества проектов.*

Активное внедрение компьютерных технологий в последнее десятилетие весьма остро поставило задачу совершенствования графической подготовки инженеров. Традиционно графическая подготовка инженеров обеспечивалась изучением начертательной геометрии, геометрического, проекционного и профессионального направленного черчения. Это не вызывало необходимости изменения самих технологий проектирования и соответственно, методик обучения. С появлением мощных персональных компьютеров и систем двух- и трехмерного моделирования изменились и подходы проектирования.

Курсовые проекты по: основам конструирования станочных приспособлений, деталям машин выполняются для закрепления знаний теоретического курса и практического их применения, т.е. приобретения первоначальных умений в конструировании.

T-FLEX CAD изначально разрабатывалась как среда параметрического проектирования. Под параметризацией в рассматриваемом случае понимается построение и многократное использование элементов библиотеки стандартов с возможностью изменения их основных параметров. При изменении основных параметров автоматически происходит изменение всех связанных с ним математическими или логическими выражениями остальных параметров чертежа. Таким образом, параметризация может стать хорошим подспорьем в вопросах типового проектирования, если при проектировании новых изделий за основу берется уже существующие элементы библиотеки и производится их корректировка путем изменения размеров.

Среда параметрического проектирования T-FLEX CAD принадлежит к системам автоматизированного проектирования (САПР) среднего уровня автоматизации, наравне

с такими системами как, Auto CAD и Solid Works. На сегодняшний день T-FLEX CAD позволяет создавать двух- и трехмерные параметрические модели, оформлять конструкторскую документацию, создавать чертежи и сборочные конструкции любой степени сложности.

Механизм параметризации в T-FLEX CAD нашел достаточно простое решение в виде переменных. Если рассматривать эти же действия, применительно к Auto CAD, то для создания параметрического чертежа конкретной детали, необходимо написать программу на встроенном в AutoCAD языке AutoLisp, предварительно ознакомившись с синтаксисом этого языка. Конечно, можно перерисовать чертеж. Не заново, а лишь изменив положение некоторых линий, что потребует некоторого времени.

Одним из преимуществ системы T-FLEX перед другими CAD-системами является возможность создания параметрических сборочных чертежей, в которых отдельные части-детали связаны между собой. При модификации чертежа сохраняются все основные зависимости между параметрами отдельных деталей. Более того, одновременно с модифицированным сборочным чертежом мы получим полный набор чертежей-деталей, которые участвовали в сборочном чертеже. При этом они будут иметь те параметры, которые получились в результате пересчета сборочного чертежа.

Прежде чем создавать сборочный чертеж, необходимо предварительно продумать его структуру и создать его составляющие части в виде чертежей-фрагментов. Создание сборочного чертежа заключается в последовательном нанесении на чертеж фрагментов.

Чертежи-фрагменты, которые участвуют в сборочном чертеже, могут быть переменными, то есть в зависимости от каких-либо условий в сборочном чертеже будет участвовать тот или иной чертеж-фрагмент. Каждый фрагмент может в свою очередь также состоять из фрагментов, причем уровень вложенности фрагментов практически не

ограничен. На основе фрагментов, входящих в состав сборочного чертежа, можно создать детализировочный чертеж.

При проектировании при помощи T-FLEX CAD можно выделить шесть основных этапов проектирования.

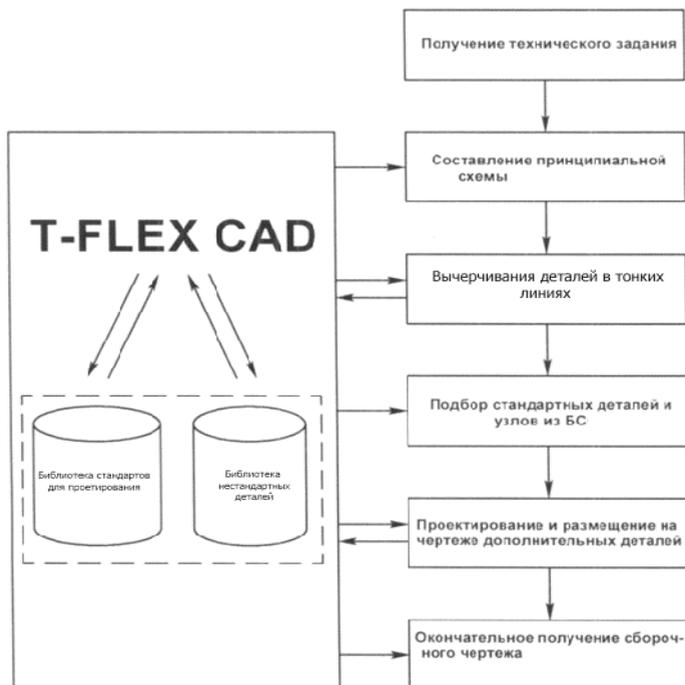


Рисунок 1 – Алгоритм проектирования с помощью САПР T-FLEX CAD

**Первый этап.** Получение технического задания (задание на курсовой проект). На этом этапе студент получает чертеж детали и указание на проектирование станочного приспособления в соответствии с техническим заданием.

**Второй этап.** С помощью средств T-FLEX CAD в нужном количестве проекций тонкими сплошными линиями изображают контуры обрабатываемой детали. В первой проекции деталь должна быть показана в положении, которое оно занимает на станке во время обработки.

**Третий этап.** Составление принципиальной схемы приспособления. На этом этапе, в соответствии со схемой базирования, выбирают установочные или опорные элементы из библиотеки стандартов для проектирования станочных приспособлений. В случае отсутствия стандартных, проектируются специальные элементы приспособления. Спроектированные приспособления могут быть занесены в библиотеку стандартов, и в дальнейшем использоваться для проектирования других приспособлений.

**Четвертый этап.** Подбор стандартных деталей и узлов из библиотеки стандартов для проектирования станочных приспособлений и размещение их на сборочном чертеже станочного приспособления.

**Пятый этап.** Проектирование и размещение на сборочном чертеже дополнительных деталей, которые не вошли в библиотеку стандартов для проектирования станочных приспособлений. Спроектированные нестандартные детали или узлы также могут быть внесены в библиотеку стандартов и использоваться в дальнейшем для проектирования различных станочных приспособлений.

**Шестой этап.** Окончательное получение сборочного чертежа станочного приспособления. На этом этапе студент окончательно формирует сборочный чертеж, наносит размерные линии, технические требования и с помощью T-FLEX CAD получает твердую копию чертежа.

Важно отметить, что использование методики проектирования чертежей при помощи систем проектирования T-FLEX CAD и поддерживаемой ею библиотеки стандартов, имеет первостепенное значение в формировании у студентов инженерного, творческого подхода к решению конструкторских и технологических задач. Однако, для успешного выполнения технического задания курсового проекта, студент должен обладать необходимым уровнем компьютерной подготовки, что подразумевает под собой введение в учебный план дополнительного предмета по изучению компьютерного проектирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пекарчик, С.Е. Создание параметрических чертежей в T-FLEX CAD/ Е.С. Пекарчик // Сборник трудов первой Международной научно-технической конференции «Современные методы проектирования, расчет, конструирование и технология изготовления» г. Минск. 11-13 декабря 2002 г.

2. Киселев, О.М. Автоматизация проектирования ленточных конвейеров с подвесной лентой на основе параметризации / О.М. Киселев // Сборник трудов первой Международной научно-технической конференции «Современные методы проектирования, расчет, конструирование и технология изготовления» г. Минск. 11-13 декабря 2002 г.

3. Горбацевич, А.Ф. Методические указания по выполнению курсовых проектов по курсу «Проектирование станочных приспособлений» для студентов заочной формы обучения специальности 0577 «Машиностроение» / А.Ф. Горбацевич. – Минск, 1985.

УДК 539.25:669.6

Гусакова О.В.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ IN-SITU ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГАХ СПЛАВОВ ОЛОВА**

*МГЭУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Шепелевич В.Г.*

Установлено, что микроструктура фольг двойных сплавов на основе олова формируется в результате распада пересыщенного твердого раствора по механизмам непрерывного и прерывистого распадов. Проведены подробные исследования in-situ на основе которых рассчитаны основные характеристики распада. Полученные ре-

зультаты позволяют наглядно продемонстрировать структурные изменения в процессе распада пресыщенных твердых растворов, что вполне может быть использовано при чтении курсов затрагивающих вопросы фазовых переходов в твердых телах.

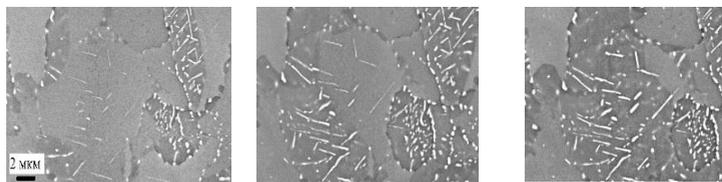
Физическое материаловедение относится к одним из наиболее важных и распространенных курсов физики преподаваемых в технических вузах. Изучение физики твердого тела, структурных превращений и связи структурно фазового состояния со свойствами материала является основой фундаментальной подготовки инженеров разных специальностей. Поэтому при изложении курсов физики твердого тела актуальным является использование новых научных результатов, полученных с помощью современного сложного исследовательского оборудования.

В данной работе изложены результаты исследования сплавов на основе олова с Bi и Cd, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава. Сплавы составов Sn – 8 ат. % Bi, Sn – 4 ат. % Cd, Sn – 8 ат. % Cd в виде фольг толщиной 30–100 мкм получались при выливании расплава на внутреннюю поверхность вращающегося медного диска. Оценки скорости охлаждения расплава и переохлаждения, достигаемого до начала затвердевания, приведены в [1]. Показано, что скорость охлаждения расплава составляет  $10^5$ – $10^6$  К/с, а достигаемое переохлаждение находится в пределах 119–130 К. При таких переохлаждениях скорость движения границы твердое тело-расплав может превышать диффузионную скорость примеси в расплаве, что обеспечивает бездиффузионную кристаллизацию. В результате образуются метастабильные пересыщенные твердые растворы, что подтверждено многими авторами с помощью рентгеноструктурных исследований и измерения параметра решетки [2, 3]. Однако до последнего времени не было ни одной работы, посвященной установлению механизмов распада этих метастабильных фаз.

Поэтому были проведены специальные исследования, в которых проводилось наблюдение *in-situ* за поверхностью быстрозатвердевших фольг сплавов олова сразу после их изготовления, а также гомогенизированных и закаленных на воздух фольг. Микроструктура фольг изучалась с помощью растровой электронной микроскопии (LEO 1455 VP) при этом наблюдения велись в отраженных электронах.

Первоначальные наблюдения, производящиеся через 5–10 минут после приготовления фольги, показали, что на стороне фольги, прилегающей к кристаллизатору, выделения отсутствуют для фольг всех составов, что свидетельствует об образовании пересыщенного твердого раствора на основе олова. Установлено, что распад твердого раствора протекает при образовании пластинчатых выделений на границе зерна и их последующем удлинении одновременно с перемещающейся высокоугловой границей. Такой процесс роста колонии ламелей типичен для прерывистого механизма распада [2]. Одновременно с прерывистым распадом протекает распад по непрерывному механизму, в результате которого появляются узкопластинчатые включения висмута или кадмия, располагающиеся под углами 60 или 90 градусов соответственно. Их форма и упорядоченное расположение вызвано корреляцией их кристаллических решеток с решеткой матрицы. Если высокоугловая граница достигает пластинчатых включений то ее дальнейшее продвижение сопровождается утолщением последних. На рисунке 1 приведены микрофотографии поверхности быстрозатвердевшей фольги Sn – 8 ат. % Bi сделанные через различные промежутки времени после изготовления.

Наличие большого количества таких микрофотографий позволило создать слайд-шоу, позволяющее наглядно продемонстрировать изменение микроструктуры фольг в процессе распада пересыщенного твердого раствора.



10 мин

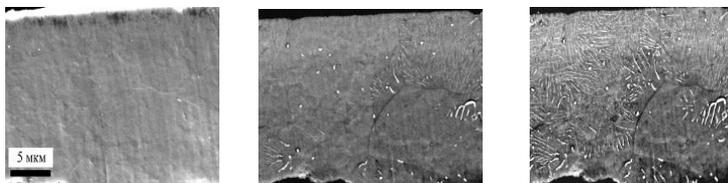
25 мин

50 мин

Рисунок 1 – Микроструктура поверхности быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 8 ат. % Bi при наблюдении через различные промежутки времени после изготовления

Также были проведены исследования быстрозатвердевших фольг после гомогенизации и закалки на воздухе. На рисунке 2 представлены результаты наблюдения за поперечным срезом закаленной фольги. Результаты свидетельствуют о том, что процесс прерывистого распада пересыщенного твердого раствора закаленных на воздухе фольг протекает по механизму, сходному с механизмом распада, наблюдаемым в быстрозатвердевших фольгах. Отличие состоит в том, что при закалке на воздухе протекает исключительно процесс прерывистого распада и начинается он через некоторое время после начала наблюдения.

Проведенные наблюдения *in-situ* за процессом движения границы распада в быстрозатвердевших фольгах и фольгах закаленных на воздухе, позволили непосредственно определить скорость ее перемещения при комнатной температуре. Скорость движения границы прерывистого распада в фольгах, закаленных на воздухе, заметно не отличается от скорости движения границы распада в быстрозатвердевших фольгах для одного и того же состава образцов и для сплава Sn – 8 ат. % Bi имеет значение в пределах  $(1-4) \cdot 10^{-9}$  м/с. Также были определены истинное межламельное расстояние и толщина ламелей которые составляют 0,4 мкм и 10 нм соответственно.



10 мин

60 мин

120 мин

Рисунок 2 – Микроструктура поперечного сечения фольги сплава Sn – 8 ат. % Bi через различные промежутки времени после закалки на воздух

Таким образом, полученные результаты исследований in-situ позволяют наглядно продемонстрировать структурные изменения в процессе распада пересыщенных твердых растворов на основе олова, а также провести оценку основных параметров этого процесса, что вполне может быть использовано при чтении курсов затрагивающих вопросы фазовых переходов в твердых телах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусакова, О.В. Зеренная структура и текстура быстрозатвердевших фольг олова, полученных при различных режимах сверхбыстрого охлаждения / О.В. Гусакова, В.Г. Шепелевич // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – Т. 15. – № 2. – С. 54–57.
2. Лариков, Л.Н. Ячеистый распад пересыщенных твердых растворов / Л.Н. Лариков, О.А. Шматко. – Киев.: Наукова думка, 1976. – 179 с.
3. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. – М.: Рос. научн.-техн. изд. литерат. по черн. и цветн. металлургии, 1962. – 456 с.

**ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА  
ПРИ ТОЧЕНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ НА ПРОЦЕСС  
РЕЗАНИЯ АСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Данильчик С.С.*

Вибрационное точение является эффективным способом стружкодробления в процессе обработки деталей, но снижается качество обработанной поверхности. При вибрационном точении средняя высота микронеровностей остается неизменной и равна высоте гребешков при обычном резании. Однако вследствие изменения подачи инструмента наблюдается значительная нерегулярность профиля обработанной поверхности из-за нестабильности высоты гребешков (рисунок 1). И эта нерегулярность может быть достаточно большой.

В отличие от обычного резания, где осевое расстояние между траекториями движения резца относительно детали на соседних витках  $\Delta$  одинаково и равно подаче на оборот  $S_o$ , при вибрационном точении оно изменяется от нуля до  $\Delta_{\max} \geq 2S_o$ , в результате чего и происходит увеличение высоты гребешков, остающихся после обработки.

Уменьшение расстояния  $\Delta_{\max}$ , а, следовательно, и высоты гребешков возможно при переходе от симметричного вибрационного точения к точению с наложением асимметричных колебаний инструмента. Такое точение характеризуется различными временными промежутками движения резца в течение цикла в направлении подачи и обратном направлении, т.е. коэффициентом асимметрии. Коэффициент асимметрии может быть представлен видом

$$\xi = \frac{a}{b},$$

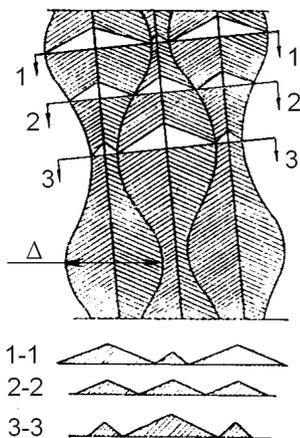


Рисунок 1 – Схема образования гребешков

где  $a$  и  $b$  – части оборота заготовки, соответствующие прямому (в направлении подачи) и обратному (против подачи) ходу инструмента (рисунок 2). Если  $\xi > 1$ , т.е. время на врезание превышает время отвода резца, то такое резание называется мягким или релаксационным (рис. 2, а). При жестком или силовом вибрационном точении происходит ускоренное врезание инструмента в заготовку и медленный выход из нее (рис. 2, б). При симметричном вибрационном точении  $\xi = 1$ .

При жестком или силовом вибрационном точении происходит ускоренное врезание инструмента в заготовку и медленный выход из нее (рис. 2, б). При симметричном вибрационном точении  $\xi = 1$ .

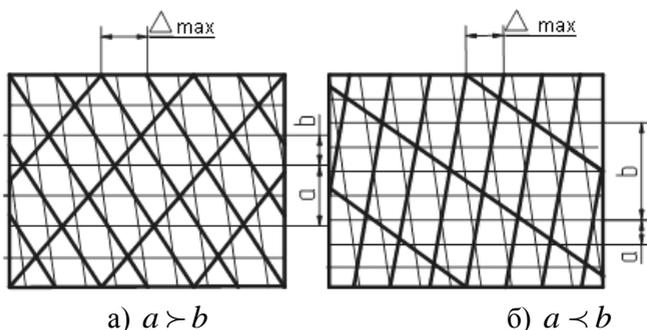


Рисунок 2 – Методы вибрационного точения с асимметричными колебаниями: а) мягкое, б) жесткое

Максимальное расстояние между соседними витками рассчитывается по формулам:

$$\Delta_{\max} = S_o \left( \frac{1}{\xi} + 1 \right) \text{ – для мягкого точения,}$$

$$\Delta_{\max} = S_o (\xi + 1) \text{ – для жесткого точения [1].}$$

Колебательное движение инструмента в используемом устройстве для точения с вибрациями обеспечивается кулачком, входящим в контакт со шпинделем станка. Каждому коэффициенту асимметрии соответствует определенный профиль кулачка. От вращающегося кулачка через гидравлический привод движение передается на резцедержатель. Траектория колебательного движения инструмента внутри цикла колебаний исследовалась с помощью тензометрических датчиков, наклеенных на пружинную балку равного сопротивления. Сигналы с тензодатчиков усиливались и фиксировались прибором «Spider 8» в комплекте с компьютером. Таким образом была произведена запись колебательного движения резца при симметричном вибрационном точении и асимметричном с коэффициентами асимметрии  $1/3$ ,  $1/2$ ,  $2$  и  $3$ . Обработка велась резцом, оснащаемым неперетачиваемыми многогранными пластинами из стали Т15К6. Обработывались заготовки из стали ШХ15. На рисунке 3 представлен график движения инструмента при точении с коэффициентом асимметрии  $\xi = 1/2$ .

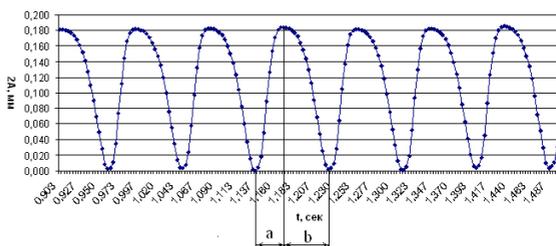


Рисунок 3 – График колебательного движения инструмента

Разбивая полученные графики на участки, соответствующие одному обороту заготовки, и учитывая движение инструмента с заданной подачей на оборот заготовки, разработаны схемы движения инструмента при вибрационном точении на скорости 94 м/мин с подачей 0,15 мм/об и глубиной резания 1,5 мм (рисунок 4).

По полученным схемам определены величины максимального расстояния  $\Delta_{\max}$ , которые занесены в таблицу 1.

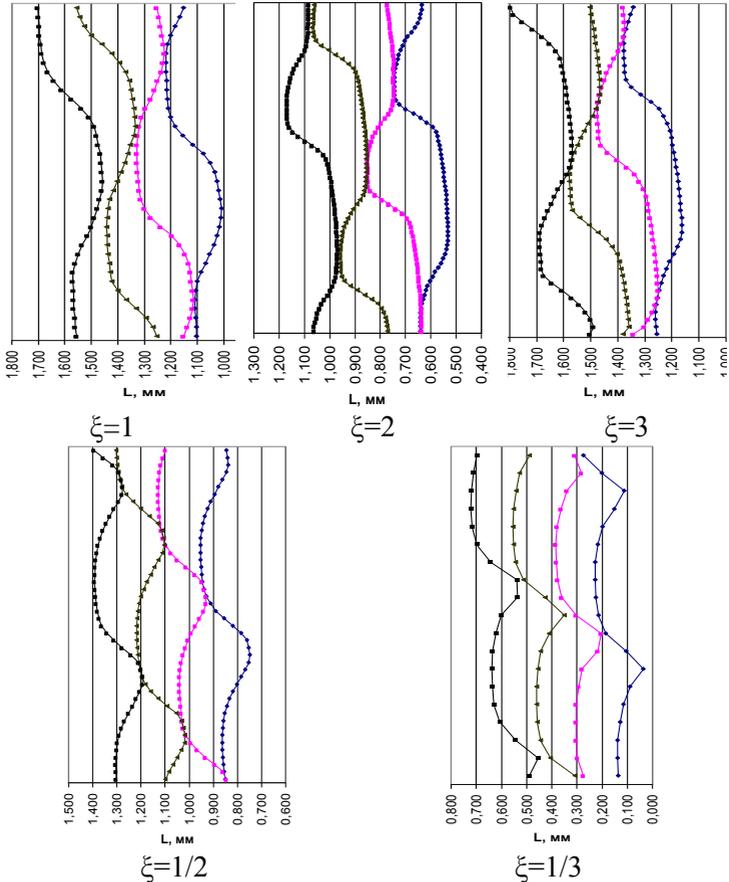


Рисунок 4 – Схемы движения инструмента при вибрационном точении

Результаты эксперимента показывают, что траектория движения инструмента при вибрационном точении (рисунок 4) близка к теоретически построенной модели (рисунок 2). Максимальное расстояние между траекториями движения резца на соседних витках уменьшается с увеличением асимметрии цикла колебания инструмента. От-

клонение экспериментально полученного значения  $\Delta_{\max}$  от расчетного объясняется инерционностью гидравлической системы для вибрационного точения. На схемах это подтверждается наличием участков, на которых происходит движение инструмента с подачей близкой к заданной подаче на оборот. Длина этих участков больше на схемах мягкого вибрационного. Следовательно, можно сделать предположение, что шероховатость обработанных поверхностей будет ниже после жесткого вибрационного точения с коэффициентом асимметрии 1/3.

Таблица 1 – Максимальное расстояние между траекториями движения инструмента на соседних витках  $\Delta_{\max}$ .

Коэффициент асимметрии	Амплитуда, мм	Расстояние $\Delta_{\max}$ , мм	
		расчетное	экспериментальное
3	0,077	0,201	0,267
2	0,079	0,229	0,282
1	0,077	0,303	0,324
1/2	0,079	0,229	0,278
1/3	0,075	0,2	0,235

При проектировании устройств для точения с наложением асимметричных колебаний инструмента следует стремиться к тому, чтобы действительная траектория движения инструмента относительно заготовки была по возможности ближе к теоретической. Это приводит к уменьшению расстояния между соседними витками траектории движения инструмента относительно заготовки и, следовательно, к уменьшению шероховатости обработанных поверхностей.

УДК 621.762

Евтухов К.С.

## АНАЛИЗ ЗАДАЧ ИДЕАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ВДАВЛИВАНИЯ

БНТУ, г. Минск

Научный руководитель: Петюшик Е.Е.

*Проведен анализ условий течения материала при вдавливании плоского пуансона в полупространство. Выделены некоторые*

*условия самоорганизации процесса, обеспечивающие повышение точности расчета.*

Задача анализа процесса вдавливания давно находится в центре внимания специалистов, поскольку она является основой многих технологических процессов и используется в методах определения механических свойств деформируемых материалов и изделий. Первыми исследователями задачи проникновения штампа в среду были Г. Генки, Л. Прандтль, В.В. Соколовский, А.Ю. Ишлинский. В частности, последний впервые рассмотрел осесимметричную задачу пластичности под пробу Бринелля. Здесь искривления свободной поверхности не допускались и не учитывались. Не учитывались они и последующими исследователями [1]. Профиль лунки обрабатывался при подготовке образца. В основу положена гипотеза предельного состояния Хаара – Кармана. Классическое решение дало результат  $\sigma_s/HB=0,352$  (1944), затем другие повторили результаты: Р. Шилд –  $\sigma_s/HB=0,359$  (1955), Н.Г. Бураго (1984) – такой же, как у автора [1]. В настоящей работе также принималось соотношение  $\sigma_{кпл} \approx HB \approx 3 \cdot \sigma_{Би}$ , аналогичное указанным. Общее мнение всех исследователей сводилось к рекомендации решить задачу упруго – пластичности, при этом необходимо совместное рассмотрение поля напряжений и соответствующего поля деформаций.

Рекомендации первых исследователей о трудностях решения задач теории пластичности теперь могут быть разрешимы на основе метода вынужденной самоорганизации деформационного движения [2, 3], который позволяет расширить возможности идеальной теории до необходимого уровня, фактически перейдя к понятию многопараметрической теории, раскрывающей в полной мере те недостатки теории, которые следуют из понятия идеальности, материализованной через однопараметрическое решение.

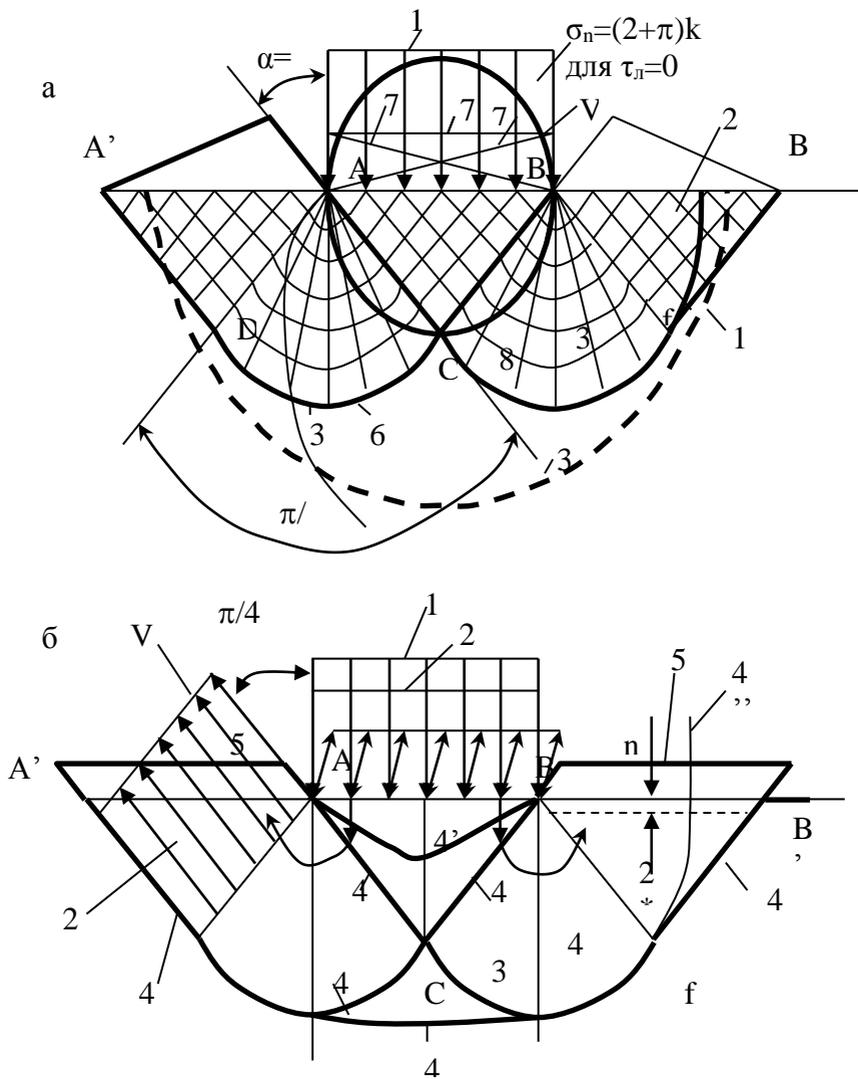


Рисунок 1 – Вид полей линий скольжения  
 В плоских задачах решение значительно упрощается.  
 Критерий  $\sigma_s/HB=0,389$  остается в силе.

На рисунках 1, а и б, представлены классические схемы вдавливания плоского пуансона в полупространство для нулевого ( $\tau_k=0$ ) и предельного трения ( $\tau_k=k$ ). Здесь необходимо отметить несколько обстоятельств. Как и в других подобных случаях, сопоставляются поля линий скольжения для  $\tau_k=0$  и «предельного» (предельного – в рамках математической теории пластичности) трения ( $\tau_k=k$ ). В первом случае эпюра контактных нормальных напряжений  $\sigma_n$  постоянна,  $\sigma_n=(2+\pi)k$ . Ортогональность двух семейств линий скольжения, образуемых от особых точек А и В, позволяет выделить треугольную зону АВС, прилегающую к контактной поверхности, две, также треугольные, области АА'Д и ВВ'Е, прилегающие к свободной поверхности (задача Коши), и области разворота поля линий скольжения (ЛС), представленные веерами АСД и ВСЕ (задача Гурса). Угол поворота ЛС в этих ситуациях  $\varphi=\pi/2$  согласно равновесию системы и дает значение  $\sigma_n=(2+\pi)k$ .

При  $\tau_k=k$  (рисунок 1, б) нормальная нагрузка на контакт  $\sigma_n=(2+\pi)k$  оказывается в области перегрузки и при дополнительной касательной поверхностной нагрузке в соответствии с законом пластического трения задача становится комбинированной, состоящей из двух задач. Нагрузка приложена в двух плоскостях. В силу этого несущая способность локального контакта падает и нормальное напряжение оказывается равным  $\sigma_n=\pi k$  при дополнительной нагрузке  $\tau_k=k$ , направленной вдоль поверхности касания. Такова вынужденная самоорганизация влияния закона сухого трения твердых тел на основе теории вынужденной самоорганизации деформационного движения (ТВСДД). В этом случае можно глубже проанализировать начальную стадию затронутого явления. Дело в том, что при расчетах деталей машин мы пользуемся расчетами в предположении, что имеем дело с упругими

свойствами тел. Но на самом деле шероховатые контактные поверхности деформируются в пластическом состоянии. Поэтому в трибонике имеет место понятие «предварительное смещение», которое в начале движения протекает со своими особенностями. Теория самоорганизации объясняет существование этого явления разными углами рассогласования направлений сдвига в условиях упругого и пластического деформирования. Первое условие обеспечивает влияние этого параметра вдвое по сравнению со вторым при прочих равных условиях.

Некоторая разница возникает и в кинематике движения: при  $\tau_k=0$  весь смещаемый материал в зоне ABC, деформируясь неодинаково вдоль ЛС обоих семейств, обеспечивает неравномерное смещение свободной поверхности (прямые 4) под углом  $\alpha=\pi/4$ .

При  $\tau_k=k$  наличие трения как бы только констатируется (в плоскости чертежа его нельзя приложить). Особенности результата движения в этом случае приводят к тому, что блоки, прилегающие к свободной поверхности, смещаются в объеме без деформации (эпюра скоростей этого движения  $V=const$  показана на линии скольжения AD), перемещение свободной поверхности демонстрируется прямыми 5, что подтверждает жесткость этих переходных областей. Разница в формоизменении свободной поверхности вызывается тем, что жесткое смещение зон AA'D и BB'F разбивает зону, прилегающую к контактной поверхности ABC, на два, в начале параллельных потока, что приводит и ее в жесткое состояние при тех же нормальных и сдвигающих напряжениях. В этом месте мы сталкиваемся с неадекватностью в формулировке условия задачи (в ней отсутствуют указания об отдельном приложении силы трения – здесь она не возникает сама по себе) и невозможностью нахождения четкого решения на физической основе. Условия в этой части задачи не корректны. Направление трения в схеме может возникнуть только нормально АВ, что соответствует локальному контакту в модели трения, но нормальное напряжение при этом

снижается до  $\sigma_n = \pi k$  [1]. Опять возникают условия самоорганизации, которые снимут неопределенность, вызванную тем, что при формулировании задачи мы не определили направление действий контактных напряжений трения, а его в рассматриваемой задаче просто нет (оно не возникает, так как плоский пуансон вдавливается по нормали к поверхности жестко – пластического тела, которое условно называется идеально пластическим, поскольку его упругое состояние остается вне обсуждения, а сопротивление деформированию служит константой деформирования).

Таким образом, оказывается, что поперечное трение в симметричном процессе вдавливания (плоская задача) не может возникнуть. Поэтому возникает тяготение к схеме  $\tau_k = 0$ , которая обеспечивает деформированное состояние в переходных областях и оказывается ближе к физике. Однако в этом случае возникает и другое кинематическое несоответствие, которое сводится к тому, что в решении  $\tau_k = k$ , в котором выдавливаемый материал истекает в виде двух жестких потоков при постоянной скорости движения переходных областей, примыкающих к свободной поверхности, образующих широкий резкий выступ, в экспериментах представляется более короткими криволинейными областями, форма которых зависит от вида обрабатываемого материала и скорости вдавливания.

Для выяснения этих недоразумений следует предположить, что построенные на рисунке 1, а, б поля линий скольжения не полностью отвечают еще не высказанному дополнительному условию формирования очага вдавливания. Дело в том, что в процессе вдавливания параллельно процессу раздвигания материала в стороны из-под пуансона имеет место образование поля истечения в сторону свободной поверхности, действующего при сжатии и изгибе. Процесс вдавливания оказался более сложным, он оказался комбинированным; схема процесса оказалась по сути другой, чем это предполагалось сначала.

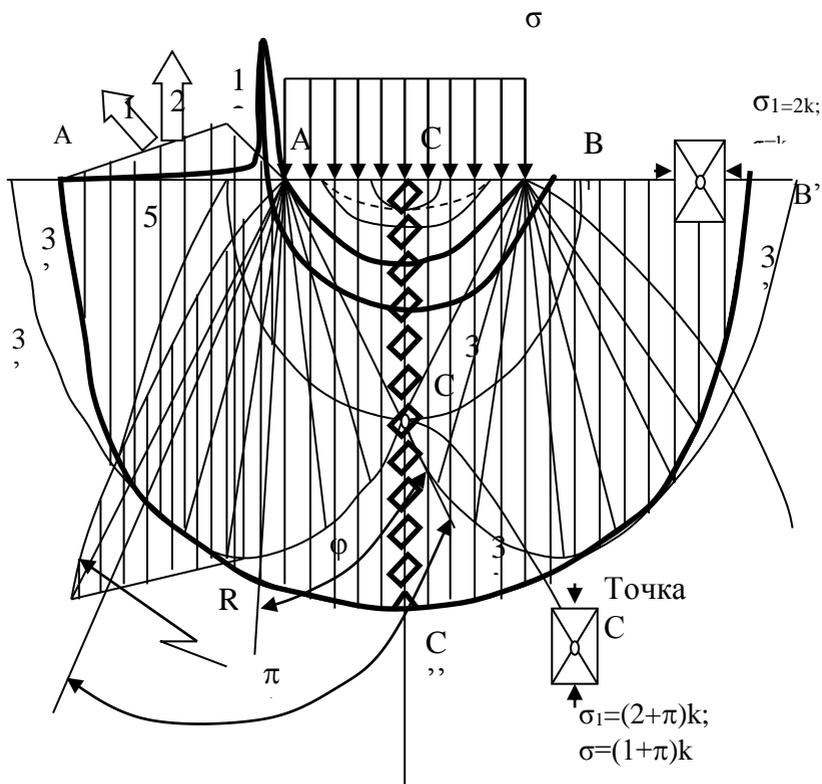


Рисунок 2 – Скорректированное поле линий скольжения при вдавлении

Схема образования поля линий скольжения при вдавлении, учитывающая вклад потокообразования, приведена на рисунке 2. Главным обстоятельством является выявление линии главного тока (стрезень). На рисунке это эллипс  $A_3CB_3$ , большие полуоси которого определяются выходом максимумов развития выплеска через свободную поверхность. Полуокружность  $ACB$  остается траекторией максимальных сдвигающих напряжений не во всех случаях. Переходные области непосредственно под контактной поверхно-

стью сокращаются с одной стороны за счет вдавливания в упруго – пластической области (границы 4, 4' и 4'' в зависимости от достигнутого обжатия), а с другой стороны за счет более равномерной деформации (кривая 3). Кстати, характер кривой 3' соответствует границе области реального деформирования, продемонстрированной в работе Р. Хилла [4]. Такой вывод о наличии потокообразования, снимающего состояние жесткости с переходных областей, примыкающих к свободным поверхностям, подкрепляется тенденцией сокращения объема переходной области непосредственно под контактной поверхностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ишлинский, А.Ю. Прикладные задачи: в 2 т. / А.Ю. Ишлинский. – М., 1986. – Т. 1. – С. 17–42.

2. Макушок, Е.М. Совершенствование теорий деформирования с позиций синергетики и механики вынужденной самоорганизации деформационного движения / Е.М. Макушок, Е.Е. Петюшик // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: V междунар. научно-техн. конф. (Минск, 15-17 сентября 2010): сб. материалов: в 3 кн. – Кн. 3: Технологические процессы обработки материалов давлением. Безопасность и надежность магистральных трубопроводов и сосудов высокого давления. Пленарные доклады / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2010. – С. 45–49.

3. Макушок, Е.М. Обоснование основополагающих идей обобщенной теории вынужденной самоорганизации деформационного движения / Е.М. Макушок, Е.Е. Петюшик // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы IX междунар. научно-техн. конф. – Минск: НИИ ПМ НАН РБ, 29-30 сентября 2010. – С. 292–294.

4. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М., 1956.

**УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ИНСТРУМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО  
И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЕЙ**

*БГАТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Акулович Л.М.*

*Предложено усовершенствовать процесс магнитно-абразивной обработки путем введением ультразвуковых колебаний в рабочий зазор. Представлена схема процесса магнитно-абразивной обработки с наложением ультразвуковых колебаний. Показано, что совместное наложение ультразвукового и магнитного полей положительно влияет на физико-механические свойства обрабатываемой заготовки.*

Известно, что в процессе магнитной обработки (МО) металл, подвергшийся воздействию переменного магнитного поля, изменяет эксплуатационные свойства поверхностного слоя. Улучшение свойств ферромагнитных деталей, при импульсной магнитной обработке объясняется направленной ориентацией свободных электронов вещества во внешнем магнитном поле, вследствие чего увеличивается тепло – и электропроводимость металла. Эта ориентация происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность металла. При МО вследствие неоднородной кристаллической структуры поверхности в ней возникают вихревые токи. Вихревые токи обуславливают магнитное поле и локальные микровихри, которые в свою очередь, нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла. В местах концентрации остаточных напряжений или усталостных напряжений теплота, наведенная вихревыми токами, уменьшает избыточную энергию составляющих кристаллитов и зерен структуры материала, особенно в зоне контакта напряженных участков [1]. Также происходит полярная ориентация спинов электронов атомов, расположенных в области контакта кристаллитов и зерен металла, вследствие чего изменяются его механические свойства.

Указанные явления проявляются при магнитно-абразивной обработке (МАО) (рисунок 1).

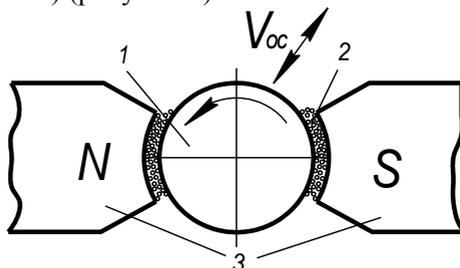


Рисунок 1 – Схема магнитно-абразивной обработки:  
1 – обрабатываемая деталь; 2 – ферромагнитный порошок; 3 – полюсный наконечник

Устройство содержит обрабатываемую деталь 1, которая помещается между полюсными наконечниками 3 с зазорами, в которые подаётся порошок 2, обладающий магнитными и абразивными свойствами [1]. Детали сообщается вращательное движение и осциллирующее движение вдоль горизонтальной оси.

Силами магнитного поля зерна порошка удерживаются в рабочих зазорах, прижимаются к поверхности детали, и образом производится её обработка. В рабочую зону подаётся смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). В данном случае функции силового источника и упругой связки выполняет энергия магнитного поля. Степень упругости связки регулируется изменением напряжённости магнитного поля, что позволяет рассматривать МАО как процесс шлифования свободно-ориентированным абразивом.

Перспективным представляется направление обработки и упрочнения с наложением комбинированных физических полей, в частности МАО с применением ультразвуковых колебаний (УЗК).

На рисунке 2 показана схема магнитно-абразивной обработки с наложением ультразвуковых колебаний.

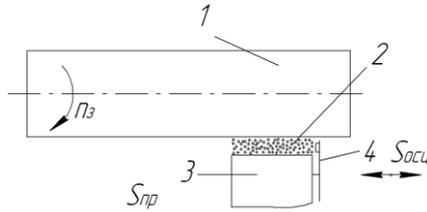


Рисунок 2 – Схема магнитно-абразивной обработки с наложением ультразвуковых колебаний:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – ферроабразивный порошок; 3 – полюсный наконечник; 4 – пружинная пластина

Схема отличается от приведенной на рисунке 1 тем, что механическим приводом детали сообщается вращательное движение, а осциллирующее движение вдоль горизонтальной оси сообщается абразивному порошку посредством введения в рабочий зазор ультразвуковых колебаний, передаваемых магнитострикционным преобразователем через пружинную пластину 4.

Микрорезание с ультразвуком позволяет за счёт изменения направления, амплитуды и частоты колебаний целенаправленно влиять на глубину царапины. Это, в свою очередь, определяет форму царапины в поперечном сечении [3].

При подаче СОЖ при МАО под действием ультразвукового поля в жидкости происходит образование кавитационных

пузырьков, которые механически воздействуют на загрязнённую поверхность детали. Это воздействие обусловлено двумя основными причинами: ударной волной, возникающей при захлопывании кавитационных пузырьков, и интенсивными колебаниями не захлопывающихся пузырьков, проникших между плёнкой загрязнения и основной поверхностью детали.

Под влиянием кавитации и связанного с неё действия местных высоких температур и давлений, расклинивающих и ультразвуковой капиллярные эффекты играют зна-

чительную роль в формировании свойств обрабатываемых деталей. Действия кавитации расклинивающего и ультразвукового капиллярных эффектов приводит не только к заполнению щелевой микрокапиллярной пористой системы твёрдого тела поверхностно-активными веществами СОЖ, но и к разрушению.

Введение УЗК в рабочий зазор при МАО позволит избавиться от осциллирующего движения детали (полюсного наконечника), упростить конструкцию установки и даст возможность расширить область применения метода МАО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 172 с.
2. Киселев, М.Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М.Г. Киселев. – Минск: Тесей, 2001. – 344 с.
3. Шиляев, А.С. Ультразвук в науке, технике и технологии / А.С. Шиляев. – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. – 412 с.

УДК 621.793

Заблоцкая О.С.

## **МУЛЬТИСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА СТЕКЛЕ**

*БНТУ, г. Минск,*

*Научный руководитель: Комаровская В.М.*

Вакуумно-плазменные мультислойные покрытия обладают комплексом свойств, недостижимых для монослойных и многослойных покрытий [1]. В частности, для них характерны более высокие микротвердость и плотность материала покрытия. При этом обеспечивается высокая адгезия покрытия к основе и минимальное сопротивление сдвиговым нагрузкам. Такие покрытия характеризуются

высокой устойчивостью к процессам хрупкого разрушения, носящим стохастический характер и минимальной глубиной разрушения при схватывании контактирующих поверхностей в процессе трения. Все это способствует улучшению эксплуатационных и качественных характеристик поверхностного слоя изделий с покрытиями [2].

При формировании TiN вакуумно-плазменных покрытий происходит непрерывная бомбардировка основы двухфазным потоком (ионы титана и молекулы азота) в результате чего происходит разогрев поверхности изделий, что может привести к расплавлению поверхностного слоя и создать условия для роста кристаллов из расплава, а это приводит к образованию столбчатой структуры, повышению шероховатости и снижению твердости покрытия [3]. Повышение температуры основы при конденсации многокомпонентного покрытия приводит к возникновению неконтролируемых процессов диффузии компонентов, происходит изменение стехиометрического состава получаемых пленок. Поэтому проблема отвода тепла с обрабатываемой поверхности весьма актуальна при формировании вакуумно-плазменных покрытий, а ее решение во многом определяет стабильность и производительность технологических процессов. Хорошие результаты по снижению тепловых нагрузок при формировании покрытий на металлические материалы дает импульсный режим, который обеспечивает охлаждение поверхности за время паузы (причем время паузы минимально, так как у данных материалов высокая теплопроводность). При формировании покрытий на диэлектрических материалах импульсный режим нанесения покрытия обеспечивает дискретное формирование нескольких монослоев покрытия за время импульса и их охлаждение за время паузы. В результате формируется квазиаморфная структура мультислойного покрытия (рисунок 1) [3].

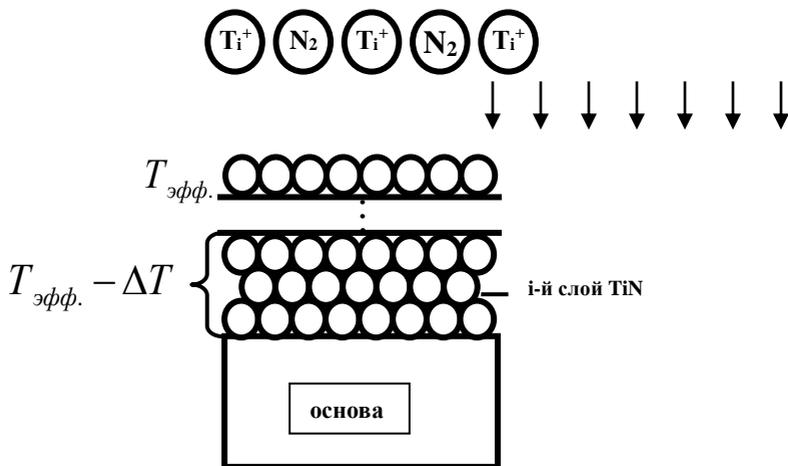


Рисунок 1 – Схема формирования мультислойного TiN покрытия

В процессе конденсации на поверхности происходит образование монослоя из ионов титана. Затем происходит нейтрализация положительно заряженного слоя ионов Ti, сформировавшегося на поверхности диэлектрической основы. После чего происходит адсорбция молекул азота, которые вступают в химическую реакцию с титаном, образуя нитрид титана. Время образования одного монослоя покрытия определяется из режимов технологического процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иващенко, С.А. Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными физико-механическими свойствами / С.А. Иващенко, И.С. Фролов, Ж.А. Мрочек – Минск: Технопринт, 2001. – 236 с.
2. Комаровская, В.М. Технологии подготовки поверхности и нанесения электродуговых TiN покрытий на изделия из стекла в импульсном режиме: автореф. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.02.07 / В.М. Комаровская. – Минск: БНТУ, 2010. – 26 с.

3. Иващенко, С.А. Теоретические и технологические основы формирования многофункциональных газотермических и вакуумно-плазменных покрытий: дис. д-ра техн. наук: 16.04.2002 / С.А. Иващенко. – Минск, 2002. – 357 с.

УДК 621.793

Зинкович Д.И.

## МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: преподаватель Койда С.Г.*

*В настоящее время относительный объем производства и потребления сплавов на основе магния и алюминия среди других конструкционных металлических материалов непрерывно возрастает вследствие их высокой удельной прочности. Однако широкое применение изделий и конструкций из этих металлических материалов требует нанесения на их поверхность защитных покрытий.*

Одним из наиболее перспективных методов нанесения покрытий на изделия и конструкции из алюминиевых и магниевых сплавов является метод микродугового оксидирования (МДО)[1].

Микродуговое оксидирование – сложный процесс получения покрытий на поверхности материала – рабочего электрода, находящегося в электролите, в режиме микродуговых разрядов, перемещающихся по поверхности рабочего электрода. Данный процесс имеет существенные преимущества перед широко применяемым в промышленности методом анодирования сплавов.

Преимущества:

- не требуется, как правило, тщательной предварительной подготовки металлической поверхности: травления, обезжиривания, осветления, промывок горячей и холодной водой; т.е. исключается ряд технологических операций, а, следовательно, существенно сокращается производственная площадь, уве-

личивается производительность процесса и экологическая чистота получения конечной продукции, что приводит к увеличению рентабельности производства;

- возможность получения покрытий, характеризующихся более высокой твердостью, износостойкостью, защитно-коррозионными свойствами, адгезией к металлической основе;
- проведение процесса из электролитов, с существенно меньшей концентрацией химических компонентов в них, что увеличивает экологическую чистоту получения и снижает себестоимость конечной продукции.

Однако метод МДО алюминиевых и магниевых сплавов имеет ряд существенных недостатков:

- относительно, с учетом высокой энергоемкости процесса, низкая его производительность;
- длительный эмпирический поиск оптимального состава электролита для каждого алюминиевого или магниевого сплава.

Метод микродугового оксидирования (МДО) стал известен относительно недавно (в 70-х годах прошлого столетия), внешне (по характеру оборудования, технологии, принципам управления) он напоминает гальванику. Однако это только внешнее сходство. Механизм процессов МДО другой и значительно сложнее.

Микродуговое (или микроплазменное) оксидирование поверхностей изделий из металлов вентильной группы (алюминиевых, титановых и прочих сплавов) позволяет сформировать на них прочное оксидное покрытие с твердостью близкой к корунду, хорошей адгезией, низкой пористостью и высокими антикоррозионными свойствами. Это особенно актуально для деталей ограниченной массы, таких как поршни двигателей внутреннего сгорания, лопатки турбин, различные уплотнительные узлы и так далее. Так же для деталей, работающих в тяжелых условиях воздействия высоких температур, агрессивных сред и высоких механических нагрузок [2].

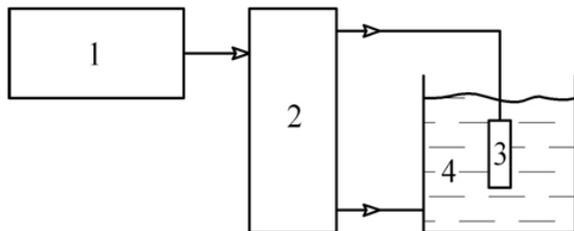


Рисунок 1 – Технологическая схема МДО:  
 1 – блок управления; 2 – источник технологического тока;

3 – обрабатываемая деталь; 4 – электролит

Перед началом оксидирования обрабатываемая деталь погружается в ванну с электролитом. В свою очередь ванна снабжена системой охлаждения, так как в процессе оксидирования электролит нагревается. По одному выводу источника технологического тока на деталь подаётся рабочее напряжение. Второй вывод соединён с корпусом ванны, изготовленной (чаще всего) из нержавеющей стали. С пульта управления необходимо задать параметры и режим обработки, так же на нём осуществляется контроль за ходом процесса. Пульт управления и источник технологического тока могут быть выполнены в виде единого блока [3].

В зависимости от выбранного режима и установленных параметров рабочего напряжения, тока, размера детали процесс формирования покрытия может продолжаться от нескольких минут до нескольких часов.

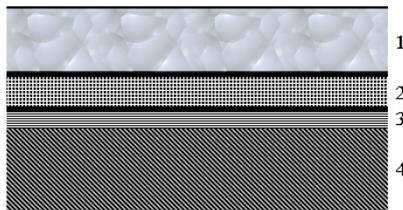


Рисунок 2 – Структура покрытия

Верхний слой (1) – рыхлый, пористый, если используется щелочной электролит с добавлениями жидкого стек-

ла, то по химическому составу это муллит ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ). Следующий слой (2) – плотный, с высокой микротвёрдостью, это окисел  $Al_2O_3$ . Именно этот слой является рабочим и определяет высокие физико-химические характеристики покрытия. Толщина его колеблется в зависимости от режима оксидирования в пределах от 30 до 200 микрон. И наконец, между материалом подложки (4) и слоем окисла (2) располагается тонкий (от 0,01 до 0,1 микрона) переходный слой (3), свойства которого для практики несущественны.

Верхний рыхлый слой покрытия удаляется пескоструйной обработкой, и в эксплуатацию поступает деталь с плотным оксидным покрытием.



Рисунок 3 – Детали из алюминиевого сплава Д16 с микродуговым покрытием

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Библиотека диссертаций [Электронный ресурс] / Электронная библиотека диссертаций. – Режим доступа: <http://www.dslib.net/tech-elekrtoxim/hla.html>. – Дата доступа: 20.02.2010.
2. О методе [Электронный ресурс] / MicroArtoxydation. – Режим доступа: <http://mdo-msk.ru/am.htm>. – Дата доступа: 20.02.2010.
3. Микродуговое оксидирование [Электронный ресурс] / База данных инновационных технологий и науко-

ёмкой продукции. – Режим доступа:  
<http://www.icsti.su/base/base2/tec/0119.shtml>. – Дата доступа:  
20.02.2010.

УДК 621.1

Зуенок А.В., Пастушенко Е.А.

## **ГРАФИТ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Дробыш А.А.*

В качестве сырья для получения композиционных пористых материалов на основе углерода используется графит.

Графиты – вещества серого цвета с металлическим блеском, аморфного, кристаллического, или волокнистого сложения, жирные на ощупь, удельный вес от 1,9 до 2,6. По внешнему виду графит, имеет металлический свинцово-серый цвет, колеблющейся от серебристого до черного, с характерным жирным блеском. Поэтому потребители зачастую называют явнокристаллические графиты серебристыми, а скрытокристаллические – черными. На ощупь графит жирен и отлично пачкается. На поверхностях он легко дает черту от серебристого до черной, блестящей. Графит отличается способностью прилипать к твердым поверхностям, что позволяет создавать тонкие пленки при натирании им поверхностей твердых тел.

Графит представляет собой алоторопную форму углерода, которая характеризуется определенной кристаллической структурой, имеющей своеобразное строение.

В зависимости от структурного строения графиты делятся на:

- явнокристаллические,
- скрытокристаллические,
- графитоиды,

- высокодисперсные графитовые материалы, обычно называемые углями.

Важнейшие свойства графита.

Электрические свойства:

Электропроводность графита в 2,5 раза больше электропроводности ртути. При температуре 0 град. удельное сопротивление электрическому току находится в пределах от 0,390 до 0,602 ом. Низкий предел удельного сопротивления для всех видов графита одинаков и равен 0,0075 ом.

Термические свойства:

Графит обладает большой теплопроводностью, которая равняется 3,55вт·град/см и занимает место между палладием и платиной.

Коэффициент теплопроводности 0,041 (в 5 раз больше, чем у кирпича). У тонких графитовых нитей теплопроводность выше, чем у медных.

Температура плавления графита — 3845-3890°C при давлении от 1, до 0,9 атм.

Точка кипения доходит до 4200°C.

Температура воспламенения в струе кислорода составляет для явнокристаллических графитов 700-730°C. Количество тепла, получаемого при сжигании графита, находится в пределах от 7832 до 7856 ккал.

Магнитные свойства:

Графит считается диамагнитным.

Растворимость графита:

Химически инертен и не растворяется ни в каких растворителях, кроме расплавленных металлов, особенно тех, у которых высокая точка плавления. При растворении образуются карбиды, наиболее важными свойствами которых являются карбиды вольфрама, титана, железа, кальция и бора.

При обычных температурах графит соединяется с другими веществами весьма трудно, но при высоких температурах он дает химические соединения со многими элементами.

Упругость графита:

Графит не обладает эластичностью но, тем не менее, он может быть подвергнут резанию и изгибанию. Графитовая проволока легко сгибается и закручивается в спираль, а при вальцевании дает удлинение около 10%. Сопротивление на разрыв такой проволоки равно  $2 \text{ кг/мм}^2$ , а модуль изгиба равен  $836 \text{ кг/мм}^2$ .

Оптические свойства:

Коэффициент светопоглощения графита постоянен для всего спектра и не зависит от температуры лучеиспускания тела; для тонких графитовых нитей он равен 0,77, с увеличением кристаллов графита светопоглощение уже находится в пределах 0,52-0,55.

Жирность и пластичность графита являются важнейшими свойствами, которые дают возможность широко применять его в промышленности. Чем выше жирность графита, тем меньше коэффициент трения. От жирности графита зависит использование его в качестве смазочного материала, а также способность прилипания к твердым поверхностям.

Схема изготовления композиционных пористых материалов на основе порошка графита выглядит согласно рисунка 1.



Рисунок 1 – Схема получения композиционного материала на основе порошка графита

Уникальное сочетание эксплуатационных свойств графита, таких как широкий диапазон рабочих температур, высокая химическая стойкость, прекрасная уплотняющая способность, способствуют устойчивому потреблению его АО многих отраслях промышленности.

УДК 621.793

Зуенок Д.В.

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ СТЕКЛО

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Комаровская В.М.*

Стекло – уникальный светопрозрачный строительный и конструкционный материал, границы и возможности использования которого постоянно расширяются в соответствии с новыми требованиями рынка стекла по цветовой гамме, светотеплозащитным и прочностным характеристикам, габаритам остекления.

Эксплуатационная надежность стеклоизделий непосредственно связана со структурой, состоянием, свойствами объема и поверхности стекла [1]. В стекле наиболее слабые места и наиболее опасные дефекты, как правило, расположены на поверхности. Поэтому изменяя свойства поверхностного слоя, удастся резко увеличить срок службы деталей [2, 3]. Известные способы модификации поверхности изделий из стекла (пластификация поверхностного слоя, создание сжимающих напряжений) являются трудоемкими и не приемлемы для изделий сложной конфигурации [4]. В настоящее время наиболее эффективным путем решения данной проблемы является нанесение на рабочие поверхности изделий из стекла покрытий.

Технология вакуумно-плазменного нанесения покрытий позволяет производить широчайший спектр продукции архитектурного стекла (энергосберегающее (теплозащитное) стекло, солнцезащитно-декоративное стекло, стекла селективного пропускания и отражающие различные части спектра, зеркальное стекло, декоративные стек-

ла богатой цветовой гаммы). Рост спроса на данные виды стекла обусловлен рядом факторов и, прежде всего, требованиями архитекторов и дизайнеров по архитектурной выразительности зданий, безопасности их эксплуатации, а также ужесточением требований по теплозащите и механической прочности светопрозрачных ограждений.

В строительстве использование покрытий на стекле приносит как экономическую выгоду от применения покрытия для экономии энергоресурсов, так и эстетическую пользу для решения архитектурных задач. К преимуществу использования тонкопленочных покрытий так же относится возможность создания стекол с заданными свойствами на основе обычных составов строительных стекол. Нанесение покрытий позволяет регулировать в широких пределах свойства листового стекла независимо от его химического состава и толщины.

Для уменьшения потерь тепла от теплопроводности и конвекции применяют двойное остекление (стеклопакеты), но это дает лишь незначительный эффект, т.к. основные теплотери происходят за счет теплового излучения. Для борьбы с этим явлением разработаны так называемые энергосберегающие стекла [5].

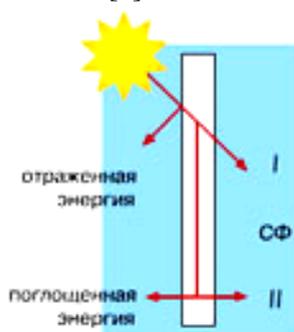


Рисунок 1 – Схема взаимодействия солнечного излучения со стеклом

Первым шагом в выпуске энергосберегающего стекла явилось производство К-стекла. Для придания флоат-

стеклу теплосберегающих свойств непосредственно при изготовлении на его поверхности методом химической реакции при высокой температуре (метод пиролиза) создается тонкий слой из окислов металлов  $\text{InSnO}_2$ , который является прозрачным и в то же время обладает электропроводностью. Следующим значительным шагом в производстве энергосберегающих стекол стал выпуск т.н. i-стекла, которое по своим теплосберегающим свойствам в 1,5 раза превосходит К-стекло. Различие между К-стеклом и i-стеклом заключается в коэффициенте излучательной способности, а также технологии его получения. I-стекло производится вакуумным напылением и представляет собой 3-х слойную (или более) структуру из чередующихся слоев серебра и диэлектрика ( $\text{BiO}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{TiO}_2$  и т.п.). Технология нанесения требует использования вакуумного оборудования с системой магнетронного распыления [5].

Использование энергосберегающего стекла для остекления зданий в южных районах, позволяет не только создать более комфортные условия для проживания, но и снизить энергозатраты на кондиционирование помещений. Используемое в стеклопакетах теплоотражающее стекло позволяет экономить около 15% тепловой энергии, расходуемой на обогрев зданий. Следует отметить, что теплосберегающие свойства стеклопакетов, в которых используются данного вида стекла, во многом определяются параметрами покрытий на стекле.

Теплозащитное стекло широко известно на мировом рынке. Оно производится более 30 лет ведущими стекольными фирмами мира, такими как «Pilkington» (Великобритания), «Hlaverbel» (Бельгия), «PPG» (США), «Guardian» (США), «Saint Gobain» (Франция) и др.

Сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана [6] установлено, что использование теплоотражающих покрытий позволяет возвращать в помещение в 5..9 раз больше теплового излучения, чем обычное стекло (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема стеклопакета с теплоотражающим покрытием

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляян, Ю.А. Эксплуатационная надежность стекла и стеклоизделий / Ю.А. Гуляян // Стекло и керамика. – 2008. – № 6. – С. 3–12.
2. Витязь, П.А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 170 с.
3. Sadarshan, T.S. Tools for engineered surfaces / T.S. Sadarshan // Surface Engineering. – 1998. – V14, № 6. – P. 449–450.
4. Пух, В.П. Влияние покрытия из аморфного гидрогенизированного углерода на прочность и трещиностойкость стекла в высокопрочном состоянии / В.П. Пух [и др.] // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43, вып. 3. – С. 466–470.
5. Энергосберегающие стекла [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://www.stroy.md/rus/article>. – Дата доступа: 12.05.2007.
6. Заявка на конкурс инновационных проектов [Электронный ресурс]. – 2002. – Режим доступа: <http://mgtu-sistema.ru/projects>. – Дата доступа: 26.01.2007.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ  
ЗАЩИТЫ ОТ ФРИКЦИОННОГО, АБРАЗИВНОГО,  
ЭРОЗИОННОГО, ВИБРАЦИОННОГО  
И КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА МАШИН,  
МЕХАНИЗМОВ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Комяк И.М.*

Эффективность защиты от износа с помощью специально созданного граничного смазочного слоя столь велика, что можно говорить о практической реализации понятия безызносности, введенного в обиход Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским в связи с открытием в 1956 г. эффекта избирательного переноса.

Усилия мировых производителей смазочных материалов обеспечить условия противозносной защиты, опираясь на традиционную гидродинамическую модель, привели к росту стоимости масел и смазок до значений, недоступных массовому покупателю. Ситуация осложняется тем, что условия эксплуатации техники в развитых и развивающихся странах принципиально различны. Например, в развитых странах поддерживается достаточно высокий уровень качества дорожных покрытий, поэтому автомобили не испытывают ударов и резких сотрясений во время движения. Практикуется аккуратное техническое обслуживание и замена автомобилей по мере морального износа, вследствие чего износ двигателей и трансмиссии, в основном, не превышает половины ресурса.

В Республике Беларусь, России и других странах качество дорожного покрытия несколько хуже, а износ механических узлов превышает 50% ресурса. Известно, что, в процессе износа любых механических узлов, величина вибропараметров (виброперемещения, виброскорости и виброускорения) – возрастает в 30-100 раз. Поэтому, с

первых метров пробега по не качественным дорогам, двигатели, трансмиссия и другие узлы автомобилей испытывают удары из-за неровностей на дорогах, а подавляющее большинство техники подвергается усиленному вибрационному воздействию. Все это вызывает пробой гидродинамического разделительного слоя смазки и заставляет узлы трения работать в режиме граничной смазки.

Пакеты антифрикционных, противоизносных и противозадирных присадок, применяемые в зарубежных маслах и закупаемые отечественными производителями смазочных материалов, не рассчитаны на столь жесткие режимы эксплуатации.

В то же время, принципиальные возможности обеспечения безызносности, продемонстрированные исследователями избирательного переноса, уникальных свойств серпентинитов, трибополимеров, эпиламов, фторорганических, хлорорганических материалов и других средств защиты поверхностей трения, создают реальную основу для завоевания Россией конкурентных позиций на рынке смазочных материалов развивающихся стран. Эффективность предлагаемого подхода наглядно подтверждается результатами испытаний антифрикционной ресурсовосстанавливающей композиции (АРВК), разработанной специалистами Института машиноведения РАН и ООО «Венчур-Н» [1].

АРВК является суспензией, состоящей из базовой жидкости, серпентинита (силиката магния) в виде взвеси и трибополимеробразующей (ТПО) присадки. В АРВК, взаимно усиливающим образом, объединены уникальные антифрикционные и противоизносные свойства ТПО присадок и восстановительный эффект серпентинитов. Добавление 20 мл АРВК в литр любого, самого дешевого масла, повышает износостойкость до значения, в 2 раза превышающего показателя лучших импортных масел, что приводит к увеличению в 2-3 раза срока службы до капитального ремонта любого меха-

нического оборудования: двигателей внутреннего сгорания, трансмиссии, компрессоров, редукторов, приводов, гидравлических систем, всех видов подшипников. При этом, непосредственно в процессе эксплуатации, происходит восстановление формы и размеров взаимодействующих деталей.

В результате, восстанавливается и выравнивается по цилиндрам компрессия в двигателях внутреннего сгорания и в компрессорах, соответственно, восстанавливается крутящий момент двигателей и производительность компрессоров, уменьшается на 4–6% потребление топлива и количество вредных выбросов, уменьшается на 10% потребление электроэнергии; уменьшается вибрация и температура саморазогрева подшипников, редукторов и других узлов.

АРВК для топлива восстанавливает изношенные механические узлы на всем пути топлива: в топливной аппаратуре, направляющие всасывающих клапанов, компрессионные кольца. Уменьшает скорость износа этих узлов. Композиция устраняет детонацию, улучшает условия сгорания топлива, снижает шумность двигателя, повышает приемистость, предотвращает отрицательные последствия применения некачественного топлива. Полное восстановление двигателя достигается при одновременном применении АРВК для масла и топлива.

При обкатке новых двигателей внутреннего сгорания или двигателей после капитального ремонта наблюдается восстановительно-корректирующее действие АРВК: размеры деталей во всех механических узлах приводятся к номиналу. В результате, рядовой отечественный двигатель приобретает характеристики европейских образцов.

На электрическом транспорте технология АРВО позволяет перевести в безыносный режим эксплуатации с обслуживанием по вибродиагностическим показаниям подшипники электродвигателей, редукторы, компрессоры, подшипники колесных пар.

В компрессорах всех видов восстанавливаются кривошипно-шатунный механизм, цилиндропоршневая группа, лубрикаторы, подшипники, насосы высокого и низкого давления, минимизируется попадание масла в пневмосистему.

Восстанавливаются все виды тяговых редукторов. В результате обработки гребней колесных пар, ресурс бандажей колесных пар электровозов и электропоездов до обточки увеличивается в 1,5–2,4 раза, в зависимости от исходной толщины бандажей (60–90 мм), снижается интенсивность бокового износа рельсов. Возможно нанесение твердосмазочных покрытий, содержащих АРВК, на гребни колес и боковые поверхности рельсов.

Проведена обработка металлорежущих станков, путем добавления АРВК в масляную систему. На токарных станках достигнуто уменьшение в 3 раза биения обрабатываемой детали, снижена вибрация шпиндельной группы подшипников. Восстанавливается точность ходового винта. Уменьшается износ направляющих. Возможно восстановление направляющих и, в дальнейшем, снижение скорости износа путем нанесения твердосмазочных покрытий, содержащих АРВК. Добавление АРВК к охлаждающей жидкости в 2–20 раз повышает стойкость резцов. Влияние АРВК на стойкость режущего инструмента проверялось в наиболее жестких режимах, характерных для операции сверления.

В результате было определено, введение АРВК в масло И-20 при сверлении стали 45 увеличило стойкость сверла в 3–4 раза, крутящие моменты и силы резания уменьшились на 8–10%; шероховатость поверхности снизилась на 20–23 мкм, при сверлении стали 1Х18Н9Т с эмульсией и сульфолем стойкость сверла возросла в 2–2,7 раза.

Таким образом, можем сделать вывод, что в результате применения твердосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов гарантировано удвоение и утроение продолжительности работы до капитального ремонта всех видов механического оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов, Ю.Н. Антифрикционная противоизносная суспензия / Ю.Н. Дроздов [и др.] // Патент на изобретение. – № 2237704 от 10.10. 2004 г.
2. Дроздов, Ю.Н. Новая противоизносная и антифрикционная ресурсовосстанавливающая композиция присадок к смазочным материалам / Ю.Н. Дроздов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 5. – С. 50-53.

УДК 669.24:541.138.2:546.98

Какарека А.С.

### **ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АЛЮМИНИЯ С ПОКРЫТИЯМИ Ni-P И Ni-W-P В СРЕДЕ ХЛОРИДА НАТРИЯ**

*БГУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Врублевская О.Н.*

*Путем проведения вольтамперометрических испытаний показана возможность использования химически осажденных сплавов Ni-P и Ni-W-P в качестве покрытий, замедляющих коррозию алюминия в солевой среде. Показано, что эффективность защиты алюминия покрытиями Ni-W-P выше, чем пленками Ni-P.*

Для защиты алюминиевых изделий от коррозии используют анодирование, фосфатирование, осаждение из растворов металлических покрытий, покрытие красками или лаками [2]. Одним из наиболее простых и эффективных способов защиты от коррозии является безэлектролизное осаждение пленок металлов.

Сплав Ni-W-P получали из раствора, разработанного авторами статьи, состава (моль·л<sup>-1</sup>): NiSO<sub>4</sub> – 0,15, Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> – 0,15, Na<sub>3</sub>Cit – 0,15, глицин – 0,45, NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub> – 0,25 при

$60 \pm 2^\circ\text{C}$ . Сплав Ni-P осаждали с использованием глицинцитратного электролита аналогичного состава в отсутствие вольфрамата натрия при  $85 \pm 5^\circ\text{C}$ . В качестве подложек использовали алюминий марки АМГ2.

Коррозионную устойчивость подложек оценивали в 10% растворе хлорида натрия методом вольтамперометрии: потенциостатический режим, потенциостат ПИ – 50-1.1, трехэлектродная ячейка со вспомогательным платиновым электродом и хлорсеребряным электродом сравнения, скорость развертки потенциала – 50 мВ/с. В качестве рабочего электрода использовали алюминий и алюминий с осажденными покрытиями Ni-P и Ni-W-P с различной толщиной покрытий, площадь рабочего электрода составляла  $1 \text{ см}^2$ .

На рисунке 1 приведены вольтамперные кривые, характеризующие анодное окисление в растворе NaCl алюминиевых электродов с покрытиями

Ni-P, Ni-W-P и в их отсутствие, а также кривая, характеризующая растворение гальванически осажденного покрытия из никеля толщиной 50 мкм [4]. В таблице 2 сопоставлены потенциалы начала растворения образцов и плотность анодного тока при потенциале 800 мВ, при котором растворение достаточно заметно. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что растворение алюминия протекает с высокой скоростью при потенциалах положительнее 320 мВ. Растворение гальванического покрытия из никеля, толщиной 50 мкм начинается при потенциале 60 мВ. Защитные пленки Ni-P и Ni-W-P при толщине 0,5..1,8 мкм сильно сдвигают начало окисления алюминия в область положительных потенциалов + (320–650) мВ в зависимости от состава и толщины пленок. Токи коррозии алюминиевого рабочего электрода с осажденными пленками Ni-P и Ni-W-P в присутствии этих пленок сильно уменьшаются. В сравнении с этими пленками электрохимически осажденные покрытия из никеля толщиной 50 мкм ведут себя в растворе NaCl более активно, поскольку потенциал начала окисления и ток

коррозии никеля занимают промежуточное положение между этими характеристиками для исследуемых пленок и алюминия.

Наибольший положительный сдвиг потенциала и минимальный ток коррозии характерен для образцов с покрытиями Ni-W-P толщиной ~1 мкм. Отметим, что по данным вольтамперометрического исследования пленки Ni-P выполняют функцию защиты от коррозии, вызывая смещение потенциала начала анодного растворения и уменьшение анодного тока, хотя и в значительно меньшей мере, чем пленки Ni-W-P той же толщины. Так, ток анодного окисления алюминиевых подложек, защищенных пленками Ni-W-P, вдвое ниже, чем подложек с пленками Ni-P.

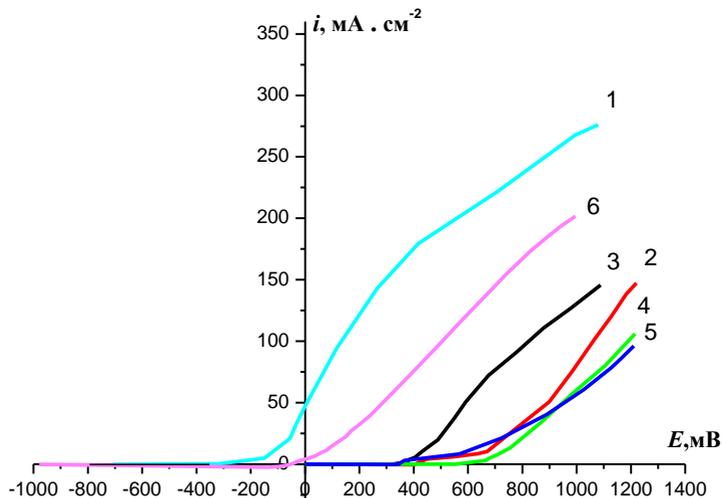


Рисунок 1 – Анодные ветви вольтамперных кривых, характеризующих растворение алюминиевой подложки: 1 – без покрытия; 2 – с покрытием Ni-P толщиной 1,0 мкм; 3, 4 и 5 – с покрытием Ni-W-P толщиной 0,5 мкм, 1,0 мкм и 1,8 мкм. Кривая 6 характеризует поведение рабочего электрода с покрытием из электрохимически осажденного никеля толщиной 50 мкм [4]

Таблица 1 – Потенциалы начала растворения и плотность анодного тока растворения алюминия и алюминия с покрытиями Ni–P, Ni–W–P и Ni

Образец	Al	Алюминиевая подложка с покрытием				
		Ni–P	Ni–W–P	Ni–W–P	Ni–W–P	Ni [4]
Толщина покрытия, мкм	–	1,0	0,5	1,0	1,8	50
Потенциал начала окисления, мВ	320	400	320	650	330	-60
Плотность тока анодного растворения при потенциале 800 мВ, мА·см <sup>-2</sup>	230	30	90	15	25	190

Таким образом, в результате проведения эксперимента показана возможность использования для защиты алюминия от коррозии в растворах хлорида натрия тонких пленок Ni–P и Ni–W–P, полученных методом химического осаждения из гипофосфитных ацетатных (Ni–P) и цитратно-глициновых (Ni–W–P) растворов. Установлено, что наличие защитных пленок Ni–W–P обеспечивает сдвиг потенциала начала анодного растворения алюминия в положительную область почти на 1000 мВ и уменьшение тока анодного растворения более чем на порядок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Vargel, C. Corrosion of aluminium / C. Vargel // Elsevier, 2004. – P. 700.
2. Мальцева, Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии / Г.Н. Мальцева. – Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 211 с.
3. Djokić, S.S. Electroless Deposition of Metals and Alloys / S.S. Djokić // Modern Aspects of Electrochemistry. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002. – Vol. 35. – P. 51-133.
4. Воробьева, Т.Н. Сходство и различия в коррозионном поведении электролитических и металлургических сплавов никель-олово, медь-олово / Т.Н. Воробьева, Б.В. Кузнецов, Г.С. Телеш // Химические проблемы создания

новых материалов и технологий. – Минск, БГУ, 2008. – С. 104–116.

УДК 678.674+677.027.625.16

Кандыба Ю.М., Журавлева М.В.

**ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ,  
ОБЛАДАЮЩИЙ ИОНООБМЕННЫМИ  
СВОЙСТВАМИ**

*БГТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Крутько Э.Т.*

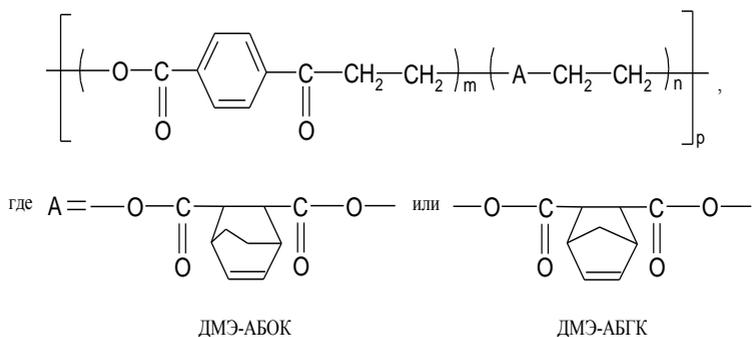
Статья посвящена изучению возможности получения полиэтилентерефталата с ионообменными свойствами путём озонирования модифицированного полиэтилентерефталата с разложением полимерных озонидов. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по двухстадийному синтезу полиэтилентерефталата, модифицированного диметилowymi эфирами бицикло-(2,2,1)-гепт-5-ен-2,3-дикарбоновой и бицикло-(2,2,2)-окт-5-ен-2,3-дикарбоновой кислот. Определены температурные характеристики, вязкость 0,5%-ных растворов сополимеров полиэтилентерефталата в смеси растворителей (фенол:тетрахлорэтан 1:1), а также содержание СООН-групп в полиэфире и сополиэфирах. Придание высокомолекулярным соединениям ионообменных свойств достигается путем введения карбоксильных групп в основную цепь полимера. Полимеры, содержащие карбоксильные группы, относятся к классу «иономеров», наличие ионной связи в которых приводит к появлению новых и значительному изменению технически важных свойств полимерных материалов (ионообменные свойства, изменение прочности, теплостойкости, газо- и паропроницаемости, адгезионные характеристики и др.) [1].

Получение карбоксилсодержащих полимеров поликонденсационного типа, в частности, полиэфиров, путём сополиконденсации мономеров весьма затруднительно, поскольку карбоксильные группы мономера, являясь реакционноспо-

собными, участвуют в процессе образования макромолекулярных цепей. В этой связи для получения карбоксилсодержащих полиэфигов наиболее приемлемы методы полимераналогичных превращений.

Одним из способов химической модификации полиэтилентерефталата – сложного полиэфира, крупнотоннажно производимого на ОАО «Могилёвхимволокно» (Республика Беларусь), является получение сополиэфиров, содержащих 1-10 мол.% звеньев бицикло-/2,2,2/-окт-5-еновой или бицикло-/2,2,1/-гепт-5-еновой структуры (рисунок 1). Такие сополимеры возможно получить путем совместной поликонденсации диметилового эфира терефталевой кислоты (ДМТ), этиленгликоля (ЭГ) и 1-10 мол.% (от ДМТ) диметилового эфира бицикло-/2,2,1/-гепт-5-ен-2,3-дикарбоновой (ДМЭ-БЦГК) или бицикло-/2,2,2/-окт-5-ен-2,3-дикарбоновой (ДМЭ-БЦОК) кислот. Синтез немодифицированного полиэтилентерефталата осуществляется в 2 стадии.

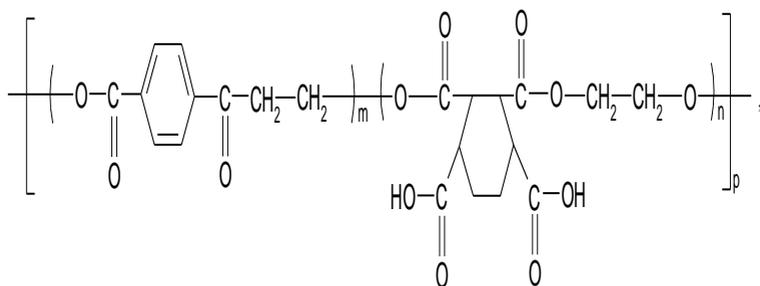
Рисунок 1



На первой стадии проводят реакцию переэтерификации диметиловых эфиров терефталевой кислоты (ДМТ) и диметиловых эфиров бициклических дикарбоновых кислот (ДМЭ-БЦОК и ДМЭ-БЦГК) этиленгликолем (ЭГ) с образованием диэтиленгликоль-производных дикарбоновых кислот (ДЭГП) и выделением низкомолекулярного соединения – метанола. Процесс протекает в присутствии ката-

литических количеств ацетата марганца. Вторая стадия синтеза полимера, протекающая в расплаве, катализируется оксидом сурьмы. При введении вышеуказанных модифицирующих компонентов в структуру основной цепи сложного полиэфира в его макромолекулах появляются алициклические группировки с непредельными (олефиновыми связями), способными взаимодействовать с окислителями. В результате протекания окислительных процессов в структуре высокомолекулярного соединения появляются новые карбоксильные группы (дополнительно к конечным) (рисунки 2 и 3).

Рисунок 2



Известно, что среди окислителей наиболее высокоселективным по отношению к олефиновым связям при получении кислот является озон.

В этой связи нами для изучения возможности проведения реакций полимераналогичных превращений на полиэтилентерефталате, модифицированном диметилowymi эфирами бицикло-/2,2,1/-гепт-5-ен-2,3-дикарбоновой (ДМЭ-БЦГК) и бицикло-/2,2,2/-окт-5-ен-2,3-дикарбоновой (ДМЭ-БЦОК) кислотами, содержащими в своей бициклической структуре двойную непредельную связь, был использован озон.

Способ придания ионообменных свойств модифицированному полиэтилентерефталату состоял в том, что сополиэфир на основе полиэтилентерефталата, содержащий

1–10 мол. % звеньев бицикло-/2,2,2/-окт-5-еновой или бицикло-/2,2,1-гепт-5-еновой структуры в виде 3–5 % растворов в дихлоруксусной кислоте или в смеси тетрахлорэтана и трихлоруксусной кислоты (1:1) об. ч. подвергали озонированию при 0–10°C. Последующим разложением полимерных озонидов в присутствии молекулярного кислорода при скорости его подачи ~150 мл/мин, пероксида водорода или надуксусной кислоты при 60–80°C выделяли целевые продукты. После переосаждения полученных соединений определяли их температуры плавления, вязкости и содержание карбоксильных групп. Результаты данных экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

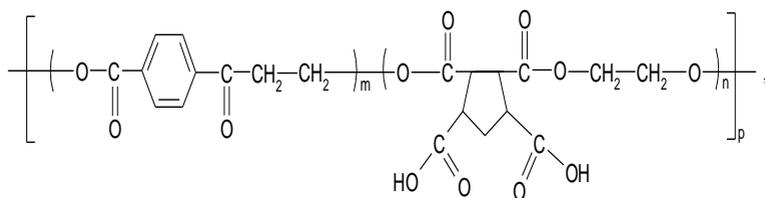


Рисунок 3

Принимая во внимание, что полиэтилентерефталат не имеет реакционноспособных карбоксильных групп в основной цепи (за исключением концевых), создание макромолекул этого сложного полиэфира, содержащих ионогенные группы, открывает широкие возможности для дальнейшей химической модификации и комптабилизации крупнотоннажно производимого в Республике Беларусь ПЭТФ.

В таблице 2 приведены физико-химические свойства и статическая обменная ёмкость полиэтилентерефталата, обладающего ионообменными свойствами.

Таблица 1 – Химический состав сополиэфиров и условия разложения озонидов

№ опыта	Модификатор ПЭТФ		Характеристика исходного образца модифицированного ПЭТФ для озонирования			Условия разложения озонида			
	Наименование	Содержание, % мол.	Температура плавления, °С	Удельная вязкость 0,5%-ного раствора полимера в смеси (фенол. тетрагидроэтан 1:1)	Содержание СООН-групп, г-экв.10 <sup>6</sup> /г	Реагент	Скорость подачи кислорода, мл/мин	Температура, °С	Продолжительность, ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ДМЭ-БЦОК	8	251-252	0,24	3,05	Молекулярный кислород	150	80	17
2	ДМЭ-БЦОК	8	251-252	0,24	3,05	10 мл 4%-ного раствора H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> в ледяной уксусной кислоте	-	60	20
3	ДМЭ-БЦОК	10	248-249	0,23	4,7	Молекулярный кислород	150	80	17
4	ДМЭ-БЦОК	10	248-249	0,23	4,7	10 мл 4%-ного раствора H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> в ледяной уксусной кислоте	-	60	20
5	ДМЭ-БЦГК	3	252-253	0,20	3,4	Молекулярный кислород	150	80	17

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	ДМЭ-БЦГК	3	252-253	0,20	3,4	10 мл 4%-ного раствора H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> в ледяной уксусной кислоте	-	60	20
7	ДМЭ-БЦГК	5	250-251	0,19	5,3	Молекулярный кислород	150	80	17
8	ДМЭ-БЦГК	5	250-251	0,19	5,3	10 мл 4%-ного раствора H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> в ледяной уксусной кислоте	-	60	17
9	ДМЭ-БЦОК	1	256-257	0,33	3,07	Молекулярный кислород	150	80	15
10	ДМЭ-БЦОК	5	251-252	0,23	5,12	Молекулярный кислород	150	80	17
11	ДМЭ-БЦГК	1	255-256	0,26	3,75	Молекулярный кислород	150	80	17
12	ДМЭ-БЦГК	10	246-247	0,17	4,81	Молекулярный кислород	150	80	20

*Примечание.* Озониды получены при пропускании через 50 мл 3–5 % растворов сополиэфиров в дихлоруксусной кислоте озон-кислородной смеси с начальной концентрацией озона  $1,4 \cdot 10^{-3}$  моль/л со скоростью 100 мл/мин при температуре 10°C.

Разработка модифицированного полиэтилентерефталата с ионообменными свойствами способствует решению проблемы создания новых материалов со специальными свойствами на основе полимеров, производство которых освоено в промышленном масштабе страны. Использование такого полиэфира в качестве комптабилизатора ПЭТФ при производстве кордных волокон и тканей, использующихся при изготовлении резинотехнических изделий, в том числе и шин различного назначения, позволит повысить адгезионную связь полиэфирного корда с резиной за счёт дополнительного содержания адгезионноактивных карбоксильных групп в полимере, улучшив в итоге их эксплуатационные характеристики.

Таблица 2 – Физико-химические показатели и статическая обменная ёмкость ПЭТФ, обладающего ионообменными свойствами

Образец полимера	Температура плавления	Удельная вязкость 0,5%-ного раствора в смеси фенол:тетрахлорэтан 1:1 об. ч. при 0°С	Содержание СООН-групп, г·экв·10 <sup>6</sup> /г	СОЕ, мг·экв/г
1	250-251	0,21	280	0,27
2	251-252	0,21	260	0,25
3	247-248	0,20	474	0,48
4	246-247	0,21	382	0,37
5	248-249	0,19	176	0,16
6	248-249	0,18	189	0,18
7	248-249	0,18	221	0,22
8	248-249	0,19	219	0,21
9	255-256	0,30	58	0,06
10	249-250	0,21	230	0,23
11	253-254	0,23	61	0,06
12	243-244	0,17	415	0,40
13	258-259	0,25	1,5	0,002
14	251-252	0,24	3,0	0,004

*Примечание.* Номера образцов соответствуют номерам образцов в таблице 1. Контрольные образцы полиэтилентерефталата (13) и исходного сополиэфира (14), взятого для получения образцов модифицированного полиэтилентерефталата с ионообменными свойствами (1 и 2).

УДК 691.793

Кирикович М.К.

## ТЕХНОЛОГИЯ ДЕТОНАЦИОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ. ОПИСАНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Койда С.Г.*

В настоящее время широко применяются следующие методы нанесения покрытий распылением: металлизация, газопламенное и плазменное напыление. Однако их свойства в

некоторых случаях не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Так, из-за сравнительно низкой прочности сцепления таких покрытий с основой ограничено их использование в машинах и механизмах, работающих при ударных нагрузках, а достигающая 10% пористость делает невозможной их эксплуатацию в агрессивных средах.

В связи с этим значительный интерес представляет детонационный метод нанесения покрытий. Сущность метода детонационного напыления (ДН) весьма проста: в водоохлаждаемую трубу (ствол) заполненную газовой взрывчатой смесью помещаются напыляемые частицы порошка после чего в газе возбуждается детонация. Взаимодействуя с продуктами детонации, частицы нагреваются и ускоряются в направлении напыляемой поверхности детали, при столкновении с которой они образуют плотное и хорошо сцепленное с ней покрытие. Далее следует релаксация давления, продукты детонации почти полностью выходят из ствола, который продувается не реагирующим газом, вновь наполняется газовой взрывчатой смесью, (причем свежая взрывчатая смесь отделена от оставшихся в стволе продуктов детонации упомянутым не реагирующим газом – для предотвращения спонтанного инициирования), происходит вбрасывание порции порошка, инициирование детонации и так далее. При каждом выстреле напыляется 1..7 мкм толщины покрытия на площади, приблизительно равной диаметру ствола (20..30 мм). Выход детонационной волны в атмосферу сопровождается интенсивной звуковой волной амплитудой 140 ДБ на расстоянии 3 метров от среза ствола. Очевидно, что природа ДН – взаимодействие с газообразными продуктами экзотермической химической реакции – близка к газопламенному напылению. Однако, в отличие от него отсутствует сильный нагрев детали, что связано с импульсным характером процесса ДН [4].

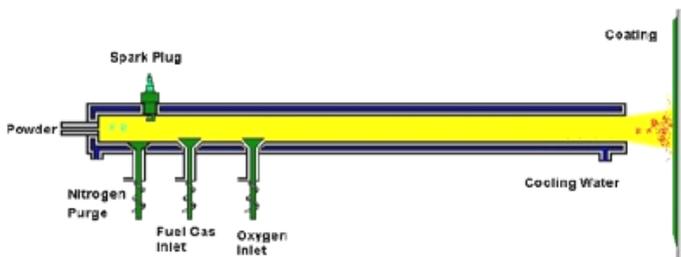


Рисунок 1 – Схема установки детонационного напыления

К преимуществам этого метода [1, 2] относят высокую прочность сцепления ( $10\text{--}16 \text{ кг/мм}^2$ ), высокую плотность (пористость менее 1%), возможность нанесения широкого класса материалов на подложки без изменения свойств материала основы. Кроме того, из всех существующих только данный метод позволяет наносить металлокерамические твердые сплавы на основе карбидов вольфрама, хрома, титана. При этом свойства покрытий практически не отличаются от свойств аналогичных твердых сплавов, полученных методами спекания. Также к существенному преимуществу детонационного метода относится лишь незначительный нагрев напыляемого изделия по сравнению с другими методами (обычно  $< 250^\circ\text{C}$ ). Высокие эксплуатационные свойства покрытий, получаемых методом детонационного напыления, позволяют радикально (в 5–10, а в некоторых случаях в 20–30 раз) повышать ресурс, износ- и коррозионную стойкость узлов и деталей.

Однако у данного метода есть и недостатки к которым можно отнести:

- трудность нанесения покрытий на очень твердую поверхность;
- трудность использования порошков с невысокой плотностью частиц;
- высокий уровень шума (до 130 дБ);
- повышенная стоимость оборудования.

ДП дает возможность получить прочность сцепления покрытия с материалом основы, приближающейся к прочности основного металла. Детонационный метод позволяет использовать для нанесения покрытий разнообразные материалы: металлы и сплавы, тугоплавкие соединения, окислы, композиционные материалы. Эти материалы применяются исключительно в виде порошков с размером частиц 2–150 мкм.

Следует отметить, что после ДНП, так же как и при всех остальных методах высокотемпературного нанесения покрытий, при остывании в системе «покрытие – основа» возникают внутренние напряжения, часть которых снимается за счет разрыва некоторых из этих связей и частично ослабления прочности сцепления.

При необходимости предварительной очистки или активации поверхности детали, а также для повышения прочности сцепления покрытия с подложкой производится детонационно-абразивная обработка (ДАО) поверхности под покрытие с использованием того же оборудования, что и для нанесения покрытия. Для этого в ствол подается вместо порошка наносимого материала порошок абразива. Эффективность ДАО выше традиционной дробеструйной обработки.

Знание и умение распределять наносимый материал по пятну совместно с правильно подобранной скоростью перемещения обрабатываемой поверхности позволяют равномерно покрывать большие поверхности сложной конфигурации с минимальным припуском на последующую обработку. Технология ДНП позволяет достигать шероховатости детонационных покрытий 1,6–0,8 мкм, что дает возможность не обрабатывать ее в случае, если покрытие наносится с целью защиты от механического износа, эрозии или коррозии.

Сопрягаемые поверхности деталей, в зависимости от применяемого материала, должны пройти обработку (шлифование или сверхтонкую доводку) до получения

высокой степени чистоты, которая требуется для прецизионных деталей [5].

Высокие эксплуатационные свойства детонационных покрытий обусловили широкое их применение. В настоящее время детонационные твердосплавные покрытия успешно применяются для упрочнения алмазных (рисунок 2, а) буровых долот.

Высокие прочностные и адгезионные свойства покрытий позволяют использовать детонационные покрытия для восстановления штампового инструмента, например, вырубных штампов для сепараторов подшипников качения (рисунок 2, б).

В автомобильной промышленности применение детонационных покрытий находит, в частности для восстановления и упрочнения изношенных шеек коленчатых валов (рисунок 2, в).

В машиностроении детонационные покрытия широко применяются для восстановления изношенных шпинделей (рисунок 2, г).

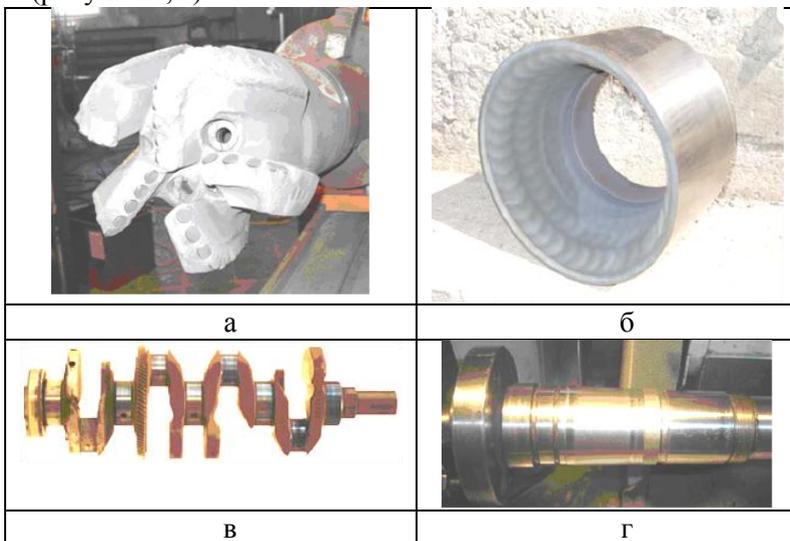


Рисунок 2 – Область применения детонационных покрытий

Отмеченные приложения далеко не исчерпывают область возможного использования детонационных покрытий. Круг обрабатываемых деталей непрерывно расширяется, а методики и оборудование для детонационного напыления непрерывно совершенствуются, открывая новые перспективы и сферы применения данной технологии [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев, А.И. Детонационное напыление покрытий / А.И. Зверев, С.Ю. Шаривкер, Е.А. Астахов. – Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
2. Бартнев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартнев, Ю.В. Федько, А.И. Григоров. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 215 с.
3. Борисов, Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю.С. Борисов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
4. Детонационное напыление [Электронный ресурс] / Моспромтехно. – Режим доступа: [http://mospromtehnoparod.ru/history/detonatsionnoe\\_napilenie.html](http://mospromtehnoparod.ru/history/detonatsionnoe_napilenie.html). – Дата доступа: 19.02.2010.
5. Детонационные покрытия [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.sustainable-cities-net.org.ua/newtechshow.php?id=71>
6. Детонационные покрытия [Электронный ресурс] /Режим доступа: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/fizvestia/2010/2010\\_1\\_569\\_575.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/fizvestia/2010/2010_1_569_575.pdf)

УДК 621.793

Леонтьев А.А.

## АЛМАЗОПОДОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Койда С.Г.*

Алмазоподобные (DLC) покрытия представляют собой тонкие аморфные пленки на основе углерода. Микроструктура материала включает полимерную сетку (sp<sup>2</sup> фракция) и

тетраэдрическую структурную сетку ( $sp^3$  алмазоподобная фракция). Наличие алмазоподобной фракции определяет высокую микротвердость DLC покрытий. Такие аморфные покрытия – состоят из атомов углерода как с алмазными, так и с графитоподобными связями. Высокое содержание атомов углерода с алмазными связями в присутствии графитоподобных связей, приводит к уникальным характеристикам алмазоподобных покрытий [1, 2].

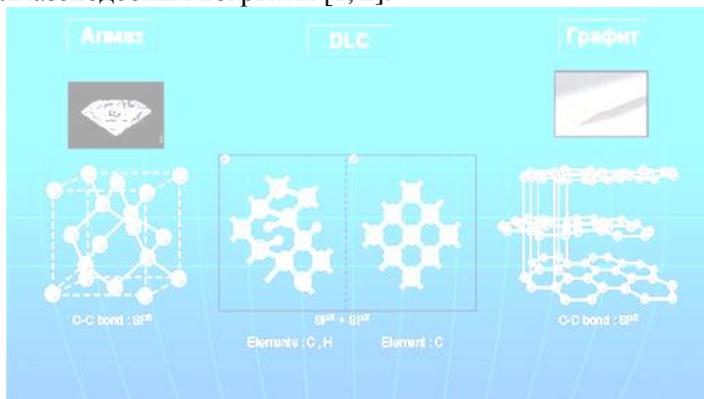


Рисунок 1 – Структурная сетка алмазоподобного покрытия

Таблица 1 – Физико-механические свойства углеродных покрытий

Физико-механические свойства	DLC(ta-C) «Специальные технологии»	Алмаз
Структура	аморфный углерод	алмаз
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3.4 - 3.6	3.6
Микротвердость, HV, ГПа	5000- 10000	7000 - 10000
Коэффициент сухого трения	0.15-0.08	0.2-0.05

DLC покрытия являются перспективным способом обработки поверхности для увеличения поверхностной твердости и износостойкости деталей машиностроения, а также снижения коэффициента трения. При применении DLC покрытий

можно ожидать улучшения износостойкости и эксплуатационных свойств подшипников качения и скольжения, элементов шестеренных передач, элементах компрессоров, топливной и газовой аппаратуры и т.д. Высокая твердость алмазоподобных покрытий в сочетании с оптической прозрачностью может быть использована для упрочнения поверхностей стеклянных или пластиковых элементов. DLC пленки являются перспективным покрытием, препятствующим появлению царапин.

Данные свойства пленок прекрасно зарекомендовали себя во многих отраслях нашей промышленности, в частности металлообрабатывающей для режущих инструментов с АПП покрытиями на метчиках, фрезах, сверлах (наибольший эффект достигается при обработке медных, алюминиевых, титановых сплавов, стеклопластиков, благодаря низкому коэффициенту трения, режущий инструмент не увязает в металле), гелиотиновых ножах, на пресс-формах и штампах,



Рисунок 2 – Режущий инструмент с алмазоподобным покрытием

Также алмазоподобные покрытия наносятся на ответственные детали машин и механизмов, работающих в условиях высокого трения и износа, подвижных, вращающихся деталей и узлов, подшипников, направляющих, захватывающих деталей конвейеров, гидравлических цилиндров, поршней, подвижных, вращающихся деталей и узлов, подшипников. Срок службы изделий при этом возрастает от 5 до 20 раз [3].



Рисунок 3 – Детали двигателя внутреннего сгорания с алмазоподобным покрытием

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rusnanonet [Электронный ресурс] / Российская национальная нанотехнологическая сеть. – Режим доступа: <http://www.rusnanonet.ru/goods/42215/>. – Дата доступа: 20.02.2010.
2. Упрочняющие покрытия [Электронный ресурс] / ОАО «Плазмотех». – Режим доступа [www.plasma-tech.ru/diamond/](http://www.plasma-tech.ru/diamond/) Дата доступа: 21.02.10
3. Алмазоподобные покрытия [Электронный ресурс] / Научно-технологический институт транскрипции, трансляции и репликации. – Режим доступа: <http://kint-kib.narod.ru/ap.html>. – Дата доступа: 19.02.2010.

УДК 621.723

Линник А.В., Ефимов А.М.

### **МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

*БГАТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Акулович Л.М.*

*Предложено усовершенствовать процесс магнитно-электрического упрочнения введением ультразвуковых колебаний. Рассмотрена структура и свойства частиц при нанесении покрытия способом магнитно-электрического упроч-*

*нения с введением ультразвука. Показано, что использование ультразвука совместно с процессом магнитно-электрического упрочнения позволяет улучшить физико-механические свойства наплавленного слоя. В результате этого повышается качество слоя, стабильность и производительность процесса.*

Исследования по выяснению физического механизма магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) в ультразвуковом поле проводятся в соответствии с концепцией разработки технологии изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин послойной наплавкой, намораживанием композиционных и синтетических материалов в комбинированных физических полях [1].

Суть процесса МЭУ порошковых ферромагнитных материалов в ультразвуковом поле заключается в следующем [2]. В рабочую зону, зазор между подложкой (деталью) и источником ультразвука, одновременно являющимся источником магнитного поля, подаётся ферромагнитный порошок (ФМП). Частицы ферромагнитного порошка, обладающие магнитными свойствами, выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля. Образуются «цепочки» из ферромагнитных частиц. Излучатель ультразвука, одновременно являющийся полюсным наконечником, и подложка (деталь) подключается к источнику постоянного электрического тока.

Роль магнитного поля на первой стадии: формирования «цепочек» частиц. Этот процесс идет до включения постоянного электрического тока между деталью и магнитным наконечником. На деталь подается (-), на магнитный наконечник (+).

Постоянный или прерывистый импульсный ток одного направления моментально разогревает «брикет» из частиц ферропорошка. Причем, температурное поле «брикета» неоднородно. Тепловой поток от разогрева порошка в областях, примыкающих к подложке (детали) и магнитному

наконечнику, становится значительно больше, чем от середины «брикета».

В средней части «брикета» температура ферропорошка достигает точки Кюри раньше, и поэтому ферропорошок теряет магнитные свойства, превращаясь в парамагнетик [3].

Индукция магнитного поля между подложкой и наконечником уменьшается. В результате получается следующая последовательность расположения магнетиков, представленная на рисунке 1.

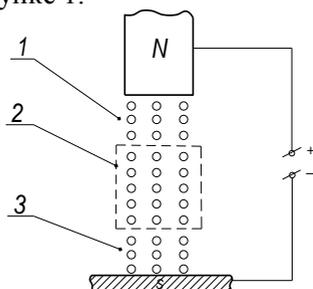


Рисунок 1 – Магнитные свойства частиц в рабочей зоне:

1 – ферромагнетик, 2 – парамагнетик, 3 – ферромагнетик

В первый период процесса упрочнения частицы ФМП, которые находятся в контакте с деталью, припекаются к ней. Это происходит за счет электрических разрядов и контактного электросопротивления большой плотности тока между деталью и частицами. После истечения определенного времени частицы, находящиеся около детали до средней зоны и от средней зоны до полюсного наконечника нагреваются до точки Кюри, и все частицы превращаются в парамагнетик. На этом прекращается влияние магнитного поля на процесс упрочнения.

Новые порции частиц (рисунок 2) восстанавливают действие магнитного поля. Жидкая фаза расплава из средней части стекает вниз на припекшиеся частицы и расплав попадает на свободные места детали. Так формируется первый слой фер-

ромагнитного покрытия и образуется дисперсное ферромагнитное покрытие, состоящее из не расплавившихся ферромагнитных частиц и закristаллизовавшегося расплава.

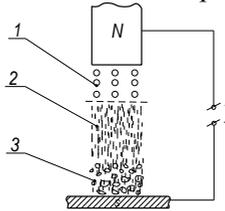


Рисунок 2 – Структура покрытия в рабочей зоне при упрочнении в совмещенных физических полях:

1 – ферромагнитный порошок, 2 – расплавившийся ФМП, 3 – закristаллизовавшиеся и припекшиеся частицы ФМП к детали, 4 – жидкий расплав металла, заполняющий пространство между частицами и кристаллизующийся на детали

Ультразвуковые колебания некоторое время после включения магнитного поля интенсифицируют теплообменные процессы в «брикете» ферропорошка и межфазные процессы на границе раздела «деталь – расплавленный слой ферропорошка». Эти процессы создают хорошую адгезию расплавленного ферропорошка с деталью и улучшают качество формируемого покрытия за счет создания мелкодисперсной структуры металла и дегазации затвердевшего расплава [3].

После проведенных исследований можно сделать вывод о том, что сочетание электромагнитного и ультразвукового полей при МЭУ приводит к качественному изменению процесса: изменяются физико-механические свойства наплавленного слоя, повышается качество слоя, стабильность и производительность процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стукин, А.С. Исследование процесса наплавки порошковых материалов в ультразвуковом поле / А.С. Стукин // Материалы 8 Республиканской научно-технической

конференции студентов и аспирантов. – Минск, 2003 – 159 с.

2. Шиляев, А.С. Ультразвук в науке, технике и технологии / А.С. Шиляев. – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. – 412 с.

УДК 621.5

Ляпин К.Н.

## **МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СОБСТВЕННОГО ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Иванов И.А.*

Цель работы – изучить основные источники собственного газовыделения материалов в вакууме и основные методы измерения интенсивности этого газовыделения.

Каждый металл и неметалл содержит определенное количество газа, который может присутствовать в виде растворенных примесей, либо в виде легирующего элемента, участвующего в формировании структуры этого металла (или неметалла).

Если деталь, изготовленная из такого материала, помещается в вакуумную камеру, то растворенный в ней газ будет диффундировать к поверхности этой детали, откуда десорбируется и попадает в саму вакуумную камеру.

Одним из условий сохранения высокого вакуумных в приборах является отсутствие газовыделений с поверхностей материалов, граничащих с вакуумом. В обычных условиях все материалы содержат связанные газы: удерживаются на поверхности за счет сил физической адсорбции (адсорбированы); растворены в объеме материала (абсорбированы); содержатся в виде химических соединений (хемосорбированы); имеются в виде объемных включений в порах, трещинах (окклюдированы).

Связанные газы при определенных условиях могут переходить в свободное состояние (десорбироваться) и повышать давление в замкнутом объеме.

Обычно в ходе откачки высоковакуумные системы и электровакуумные приборы подвергаются обезгаживанию. В каждом конкретном случае следует рассматривать пару «материал – газ» и намечать соответствующие пути освобождения материала от газа.

Также одной из причин газовой выделенности является испарение материалов с поверхностей детали вакуумной системы. Испаряемость материалов в вакууме характеризуется упругостью пара (или плотностью пара) материала. Под этими терминами понимается давление, при котором материал испаряется при данной температуре.

Существуют несколько способов определения количества газов выделяемого материалом. Одними из наиболее простых являются:

1. Метод известной проводимости трубопроводов. В этом методе используются непрерывная откачка объема, в которой происходит газовой выделение.

2. Метод изотермического расширения. О количестве выделившихся газов можно судить по увеличению давления в известном по величине объеме, изолированном от насосов.

Существуют несколько способов определения количества газов выделяемого материалом. Одними из наиболее простых являются:

1. Метод известной проводимости трубопроводов. В этом методе используются непрерывная откачка объема, в которой происходит газовой выделение.

2. Метод изотермического расширения. О количестве выделившихся газов можно судить по увеличению давления в известном по величине объеме, изолированном от насосов.

Метод известной проводимости трубопроводов.

В этом методе используются непрерывная откачка объема, в которой происходит газовой выделение. Для откачки используется трубопровод известной проводимости. При наличии заметного газовой выделенности из образца в системе будет повышаться давление даже при непрерывной откачке,

т.к. количество выделившихся в единицу времени газов будет превышать, количество газов, удаляемых насосом через трубопровод, на концах которого устанавливается разность давлений  $P_1 - P_2$  (где  $P_1$  – давление на конце трубопровода обращенном к сосуду, а  $P_2$  – на конце трубопровода, обращенном к насосу).

Поток газа через трубопровод определяется выражением:

$$Q = U(P_1 - P_2),$$

а количество газа, прошедшее за время  $\Delta t$ , будет:

$$\Delta G = Q\Delta t.$$

Метод изотермического расширения.

О количестве выделившихся газов ( $G$ ) можно судить по увеличению давления в известном по величине объеме  $V_2$ :

$$G = V_2(P_{кон} - P_{нач}),$$

где  $P_{кон}$  – давление, которое установилось в системе при подключении объема,  $P_{нач}$  – начальное давление, которое было в объеме до соединения его с системой, в которой происходит газовыделение.

Следует отметить, что газ попадает в систему не только в результате газовыделения из образца, но и десорбируется с поверхности самой установки, а также проникает за счет натекания. Поэтому реально количество газа при данном способе измерений будет несколько ниже.

Поток газа ( $Q$ ), десорбирующегося с поверхности образца определяется выражением:

$$Q = V_2 \frac{\Delta G}{\Delta t},$$

где  $\Delta G$  – количество газа десорбированного с поверхности образца за время  $\Delta t$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. – СПб: Машиностроение, 2007.

2. Холодкова, Н.В. Техника высокого вакуума: Лабораторный практикум / Н.В. Холодкова, И.В. Холодков. – ГОУВПО Ивановский государственный химико-технологический университет, 2007.

УДК 621.5

Мартысевич Н.О.

## **ВАКУУМНЫЕ ЛОВУШКИ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Иванов И.А.*

Работа вакуумных насосов сопровождается рядом нежелательных явлений: проникновение паров рабочих жидкостей из насоса в откачиваемый объект; загрязнение насоса откачиваемыми веществами с высоким давлением насыщенных паров; потеря рабочей жидкости через выхлопной патрубков; утечка откачиваемого газа. Для ограничения этих явлений служит специальное вакуумное оборудование: ловушки, влагопоглотители, натекатели, конденсаторы, фильтры, уплотнители и т.д.

Вакуумными ловушками называются устройства, служащие для предотвращения проникновения паров рабочих жидкостей вакуумных насосов в откачиваемый объем.

Цель работы – изучить устройство и принцип работы наиболее широко используемых вакуумных ловушек.

В зависимости от рабочего давления различают:

- 1) высоковакуумные ловушки, предназначены для улавливания паров из диффузионных и бустерных пароструйных насосов при молекулярном течении пара;
- 2) форвакуумные ловушки для улавливания паров из форвакуумных насосов при вязкостном и переходном режимах течения пара.

По принципу действия вакуумные ловушки делятся на механические, низкотемпературные, сорбционные, термические и электрические. В технологическом вакуумном оборудовании наибольшее применение находят механические и конденсационные ловушки.

К ловушкам предъявляются два основных требования:

1) максимальное защитное действие в течение заданного срока службы;

2) минимальное сопротивление основному потоку откачиваемого газа.

Дополнительными требованиями являются возможность регенерации рабочего элемента, надежность, простота, технологичность конструкции, удобство эксплуатации.

Форвакуумные ловушки служат для защиты откачиваемой системы от проникновения паров масла и продуктов его разложения из форвакуумных насосов в откачиваемую систему.

Механические ловушки представляют собой устройства, препятствующие прямому пролету паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект. Защитный элемент ловушки обычно выполняется из пористого материала (стекла, стекловолокнистых материалов, пористой меди и нержавеющей стали) с размерами ячеек не более 0,1 мкм. Габаритные размеры ловушек зависят от удельной проводимости пористых материалов. Поглощение паров масла осуществляется адсорбцией на стенках капиллярных каналов. Срок службы пористых элементов составляет несколько сотен часов, после чего он должен быть заменен новым. Для повторного использования отработавший элемент очищается продувкой атмосферным воздухом и нагревом до температуры около 500 °С. Период непрерывной работы ловушки можно увеличить добавлением в пористые элементы адсорбционных материалов: активированных углей, цеолитов, активного оксида алюминия и др.

В адсорбционных ловушках удаление поглощенных в рабочем элементе масла и воды осуществляют путем его нагрева до температуры 300–500 °С нагревателем. Ловушки с адсорбентом нельзя подвергать воздействию атмосферного воздуха, так как они могут поглотить большое количество

атмосферной воды, которая затем будет выделяться во время работы насоса.

В ионных ловушках используют тлеющий холодный разряд. Разряд горит при напряжении на аноде около 3 кВт и наличии осевого магнитного поля, создаваемого внешними магнитами. Такая ловушка уменьшает парциальное давление паров масла в 10–100 раз.

В сорбционной ловушке установлен сменный пакет со слоями из различных сорбентов.

Принцип действия низкотемпературных форвакуумных ловушек основан на конденсации паров масла и продуктов его разложения на поверхностях ловушек, охлажденных до низких температур. Ловушки устанавливаются на впускном патрубке форвакуумного насоса.

Установка азотной ловушки над форвакуумным масляным насосом позволяет получить предельное остаточное давление  $2 \cdot 10^{-3}$  Па. Ловушки могут работать не менее 15 ч без доливки жидкого азота в диапазоне давлений  $10^5$ – $10^2$  Па.

Высоковакуумные ловушки. Предельное давление высоковакуумных насосов обусловлено обратным потоком паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект. Для его уменьшения на пути обратного потока устанавливаются ловушки, которые по принципу действия можно разделить на конденсирующие, диссоциирующие и сорбирующие.

Простейшей конденсирующей ловушкой, служащей для уменьшения проникновения паров рабочей жидкости из паромасляных насосов, является колпачковый маслоотражатель. Он представляет собой колпачок, устанавливаемый над верхним соплом паромасляного насоса и охлаждаемый водой. Отражатель позволяет в 20–30 раз уменьшить обратный поток паров рабочей жидкости из паромасляных насосов, не снижая практически быстроты действия насоса.

К оптически непрозрачным механическим ловушкам относят устройства, действие которых основано на том, что молекулы рабочей жидкости, поступающие из любой точки насоса, не могут проникнуть в откачиваемую систему без соударения с элементами улавливающего устройства. Для наиболее полной защиты откачиваемой системы от паров рабочей жидкости пароструйных насосов служат низкотемпературные ловушки, применение которых в хорошо дегазированной системе для паромасляных диффузионных насосов позволяет получать остаточное давление  $10^{-8}$  Па и для парортутных насосов  $10^{-10}$  Па. Для паромасляных диффузионных насосов в зависимости от требований, предъявляемых к остаточному давлению и составу остаточных газов, применяют ловушки, охлаждаемые до температур от 243 до 77 К.

Таким образом, использование вакуумных ловушек позволяет существенно уменьшить загрязнение технологических камер. Выбор типа ловушки зависит от типа используемого вакуумного насоса.

УДК 621.793

Мисник И.В.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ TiN ВАКУУМНО-  
ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ  
НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СТЕКЛА**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Комаровская В.М.*

Одной из главных задач современной науки и техники по-прежнему остается проблема экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов. В настоящее время одним из путей решения данной проблемы является повышение износостойкости рабочих поверхностей, так как в большинстве случаев выход изделий из строя обусловлен износом. Согласно [1] износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной

скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Износостойкость в значительной степени зависит от микротвердости поверхностного слоя [2]. Как известно формирование вакуумно-плазменных покрытий защитно-декоративного назначения на поверхности изделий из стекла позволяет повысить микротвердость поверхности, следовательно, улучшается износостойкость данных изделий. Однако в литературе практически отсутствуют сведения о триботехнических свойствах TiN вакуумно-плазменных покрытий на неметаллических материалах, в частности стекле. Следует отметить, что при определении износостойкости необходимо соблюдать следующее условие: процесс должен имитировать воздействие на рабочие поверхности реальных внешних факторов [3]. Исходя из анализа условий работы изделий из стекла с TiN вакуумно-плазменными покрытиями защитно-декоративного назначения, было сконструировано и изготовлено специальное приспособление, позволяющее определить износостойкость данных изделий.

Общий вид приспособления представлен на рисунке 1, а конструкция на рисунке 2.



Рисунок 1 – Общий вид приспособления для определения износостойкости покрытий

На плите (9) закрепляется двигатель (2) с выключателем (1). На валу двигателя устанавливается войлочный круг (18). На планках (7) установлена шпилька (3) с закрепленным на ней кронштейном (8). К кронштейну прикреплен корпус (5), предназначенный для установки испытуемых образцов. Для удобной и безопасной установки образцов предусмотрена

возможность откидывания кронштейна относительно шпильки. В целях соблюдения техники безопасности при испытаниях предусмотрен защитный кожух (4).

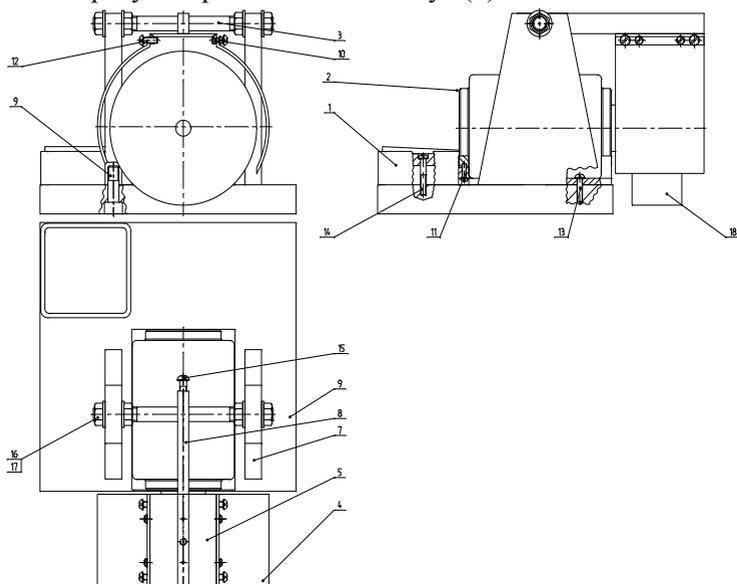


Рисунок 2 – Конструкция приспособления для определения износостойкости покрытий  
 1 – выключатель; 2 – двигатель; 3 – шпилька;  
 4 – кожух; 5 – корпус; 6 – винт; 7 – планка; 8 – кронштейн; 9 – плита; 10 – 15 – винт; 16 – гайка;  
 17 – шайба; 18 – круг

Испытания износостойкости проходят при следующих режимах: схема – периферия круга – плоскость при трении без смазочного материала (рисунок 3); частота вращения вала  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ , удельная нагрузка  $q = 0,01 \text{ МПа}$ , что соответствует реальным условиям работы изделий из стекла с покрытием. Критерием окончания эксперимента служит полное истирание покрытия.

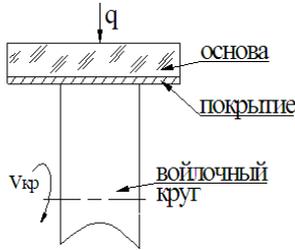


Рисунок 3 – Схема

### ЛИТЕРАТУРА

1. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения: ГОСТ 23.002-78. – Введ. 03.07.1979. – Межгос. Научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации, 1979. – 21 с.

2. Мрочек, Ж.А. Плазменно-вакуумные покрытия: Монография / Ж.А. Мрочек [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 369 с.

3. Егоров, А.Л. Оценка механической прочности поверхности оптических покрытий методом истирания абразивом во вращающемся барабане / А.Л. Егоров, В.Ф. Михайлов // Оптико-механическая промышленность, 1990. – № 4. – С. 75–78.

УДК 621.793

Муравейко А.Н.

## **ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ПЛОСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Шахрай Л.И.*

При разработке конструкции вакуумной установки одной из основных проблем является выбор таких размеров вакуумной камеры и формы приемной поверхности, которые

позволят получить заданную толщину покрытия при максимальном использовании приемной поверхности.

Распределение толщины покрытия по приемной поверхности определяется следующим образом [1] :

$$t = \int_0^{\tau} \frac{A \cos \varphi^n(\tau) \cos \theta(\tau)}{R^2} d\tau, \quad (1)$$

где  $t$  – толщина оптического покрытия;

$\tau$  – время напыления;

$A$  – постоянная, зависящая от условий напыления;

$\varphi(\tau)$  – угол между нормалью к поверхности испарения и радиус-вектором точки, в которой определяется толщина оптического покрытия;

$\theta(\tau)$  – угол между нормалью к поверхности, на которую происходит конденсация и радиус-вектором;

$R$  – радиус-вектор;

$n$  – показатель степени, зависящий от условий напыления.

Оптимизацию геометрии вакуумной камеры обычно проводят для косинусного распределения потока пара по формуле (1) [2]. Для реального испарителя закон распределения потока пленкообразующего материала отличается от косинусного, т. е. показатель степени в выражении отличен от 1.

Распределение конденсата по приемной поверхности зависит как от геометрии вакуумной камеры, формы и размеров деталей, так и от технологических факторов при напылении: давления, скорости напыления, температуры подложки, формы поверхности испарения. Вследствие этого реальная неравномерность толщины покрытия по поверхности деталей отличается от расчетной. Особые затруднения возникают при нанесении покрытий на крупногабаритные детали.

При исследовании в условиях предприятия «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» распределения конденсата по поверхности плоской оптической детали диа-

метром 700 мм, установленной в вакуумной установке ВУ-3, внутренний диаметр которой равен 800 мм, было получено, что неравномерность толщины оптического покрытия составляет 33 % (рисунок 1).

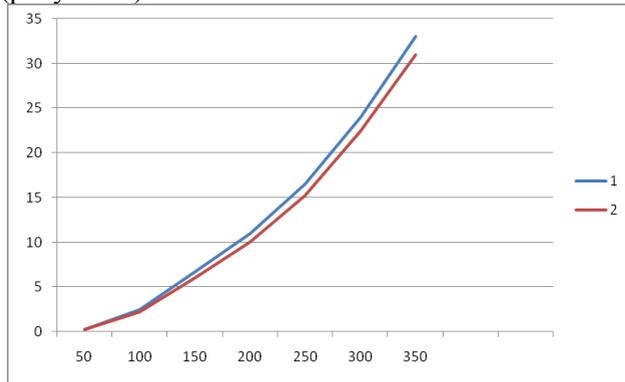


Рисунок 1 – Распределение неравномерности толщины покрытия по поверхности плоской детали в зависимости от ее радиуса: 1-n=1, 2-n=1,3

Получение равномерных оптических покрытий на таких крупногабаритных, практически совпадающих с диаметром вакуумной камеры, плоских деталях невозможно без введения дополнительных устройств – масок.

В связи с этим необходимо рассчитать, экспериментальным путем откорректировать и изготовить корректирующие маски и системы их крепления, позволяющие проводить нанесение равномерных по толщине вакуумных покрытий на плоские поверхности оптических деталей диаметром 700 мм.

Форма вращающейся корректирующей маски на плоскую деталь диаметром 700 мм, установленную в вакуумную камеру установки ВУ-3, рассчитывается с учетом методики, приведенной в работах и исходя из реального распределения толщины покрытия по детали.

Корректирующая маска представляет собой заслонку, ось вращения которой совпадает с осью вращения детали и устанавливается между деталью и испарителями (рису-

нок 2).

Схематическое изображение положения вращающейся корректирующей маски относительно плоской детали в вакуумной камере представлено на (рисунке 3).

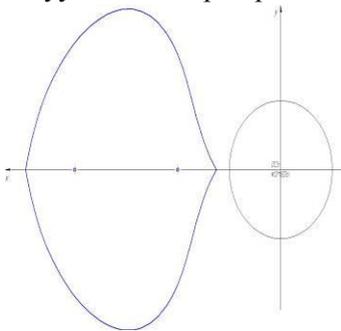


Рисунок 2 – Контур лепестка маски, выравнивающей толщину оптического покрытия по поверхности плоской детали диаметром 700 мм

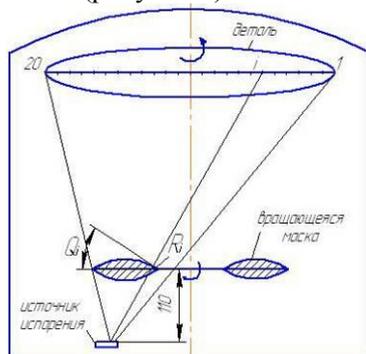


Рисунок 3 – Схема расположения в вакуумной камере вращающейся маски и детали относительно источника испарения

Корректирующая маска вращается в сторону, противоположную стороне вращения оптической детали, а скорость вращения корректирующей маски в 25 раз больше скорости вращения оптической детали. Корректирующая маска, благодаря своей форме, избирательно экранирует поверхность оптической детали, чем уменьшает неравномерность толщины оптического покрытия по поверхности детали.

Применение рассчитанной вращающейся корректирующей маски снижает неравномерность толщины оптического покрытия по поверхности оптической детали диаметром 700 мм до 2 %.

При проведении исследования распределения конденсата по поверхности плоской оптической детали диаметром 700 мм необходимо напыление металлodieлектрического зеркала состоящего из слоев алюминия: двуокиси

циркония ( $ZO_2$ ) и двуокиси кремния ( $SiO_2$ ). Напыление проводилось без нагрева оптической детали при давлении в вакуумной камере  $1 \cdot 10^{-3}$  Па и скорости вращения арматуры 15 об/мин. Спектральные характеристики наносимого оптического покрытия исследуются на спектрофотометре Epsilon.

УДК 621.762.4

Нагорная Е.В., Зыгмантович В.М.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОЗЫ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Зуенок А.Ю.*

В век металла и пластика возникает особенно острое желание вернуться к природе. Люди все чаще отдают предпочтение экологически чистым естественным материалам. И здесь важное место могут занять верба и лоза. Эти «подпитывающие» растения способствуют наращиванию энергетики человека и увеличивают сопротивляемость организма болезням. Соприкосновение с лозой улучшает самочувствие, дает ощущение бодрости, прилива сил. К тому же лоза – весьма послушный материал, из которого можно создавать самые разнообразные плетеные изделия: корзины, изящные кресла-качалки, канапе, жардиньерки, журнальные столики...

Плетение из лозы – один из старейших промыслов. Он был распространен еще в XVIII-XIX вв., преимущественно в местностях недалеко от рек. На изящную мебель, корзины из лозы, окрашенные, а иногда и покрытые позолотой, появился такой спрос, что во французской провинции Шампань для посадки ивы раскорчевывались даже виноградники. Плетение стало модой. Десятки тысяч людей занимались этим ремеслом в Пруссии и Баварии. Для обучения мастеров повсеместно открывались специальные школы.

Основной инструмент для работы с лозой – острый нож. Необходимы будут также ножницы с острыми концами (для бересты), шило и киянка.

Материал – столярный, казеиновый или универсальный клей для скрепления концов изделия из лозы, а так же тонкая проволока, мелкие гвозди и нитки.

Плетение из лозы, как и любой другой традиционный промысел, требует долгого терпения и мастерства. Корзинки и другие изделия чаще всего плетут из молодых побегов ивы, растущей по берегам рек и озер. Самые гибкие и удобные для работы – побеги ивы, срезанные ранней весной, как только сойдет снег. В это время и следует их заготовить. Можно, конечно, пользоваться для плетения и прутьями, срезанными в другое время года, но они менее гибки. Срезают прутья острым ножом, как можно ближе к земле, снизу вверх «на ус».

Срезанные весной свежие побеги отлично гнутся без предварительной обработки. Однако после продолжительного хранения их требуется перед плетением вымочить и распарить, чтобы сделать гибкими и эластичными. Такая же обработка нужна и для прутьев, срезанных летом, осенью или зимой: их вымачивают сразу после срезки.

Путья укладывают в корыто или в бочку и заливают водой. Вымачивание продолжается от 5 до 15 дней – в зависимости от того, как долго хранились срезанные побеги и насколько они высохли. Воду в корыте или бочке время от времени меняют. Летом лозу можно уложить для вымачивания в ручей или в реку в мелком месте возле берега, придавив прутья камнями.

Вымоченные прутья станут еще более гибкими, если их после этого распарить в печи или прокипятить на слабом огне. Для кипячения прутья укладывают в металлическое оцинкованное корыто или в бак для белья, заливают водой и прикрывают, затем, сняв гибкую белую кору, сортируют ее по длине и диаметру. А потом снова вымачивают, так

как плести можно только из влажного материала. Лозой обычно оплетают заранее заготовленный каркас – тоже из ивовой древесины. У опытных мастеров, фантазия которых безгранична, даже на основе одного и того же шаблона могут получиться два совершенно разных предмета.

Опишу приемы плетения из прутьев на примере двух корзин различной формы: круглой и цилиндрической.

Круглую корзину плетут так. Подбирают два прута одинаковой толщины по всей длине (тонкие вершины срезают). Длина прутьев зависит от желаемой величины корзины. Она может быть, например, диаметром 50..60 сантиметров. Из прутьев сгибают обручи. Удобнее всего это сделать, воспользовавшись в качестве шаблона толстым круглым поленом, пнем, бочонком и т.д. Концы прутьев срезают наискосок – «на ус» – и скрепляют тонкими гвоздями или проволокой. Один обруч вставляют во второй под прямым углом накрест и в местах скрещивания оплетают пять-шесть раз тонким прутком. Горизонтальный обруч будет бортом корзины, нижняя часть вертикального – основой дна, а верхняя – ручкой.

Нарезают 4 или 6 прутьев вдвое меньшей длины, чем те, из которых сделаны обручи. Концы прутьев заостряют лопаточками. Этими концами прутья закрепляют в местах скрещивания обручей: продевают заостренные концы под скрепляющую обручи оплетку. Два или три прута устанавливают таким образом ниже борта с одной стороны основы, столько же прутьев – с другой стороны. Закрепленные прутья, которые называют стояками, изгибаются полукруглыми дугами.

Сделав каркас корзины, начинают плести ее. Конец тонкого прута придерживают снаружи у основы, загибают внутрь корзины над нижним стояком, выводят снова наружу, над следующим стояком загибают снова внутрь и т. д. Прут огибает стояки поочередно то с одной, то с другой стороны и поэтому прочно держится между ними. На борту прут сгибают и продолжают плетение сверху вниз. Дойдя до основы,

снова сгибают и ведут снизу вверх. Два соседних прута огибают каждый стояк с противоположных сторон. Когда прут кончается, конец его обрезают у одного из стояков «на ус», прикладывают к срезу нового прута и продолжают плетение. Сращивать прутья следует не у основы и не у бортов корзины, а в промежутках между ними.

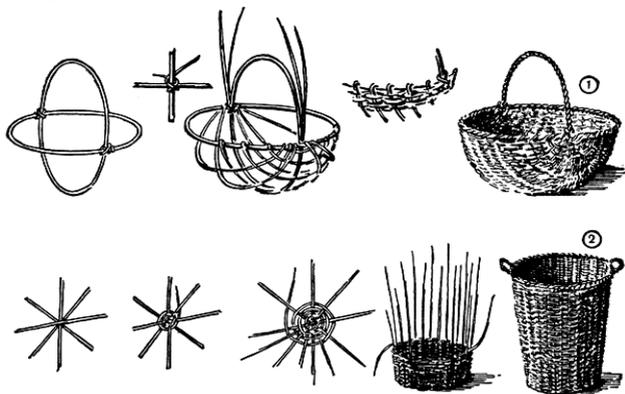


Рисунок 1 – Плетение корзин из лозы

Так оплетают весь каркас корзины.

Цилиндрическую корзину для сбора картофеля, овощей и фруктов плетут иначе.

Основу и стояки корзины делают из одних и тех же длинных прутьев. Число их должно быть четным: 6, 8 или больше – в зависимости от величины корзины. Путья складывают веером накрест, в месте пересечения перевязывают тонким прутком. В перевязи закрепляют заостренной лопаточкой конец длинного прута и плетут дно корзины по кругу, пропуская этот прут поочередно сверху и снизу прутьев основы.

Когда сплетут дно нужных размеров, свободные концы прутьев основы отгибают кверху. Получаются стояки. По ним плетут стенки корзины горизонтально, по кругу и так, чтобы корзина постепенно расширялась кверху. Дойдя приблизительно до половины высоты, в плетение вставляют концы согнутых пополам прутьев. Это ручки. Каж-

дая ручка состоит из 3-4 прутьев. Затем продолжают плетение стенок доверху. Борт корзины и ручки оплетают тонким прутком.

Во время плетения прутья пристукивают киянкой, чтобы они теснее легли друг к другу.

Таковыми же приемами пользуются при плетении других вещей.

Изделия из лозы практичны в применении, удобны, эстетичны, поэтому не утратили популярности и в наше время. При бережном отношении они могут прослужить более 20 лет. Кроме того, мебель и другие изделия из лозы имеют приятный запах, придают интерьеру легкость и изящество. Техника плетения позволяет избегать острых углов, создавать обтекаемые, плавно изгибающиеся формы. А стойкость к влаге и высоким температурам позволяет применять ее также в саунах и бассейнах. Специалисты утверждают, что по прочности мебель из лозы не уступает дубовой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лисин, А.С. Плетение из лозы / А.С. Лисин. – М.: МСП, 2007.
2. Локрина, Т.В. Композиции с лозой и берестой / Т.В. Локрина. – М.: Ниола 21 век, 2005.
3. Трапезников, Ф.Ф. Плетение ивового прута и бересты / Ф.Ф. Трапезников. – М.: Нива России, 1992.

УДК 621.762.4

Нарушко Е.О.

## **ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ОТ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В АВИАСТРОЕНИИ**

*БНТУ, г. Минск,*

*Научный руководитель: Орлова Е.П.*

Лопатки осевого компрессора изготавливают из никелевых жаропрочных сплавов. Однако эти сплавы не обеспечи-

вают достаточной стойкости к воздействию агрессивной среды газового потока двигателя. В газовой среде содержатся агрессивные компоненты, вызывающие образование на поверхности лопаток солевого осадка и резкое увеличение скорости разрушения поверхностного слоя металла. Газовые турбины нередко работают на топливе, содержащем повышенную концентрацию серы, что приводит к постепенному накоплению на поверхности лопаток осадка соли и протеканию сульфидной коррозии. В составе топлив нередко присутствуют ванадий, легкоплавкие оксиды которого вызывают разрушение поверхностного слоя лопаток газовых турбин. Высокотемпературное окисление жаропрочных никелевых сплавов в сочетании с сульфидной и ванадиевой коррозией, а также эрозией существенно ограничивают ресурс лопаток. Применение защитных покрытий позволяет увеличить ресурс лопаток в 3..5 раз. Эффект достигается правильным выбором технологии и химического состава покрытий применительно к конкретным условиям эксплуатации газовых турбин.

На лопатках газовых турбин широко применяют две группы покрытий – диффузионные и конденсационные.

Диффузионные покрытия получают контактными или бесконтактными способами в порошковых смесях с помощью шликеров или в газовой среде, содержащей насыщающие элементы (алитирование, хромирование, кобальтирование, хромоалитирование и др.). Положительный эффект дает использование двухстадийных технологий, когда на первой стадии осаждают никель, кобальт, хром, а затем проводят алитирование или хромоалитирование. Такие технологии обеспечивают реализацию комплексного легирования поверхностного слоя лопаток насыщающими элементами. Важнейшим преимуществом диффузионных покрытий является возможность защиты от газовой коррозии труднодоступных поверхностей охлаждаемых лопаток газовых турбин (полости, щели, каналы отверстия перфорации)

Конденсационные покрытия получают способами плазменного, вакуумно-плазменного, магнетронного или электронно-лучевого напыления из слитков или брикетов, представляющих собой металлические сплавы для покрытий, например, сплавы систем Ni-Cr-Al-Y (СДП-2), Al-Si-Y (ВСДП-11), Ni-Cr-Al-Ta-W-Hf-Y (СДП-ТВГ) и др.

Применяемые покрытия обычно формируются на основе алюминидов никеля или кобальта. Базовой системой высокотемпературных покрытий является система Me-Cr-Al, где в качестве Me используют Ni, Co. Легирующие элементы в покрытиях можно разделить на три основные группы:

- элементы, формирующие защитную оксидную плёнку (Al, Cr, Si);
- элементы, тормозящие диффузионные процессы в самом покрытии и в диффузионной паре «сплав-покрытие» (Ta, Re, W);
- микролегирующие элементы, улучшающие адгезию оксидной плёнки при газовой коррозии (Y, Ce, La, Hf, Si).

К вредным примесям в покрытиях относятся кислород, азот, кальций, сера, которые могут поступать в покрытия из различного рода отложений, накапливающихся на поверхности лопаток в процессе эксплуатации.

Новым направлением, активно развивающимся в последнее десятилетие, является создание многокомпонентных композиций высокотемпературных покрытий на базе совместного применения диффузионного и конденсационного способов.

Конденсационно-диффузионные покрытия относятся к новому классу комбинированных защитных покрытий. Совместное использование двух технологий позволяет успешно решать проблемы увеличения работоспособности жаростойких покрытий при температурах на металле вплоть до 1200°C путём введения в покрытия тугоплавких металлов (Ta, Re, W), эффективно тормозящих диффузионное «рассасывание» покрытия на границе со сплавом и выполняющих роль диффузионного барьера. Применение

диффузионного способа решает при этом проблему защиты внутренних полостей на лопатках турбин.

Тантал и вольфрам являются важнейшими упрочняющими элементами в покрытии. Кремний, гафний, иттрий обеспечивают высокую долговечность покрытия при изотермическом и циклическом окислении. Введение тантала в покрытие однозначно приводит к повышению жаростойкости по сравнению с покрытиями СДП-2 (Ni – основа; Cr – 15–17 %; Al – 7,5–10,5 %; Y – 0,5–1,5 %), алитированием или ВСДП-11 (Al – основа; Si – 5,2 %; Y – 1,65 %) в частности на сплавах ЖС6У и ЖС32 при температурах 1100 °С и 1150 °С. Толщина слоя СДП-ТВГ составляет 0,030–0,040 мм.

При изготовлении отверстий перфораций в охлаждаемых лопатках нередко наблюдается поверхностное растрескивание (фрагментация), которое снижает надежность и является причиной отбраковки деталей, тормозит возможность увеличения ресурса лопаток по характеристикам жаропрочности сплавов, применяемых для изготовления лопаток.

Механизм разрушения металлов при солевой коррозии обычно связывают с флюсованием оксидов. Чем меньше скорость флюсования оксидов, тем выше долговечность лопаток турбины. Наиболее перспективной в качестве основы для разработки и совершенствования защитных систем на лопатках газовых турбин, работающих на загрязнённых сортах топлива, является пятикомпонентная система Ni-Co-Cr-Al-Y [10, 11]. Оптимальное сочетание высокой жаростойкости, хорошей фазовой и структурной стабильности достигается при использовании в качестве покрытий сплавов на никелевой основе, содержащих кобальта 12–20 %, хрома 17–20 %, алюминия 9,5–10,5 %.

Испытания на солевую коррозию при температуре 900 °С по разработанной авторами методике показали, что алитированные образцы имеют срок службы не более 100 ч, хромоалитированные – не более 150 ч, кобальтхромоалити-

рованные – до 250 ч. Наиболее высокую стойкость к солевой коррозии показали образцы с комбинированным покрытием, полученным напылением слоя сплава СДП-ТВГ толщиной 0,04 мм и последующим хромоалитированием – до 400 ч.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абраимов, Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин / Н.В. Абраимов. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Строганов, Г.Б. Жаропрочные покрытия для газовых турбин / Г.Б. Строганов [и др.]. – М.: Навигатор-Экстра, 2000. – 165 с.
3. Абраимов, Н.В. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Учебник для вузов / Н.В. Абраимова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 560 с.
4. Абраимов, Н.В. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов / Н.В. Абраимов. – М.: Интернет Инжинеринг, 2001. – 622 с.
5. Арзамасов, Б.Н. Химико-термическая обработка материалов в активизированных средах / Б.Н. Арзамасов. – М.: Машиностроение, 1979.
6. Абраимов, Н.В. Методика испытаний сопротивляемости сплавов и покрытий солевой коррозии / Н.В. Абраимов [и др.]. // Коррозия: материалы, защита. – № 6. – 2007. – С. 5–6.
7. Симонов, В.Н. Хромоалитирование циркуляционным способом охлаждаемых лопаток газовых турбин / В.Н. Симонов. – М.: Металловедение и термическая обработка металлов. – № 7 (625), 2007. – С. 36–39.
8. Абраимов, Н.В. Структурные изменения в алюминидном покрытии на сплаве ЖС32 при баротермической обработке / Н.В. Абраимов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. – № 9. – 2008. – С. 23–28.
9. Абраимов, Н.В. К вопросу об эффективности многокомпонентных покрытий для жаропрочных сплавов / Н.В. Абраимов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. – № 10. – 2005. – С. 10–13.
10. Никитин, В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин / В.И. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

11. Косицин, С.В. Влияние кобальта на структурно-фазовую стабильность и свойства сплавов Ni-Co-Cr-Al вблизи эвтектических составов / С.В. Косицин // ФММ. – 1999. – № 3. – С. 85–98.

УДК 621.52

Павленова В.А.

**ЭФФЕКТИВНАЯ ИОННАЯ ОБРАБОТКА  
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
СЕТОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Федорцев В.А.*

В последние десятилетие в приборо- и машиностроении все большее применение находят разные методы ионной обработки материалов, среди которых наиболее эффективным является метод ионной обработки с помощью высокочастотного (ВЧ) сеточного электрода, разработанный еще в начале 1970 г. в Государственном оптическом институте (г. Ленинград) [1].

Метод сочетает простоту и надежность ВЧ распыления с возможностью обработки оптических деталей сложной конфигурации и размеров. Схема установки для ионной обработки диэлектриков с помощью ВЧ сеточного электрода показана на рисунке 1.

В отличие от других известных методов ВЧ распыления в данной схеме ВЧ напряжение подается не на деталь, а на сеточный электрод из проводящего материала, который подключен к ВЧ генератору через емкость. Обрабатываемая деталь устанавливается непосредственно за электродом. При определенном давлении рабочего газа между ВЧ электродом и заземленным анодом 3 возникает газовый разряд. При отрицательном напряжении на электроде ионы вытягиваются из плазмы разряда и бомбардируют электрод и диэлектрическую деталь, пролетая сквозь сетку. При положительном напряжении электрод и деталь бомбардируются электронами, которые снимают наведен-

ный положительный заряд. Также как и при обычном ВЧ распылении, благодаря высокой подвижности электронов, положительное напряжение на электроде практически близко к нулю.

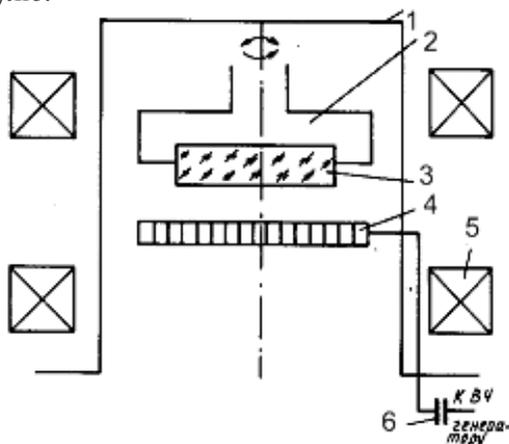


Рисунок 1 – Схема подколпачной арматуры:

1 – вакуумная камера; 2 – держатель образца; 3 – образец; 4 – ВЧ сеточный электрод; 5 – катушки Гельмгольца; 6 – разделительный конденсатор

Важнейшим элементом данной схемы ВЧ распыления является сеточный электрод. Конструкция электрода, как показали эксперименты, определяет не только эффективность, но и возможность ионной обработки диэлектрической детали. В процессе работы сетка подвергается ионной и электронной бомбардировке, в результате чего происходит ее распыление и нагрев. Следовательно, материал сетки должен иметь небольшой коэффициент распыления, быть термостойким, а конструкция электрода должна обеспечить сохранение его формы при нагреве.

Эксперименты показали, что наиболее удачной оказалась сетка, составленная из металлических пластин шириной 2–4 мм и толщиной 0,3–0,5 мм (рисунок 2).

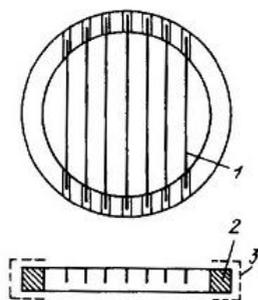


Рисунок 2 – Конструкция ВЧ сеточного электрода:

- 1 – пластины электрода;  
2 – обойма электрода; 3 – заземлённый экран

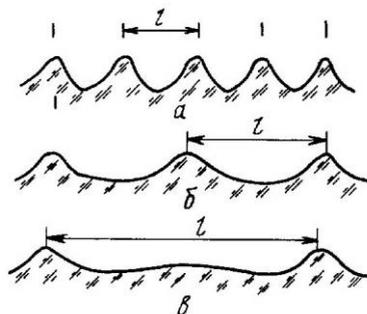


Рисунок 3 – Распределение съёма материала образца между пластинами электрода при различных расстояниях между пластинами:  
 $a$  – менее 3 мм;  $b$  – 3 мм;  $v$  – более 3 мм

В качестве материала сетки использовался никель, молибден, тантал. Пластины свободно крепились в пазах держателя, что обеспечило полное сохранение формы электрода при нагреве и его жесткость. Кроме того, такая конструкция обеспечивает хороший теплоотвод от пластин, на массивный держатель сетки.

При использовании ВЧ электрода, состоящего из пластин, установлено, что скорость распыления электрода относительно мала. Распыляется, в основном, торцовая грань пластин, в то время как боковые грани распыляются незначительно. Как показали измерения размеров пластин после 1000 ч работы, боковые грани распыляются на порядок медленнее торцов. Следует отметить, что сетка из напряженной металлической проволоки вообще непригодна для изготовления ВЧ электрода, так как скорость ее распыления высока, в том числе за счет угловой зависимости. В результате в процессе обработки превалирующим оказывается нанесение на деталь распыляемого материала сетки. Чтобы исключить

распыление нерабочих частей электрода, держатель пластин и все токонесущие элементы заключены в заземленные экраны.

Поскольку газовый разряд в описываемой системе под-держивается за счет электронной эмиссии из сеточного электрода, оказалось, что разряд обладает большей ста-бильностью, чем при ВЧ распылении диэлектриков. Эф-фективность обработки диэлектрической детали при этом зависит от расстояния между пластинами. На рисунке 3 показан профиль съема поверхности стекла К8 между пластинами ВЧ электрода (толщина пластин – 0,5 мм, ши-рина – 4 мм, длина – 120 мм, рабочий газ – аргон, напряже-ние – 1,5 кВ, плотность ионного тока – 2 *2сммА*) в зависи-мости от расстояния между пластинами. Максимальный съем при всех расстояниях оставался одинаковым при равном времени обработки.

При малых (до 3 мм) расстояниях между пластинами имеет место значительная экранировка ионного потока эле-ментами электрода. С увеличением расстояния между пла-стинами «прозрачность» ВЧ электрода растет при неизмен-ной скорости распыления образца. Однако при расстоянии более 3 мм начинается уменьшение скорости распыления центральной части образца, при дальнейшем увеличении расстояния между пластинами участок детали в центре во-обще бомбардироваться не будет. Для эффективности рабо-ты ВЧ электрода следует выбирать оптимальное расстояние между пластинами. В рассматриваемом случае оно составля-ет 3 мм. Эффективность работы электрода в плане оптими-зации конструкции не зависит от напряжения в пределах 1–4 кВ, плотности тока 1–4 *2сммА*, массы ионов от 20 до 130 а.е. Ширина пластин в пределах 2–4 мм не влияет на «прозрач-ность» электрода, т.е. не изменяет плотность ионного тока. Увеличение толщины пластин приводит к уменьшению «прозрачности» электрода, что можно использовать для управления съемом поверхности обрабатываемой детали.

Таким образом, оптимальные конструктивные параметры ВЧ сеточного электрода: ширина пластин – 4 мм, расстояние между пластинами – 3 мм, толщина пластин – 0,5 мм, материал пластин – молибден. Электрод такой конструкции, в основном, использовался при разработке технологии высокоточной размерной обработки и ионной регулировки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Габович, М.Д. Плазменные источники ионов / М.Д. Габович. – Киев: Наук думка, 1964.
2. Волчков, В.И. Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов / В.И. Волчков. – М.: ЦНИИ информ., 1983.
3. Миллер, В.Т. Технология изготовления прецизионных оптических элементов / В.Т. Миллер. – М.: ЦНИИ информ, 1986.

УДК 621.762

Петюшик Т.Е.

### **МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НАНОСТРУКТУРНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ПАП-2 И SBA-15**

*БНТУ, г. Минск*

*Разработана матрица планирования эксперимента при определении зависимости прочности материала от соотношения объемов его компонентов и размеров частиц наполнителя.*

Интенсификация работ по созданию любых объектов новой техники требует сокращения времени проведения экспериментальных научных исследований при обеспечении высокой достоверности получаемых результатов.

Основной и первоначальной задачей работы было определение оптимального соотношения объемов алюминиевой пудры ПАП-2 и сорбента SBA-15 для получения материала с максимальными прочностью и коэффициентом проницаемости. Экспериментально этот процесс не эффективен: занимает много времени и требует большого расхода материала. Для решения этих проблем применяли метод планирования эксперимента.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Здесь существенно следующее:

- стремление к минимизации общего числа опытов;
- одновременное варьирование всеми переменными, определяющими процесс, по специальным правилам – алгоритмам;
- использование математического аппарата, формализующего многие действия экспериментатора;
- выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов.

На первой стадии планирования необходимо определить отклик и факторы эксперимента. Отклик – выходная переменная, характеризующая систему, изучаемую в эксперименте, фактор – величина, характеризующая то или иное свойство объекта. В работе откликом является прочность, а факторами – соотношение объемов порошков и размер частиц SBA-15.

Чтобы иметь возможность построить стандартную ортогональную план-матрицу эксперимента необходимо применить кодирование факторов: перевод натуральных факторов (размер частиц SBA-15 и соотношение объемов порошков) в безразмерные величины. Для перевода натуральных величин в кодовые  $x_i$  заполняют таблицу кодирования переменных на двух уровнях (таблица 1). В каче-

стве нулевого уровня факторов выбираем центр интервала, в котором предполагаем вести эксперимент.

Таблица 1 – Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Факторы	
	Соотношение SBA-15/ПАП-2, %	Размер SBA-15, мкм
Нулевой уровень $x_i=0$	50	45
Интервал варьирования $\delta_i$	49	55
Нижний уровень $x_i= -1$	1	10
Верхний уровень $x_i= +1$	99	100
Кодовое обозначение	$x_1$	$x_2$

Выбор интервала варьирования обусловлен тем, что он должен быть достаточно мал для получения линейного уравнения, но, вместе с тем, достаточно велик, чтобы не получить ошибочного вывода о незначимом влиянии какого-либо из факторов.

Связь между кодовым и натуральным выражением фактора задается формулой (1) [1].

$$x_i = \frac{X_i - x_{i_0}}{\delta_i} \quad (1)$$

где  $X_i$  – натуральное значение фактора,  $x_{i_0}$  – значение  $i$ -го фактора на нулевом уровне,  $\delta_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

В общем виде зависимость числа опытов от числа уровней факторов имеет вид

$$N = pk, \quad (2)$$

где  $N$  – число опытов;  $p$  – число уровней факторов;  $k$  – число факторов.

Условия эксперимента удобно записывать в виде таблицы, которую называют матрицей планирования эксперимента.

Приведенный план эксперимента представляет собой расширенную матрицу, так как введен столбец  $x_1 \cdot x_2$ , поз-

воляющий оценить коэффициент регрессии при взаимодействии факторов.

Задачей измерения является не только определение значения самой измеряемой величины, но и также и оценка погрешности, допущенной при измерении.

Таблица 2 – Матрица планирования

№ опыта	1	2	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	Прочность, МПа			
				у <sub>1</sub>	у <sub>2</sub>	у <sub>3</sub>	у <sub>ср</sub>
1	1	1	+	2	2	2	2
2	1	1	-	4	2	3	3
3	1	1	-	1	1	1	1
4	1	1	+	1	1	1	1
0				,5	,2	,8	,5

При одинаковом числе параллельных опытов на каждом сочетании уровней факторов необходимо оценить воспроизводимость процесса, который проверяется по критерию Кохнера, или Фишера.

$$G = \frac{s_{u_{\max}}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0.05; f_n; f_u)}, \quad (3)$$

где

$$s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{u_p} - y_{u_{cp}})^2}{m - 1}, \quad (4)$$

$p=1,2$ ;  $m$  – число параллельных опытов;  $s_{U_{\max}}^2$  – наибольшая из дисперсий в строчках плана;  $G_{(0.05; f_n; f_u)}$  – табличное значение критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости;  $f_n=n$  – число независимых оценок дисперсии;  $f_u=m-1$  – число степеней свободы каждой оценки.

Процесс считается воспроизводимым, если выполняется неравенство (3). При этом дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта) определяется по формуле (5)

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n} \quad (5)$$

В нашем случае процесс воспроизводим, так как значение критерия Кохрена  $G = 0,274$ , а табличное  $G_{(0,05; f_n; f_u)} = 0,7679$ .

При этом дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта)  $s_y^2 = 0,72$ .

Коэффициенты регрессии рассчитывают по формулам (6-8).

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n y_{u.ср}}{n} \quad (6)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{i_u} * y_{u.ср}}{n} \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{i_u} * x_{j_u} * y_{u.ср}}{n} \quad (8)$$

Рассчитанные коэффициенты регрессии приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии

	Коэф. регрессии	
1	$b_0$	10,125
2	$b_1$	-7,875
3	$b_2$	-2,375
4	$b_{1.2}$	1,625

Полученное уравнение регрессии

$$Y=10,125-7,875x_1-2,375x_2+1,625x_1x_2 \quad (9)$$

Проверка адекватности линейной модели выполняется с помощью критерия Фишера. Адекватность обоснована, если выполняется неравенство (10).

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}, \quad (10)$$

где

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (y_{u,cp} - y_u)^2}{n - r - 1}, \quad (11)$$

$y_u$  – расчетное значение отклика в  $u$ -м опыте;  $F_{(0,05; f_{ad}; f_u)}$  – критерий Фишера при 5%-ном уровне значимости;  $f_{ad}=n-r-1=4-2-1=1$  – число степеней свободы дисперсии адекватности;  $f_u=4$  – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости.  $F_{(0,05; 1; 4)}=7,7086$ .

В нашем случае модель адекватна, так как  $S_{ad}^2=0$ , а, следовательно, и  $F=0$ .

По данным таблиц 1 и 2 с помощью формулы (1) уравнения (9) приведем к натуральным переменным.

$$\sigma = 10,125 - 7,875r - 2,375\omega + 1,625r\omega, \quad (12)$$

Уравнение (12) отражает зависимость прочности образцов ( $\sigma$ ) от размера частиц (SBA-15 $r$ ) и от соотношения компонентов ( $\omega$ ). Графически полученная зависимость представлена на рисунке 1.

Из графика видно, что максимальная прочность полученного материала достигается при соотношении SBA-15/ПАП-2 равном 1/10, а размер частиц SBA-15 в выбранном интервале размеров на прочность влияния практически не оказывает. Определение оптимального размера частиц SBA-15 в составе композиционного материала должно осуществляться

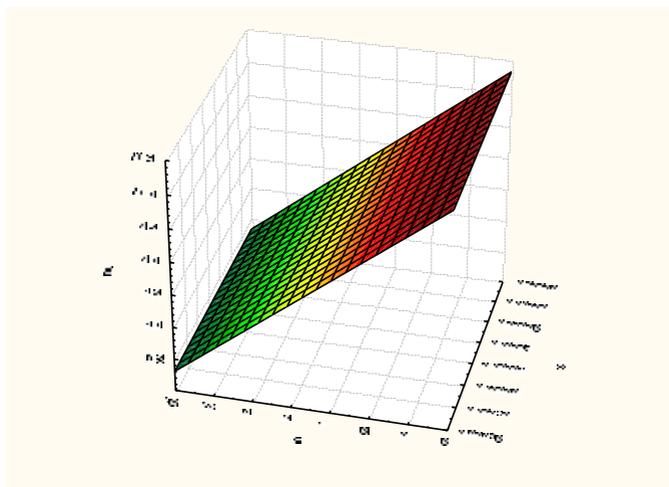


Рисунок 1 – Зависимость прочности от размера частиц SBA и соотношения объемов порошков

для другого выходного параметра: например, сорбционной емкости материала.

Таким образом, матрица планирования сокращает временные и материальные затраты на исследования, и при этом дает возможность проведения детального анализа возможных результатов.

УДК 543.25

Плигина А.А.

**ОПЕРАТИВНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ  
КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ  
МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

*БГТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: ассистент Болвако А.К.*

*The method of inversion voltamperometry was used to investigate electrochemical behavior of microconcentrations of  $Zn^{2+}$ ,*

*Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> in water solutions on a mercury film electrode. The impact of zinc, cadmium, copper and lead during their joint determination was studied. Optimal conditions for obtaining analytical signals of zinc, cadmium, copper and lead were established.*

Предприятия машиностроения, химические и перерабатывающие производства постоянно нуждаются в оперативном аналитическом контроле качества воды, как на стадии осуществления технологических операций, так и при контроле качества воды, поступающей на очистные сооружения, а также при сбросе сточных вод в водоемы. При этом особую важность имеет возможность экспресс-контроля содержания соединений, представляющих значительную опасность вследствие высокой токсичности и малых значений предельно допустимых концентраций.

Среди возможных методов определения ИТМ при совместном присутствии значительными преимуществами обладает метод инверсионной вольтамперометрии (ИВА). Метод ИВА характеризуется низкими (до  $10^{-10}$  моль/дм<sup>3</sup>) пределами обнаружения, достаточно высокой селективностью и хорошими метрологическими характеристиками. Легкость компьютеризации и невысокая стоимость оборудования делает ИВА весьма перспективным методом для аналитических определений ИТМ по сравнению с другими методами.

Целью работы является разработка программно-аппаратного комплекса для определения цинка, свинца, кадмия и меди при совместном присутствии и оптимизация режимов определения ИТМ методом переменного тока квадратно-волновой инверсионной вольтамперометрии. Работа выполнена на компьютеризированном комплексе, включающем электрохимический датчик «Модуль ЕМ-04», полярограф ПУ-1, аналого-цифровой преобразователь и комплект программного обеспечения UniChrom.

Для осуществления химико-аналитических определений были разработаны шаблоны для программы UniChrom, обеспечивающие выполнение анализа с использованием методов градуировочного графика, ограничивающих растворов и добавок. Предусмотрена возможность осуществлять необходимую статистическую обработку результатов измерений, прежде всего автоматическое усреднение результатов анализа при регистрации нескольких вольтамперограмм. В качестве аналитического сигнала оператор может выбрать либо высоту пика, либо его площадь. Возможности компьютерной среды позволяют представлять результаты измерений с расчетом дисперсий и стандартных отклонений, погрешностей градуировочного графика и др., при этом всегда остается возможность доработки программы под конкретные нужды (виды отчетов, способы представления результатов измерений и др.) с помощью встроенного интерпретатора и гибкого инструмента, позволяющего экспортировать данные в сторонние приложения, в частности в электронные таблицы.

При практическом использовании разработки можно варьировать: метод нахождения неизвестной концентрации; необходимое число параллельных измерений; измеряемую величину, на основании которой осуществляется расчет результатов анализа (высота пика или площадь под ИВА-пиком); форму представления результатов измерений с указанием необходимых статистических параметров; состав используемых стандартных растворов и др.

Трехэлектродная электрохимическая ячейка включала дисковый вращающийся электрод из углеситалла с геометрической площадью поверхности  $6 \text{ мм}^2$ , вспомогательный электрод – стеклоуглеродный стаканчик и электрод сравнения – насыщенный хлорсеребряный.

Для приготовления рабочих растворов использовались реактивы квалификации «х.ч.» и «ч.д.а.» и дистиллированная вода. Температура – комнатная. Для формирования ртутно-графитового электрода (РГЭ) *in situ*, создания кислой среды и подавления миграционного тока использовался фоновый раствор, содержащий, моль/дм<sup>3</sup>: КСl – 0,335, HCl – 0,02 и Hg(NO<sub>3</sub>) –  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Каждое измерение состояло из четырех стадий: накопления, успокоения, регистрации аналитического сигнала и регенерации электрода с использованием анодной линейной развертки потенциала. Каждое измерение включало 3 последовательных цикла. Для расчетов использовались значения высоты пика и площади под вольтамперной кривой, полученные как средний результат из трех параллельных измерений.

Для оптимизации режимов ИВА-определения в качестве варьируемых параметров были выбраны амплитуда налагаемого переменного напряжения  $\varphi$ , время накопления  $\tau$  и частота вращения рабочего электрода  $\omega$ .

Время накопления  $\tau$  варьировалось в интервале 21-101 с, амплитуда переменного напряжения  $\varphi$  – от 20 до 40 мВ и скорость вращения индикаторного электрода  $\omega$  – от 500 до 1500 об/мин при скорости развертки потенциала 40 мВ/с. Критерий оптимизации – минимизация относительной погрешности определения ИТМ в пробе, определяемой по методу «введено-найдено».

Установлено, что в области потенциалов  $-(0,4 \div 1)$  В (х.с.э.) происходит активное растворение металлов из их амальгам, и на вольтамперной кривой регистрируются пики, площадь (или высота) которых прямо пропорциональна концентрации металла в амальгаме, и соответственно, в анализируемом растворе. При более электроположительных потенциалах протекает окисление ртути и очистка индикаторного электрода – стадия регенерации.

Линейность зависимости величины пика тока (площади под пиком) соблюдается в диапазоне концентраций

$(2\div 7) \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup> для Zn<sup>2+</sup> и Cu<sup>2+</sup>;  $(2\div 7) \cdot 10^{-6}$  моль/дм<sup>3</sup> для Cd<sup>2+</sup> и Pb<sup>2+</sup>. Достоверность аппроксимации полученных градуировочных графиков находилась в пределах 0,96–0,99. Наибольшую чувствительность РГЭ имел по отношению к ионам Zn<sup>2+</sup> и Cd<sup>2+</sup>.

На основании анализа регрессионных моделей, описывающих влияние параметров проведения ИВА определения на величину относительной погрешности определения, установлено, что факторами, оказывающими влияние в наиболее сильной степени, являются продолжительность стадии электронакопления и величина амплитуды налагаемого переменного напряжения при развертке потенциала. При этом можно выделить как линейную зависимость, так и зависимость второго порядка, а также влияние на величину относительной погрешности определения комбинации этих факторов. Гидродинамические условия проведения стадии электронакопления вносят значительный вклад в величину погрешности определения при определении всех ИТМ.

Величина относительной погрешности определения компонентов при всех режимах, как правило, не превышала 50%, что является достаточно хорошим показателем при определении микроконцентраций. В то же время были подобраны

условия определения, позволяющие снизить относительную погрешность до 5–20% за счет использования оптимальных условий концентрирования определяемых компонентов

на индикаторном электроде и выборе параметров проведения стадии регистрации.

Проведение аналитических определений в условиях переменного тока квадратноволновой ИВА с линейной разверткой потенциала обеспечило четкое разделение пиков цинка, свинца, меди и кадмия при анодной развертке. Разность потенциалов между характеристическими пиками окисления в зависимости от концентрации электроак-

тивных компонентов и условий определения составляла для цинка и кадмия 0,31–0,38 В, между пиками кадмия и свинца – 0,19–0,27 В. Стадия регенерации и очистки РГЭ с окислением ртути происходила при более электроположительных потенциалах и не оказывала влияния на раздельное определение ИТМ.

Проведенные определения микропримесей цинка, свинца, меди и кадмия в водопроводной воде и модельных растворах сточных вод, характеризующихся сложным составом, с использованием разработанного комплекса и режимов измерений, могут свидетельствовать о возможности эффективного инверсионно-вольтамперометрического определения указанных примесей в водах с приемлемой погрешностью.

УДК 528.711

Рябцев Р.Л.

## **ОСОБЕННОСТИ ФИНИШНОЙ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Федорцев В.А.*

Использования в приборостроении традиционных методов финишной обработки высокоточных линз, керамики и полупроводниковых пластин являются очень дорогими и трудоемкими. Основным препятствием в изготовлении высококачественных точных линз является, как правило, то, что они изготовлены из хрупких материалов, таких как стекло, которое может треснуть во время обработки. Даже одна микротрещина может существенно снизить качество объектива и сделать его абсолютно непригодным для дальнейшего использования.

Обработку линз можно разделить на два этапа: шлифование и отделочная обработка. С помощью шлифования осуществляется получение линзы нужного размера, а в

процессе отделочной обработки удаляются трещины и другие мелкие дефекты поверхности. Обычно производители осуществляют шлифование линз вручную, что делает этот процесс достаточно трудоемким. Возможно, основным недостатком ручного шлифования и отделочной обработки является то, что эти процессы не автоматизированы. Для преодоления этих трудностей Центром Производства Оптики (Рочестер, штат Нью-Йорк) была разработана технология для автоматизации отделочной обработки линз, известная как магнитореологическая обработка (МРО).

Процесс МРО опирается на уникальные «умные» жидкости, известные как магнитореологические (МР) жидкости. МР-жидкости – это суспензии микронных размеров намагниченных частиц, таких как карбонильное железо, диспергированные в немагнитных средах, таких как силиконовое масло, минеральные масла, вода. В отсутствие магнитного поля идеальные МР-жидкости находятся в состоянии покоя. С применением внешнего магнитного поля наблюдается феномен, называемый Магнитореологическим эффектом (рисунок 1).

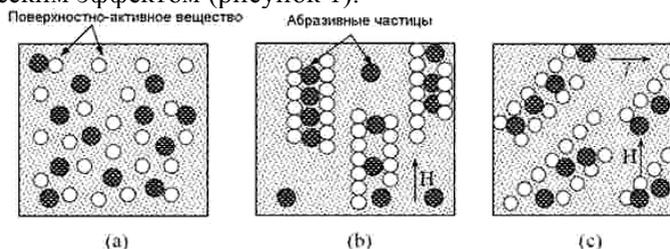


Рисунок 1 – Магнитореологический эффект

На рисунке 1а представлено случайное распределение частиц в отсутствие внешнего магнитного поля; на рисунке 1б под воздействием магнитного поля частицы намагничиваются и выстраиваются в цепочки. Частицы приобретают дипольные моменты, пропорциональные напряженности магнитного поля. И когда дипольное взаимодействие между частицами превышает значение показателя их тепловой

энергии, частицы выравниваются в цепочки диполей, которые ориентированны по направлению действия магнитного поля. На рисунке 1с показано положение, приобретаемое частицами, в следствии действия напряженности магнитного поля и напряжений сдвига  $\gamma$ . Реологически, поведение МР-жидкости под действием магнитного поля описывается пластической моделью Бингмана:

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$$

где  $\tau$  – напряжения сдвига в жидкости,  $\tau_0$  – напряжения сдвига, генерируемые действием магнитного поля;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости и  $\dot{\gamma}$  – интенсивность сдвига [ $s^{-1}$ ].

Динамическая вязкость в основном зависит от типа жидкости. Величина  $\tau_0$  зависит от напряженности магнитного поля,  $H$ . Силы, действующие в жидкости (например напряжения сдвига), возрастают с увеличением сил магнитного поля. Однако это увеличение не является линейным, так как частицы являются ферромагнитными и значение показателя намагниченности различных частиц может колебаться. Давление, создаваемое МР-жидкостями на поверхности линзы, могут варьироваться в пределах 50..100 кПа, для создания такого давления напряженность магнитного поля должна изменяться в диапазоне 150..250 кА/м (~2-3 кОе). Максимальная напряженность магнитного поля ограничена значением магнитной проницаемости МР-жидкости.

Благодаря возможности управления реологическими свойствами путем изменения силы тока, МР-жидкости получили широкое распространение в различных отраслях промышленности. МР-жидкости используются в амортизаторах и различных демпфирующих устройствах, муфтах, тормозах, приводах, также данные жидкости применяются при обработке эндопротезов. Параметры обработки могут регулироваться путем изменения силы и направления магнитного поля, действующего на жидкость. Стандартные МР-жидкости эффективны для финишной обработки оптических

стекло, керамики, пластмасс и некоторых немагнитных металлов. Исходя из схемы процесса магнито-реологической обработки, приведенной на рисунке 2, выпуклые, вогнутые или плоские заготовки помещаются над опорной поверхностью. Согласно рисунку 3, слой МР-жидкости расположен на внешней части вращающегося диска.

Под воздействием магнитного поля в рабочем зазоре происходит ориентирование абразивных частиц в МР-жидкости и осуществляется формирование зоны обработки. Устранение микронеровностей и дефектов поверхности происходит благодаря повороту линзы в зоне обработки относительно своей оси с постоянной скоростью.

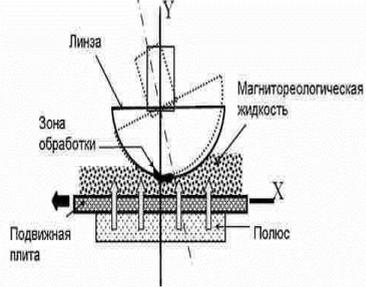


Рисунок 2 – Схема магнито-реологической обработки

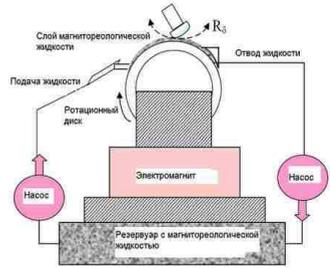


Рисунок 3 – Вертикальная установка для магнито-реологической обработки

Удаление материала происходит за счет создания МР-жидкостью напряжений сдвига на обрабатываемой поверхности. Автоматизация отделочной обработки плоских, цилиндрических и шаровых поверхностей может быть осуществлена за счет контроля процесса обработки с помощью ЭВМ.

Отделочная обработка поверхностей с помощью МР-жидкостей имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами финишной обработки, в частности силы резания регулируются с помощью магнитного поля; жидкость удаляет тепло и стружку из зоны обработки; силы, действующие на обрабатываемую поверхность, имеют

значительно меньшие значения, чем при шлифовании кругом; МР-жидкость автоматически приспосабливается к форме обрабатываемой поверхности, копируя ее.

Управляемый с помощью ЭВМ, магнито реологический процесс позволил производить обработку поверхности с точностью 10..100 нм, и снял многие ограничения, присущие обычным видам финишной обработки [1]. Уникальные характеристики данного метода, сделали его наиболее эффективным при отделочной обработке оптики, входящей в состав приборов навигации, медицинского оборудования, военной техники (прибор ночного видения, инфракрасный бинокль и т.п.) и т.д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kordonski, W.I. Magnetorheological finishing / W.I. Kordonski // International Journal of modern physics B, Vol. 10, 1996.
2. Furst, E.M. Micromechanics of Magnetorheological Suspensions . E.M. Furst // Physical Review E. – Vol. 61, № 6. – 2000. – P. 6732–6739.
3. Kordonski, W. Static Yield Stress in Magnetorheological Fluid / W. Kordonski // Int. J. of Modern Physics B, Vol. 15, Nos. 6 & 7, 2001. – P. 1078-1084.

УДК 621.5

Сергеева А.Г.

### **ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Бабук В.В.*

Одной из важнейших проблем вакуумной технологии оптических покрытий является повышение эксплуатационных характеристик, в том числе механической прочности получаемых пленок. В последние годы рядом авторов показано, что бомбардировка растущей пленки ионами (или нейтральными молекулами) инертного или реактив-

ного газа вызывает протекание в районе бомбардировки ряда процессов, которые, в конечном счете, приводят к изменению свойств пленок.

Использование ионного ассистирования (ИА) совместно с традиционными методами вакуумного нанесения тонких пленок позволяет получить высокую адгезию пленок к подложкам, что дает возможность, расширить комбинации материалов подложки и покрытий, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики.

Надежность таких покрытий зависит от особенностей адгезионного взаимодействия на границе раздела покрытие-основа. Адгезионная прочность соединения достигается созданием протяженного переходного слоя, в котором обеспечивается непрерывное изменение структуры и свойств материала.

Эффективным способом формирования такого слоя является ионно-лучевая обработка покрытия на начальном этапе его формирования, когда длина пробега ускоренных ионов превышает толщину пленки. В результате имплантации и ионно-лучевого перемешивания может быть сформирован приповерхностный слой с изменяющимся по глубине содержанием атомов осаждаемого материала.

Одним из факторов увеличения адгезии вследствие воздействия ионного пучка на поверхность подложки является очистка от адсорбированных загрязнений и травление тонкого поверхностного слоя. Другим фактором является имплантация атомов образующейся пленки вглубь подложки в результате бомбардировки высокоэнергетическими ионами и нейтральными атомами. Глубина имплантации в зависимости от энергии может достигнуть 20..50 Å. Таким образом, благодаря ионному облучению возможно образование переходного диффузионного слоя между подложкой и пленкой.

Эксперименты показали, что ИА в той или иной степени снижает величину структурной составляющей напряжений в пленке.

Ионное ассистирование, как правило, увеличивает адгезию пленок к подложке, уменьшает внутреннее напряжение. Однако, если в полученном без ИА многослойном покрытии упругие составляющие внутреннего напряжения каждого слоя в какой-то степени компенсируют друг друга, то применение ИА может существенно изменить взаимокompенсацию напряжений.

Из большого числа теоретически рассчитанных инструкций для просветления деталей из поликристалла ПО-4 выбраны конструкции на основе следующих материалов:  $\text{BiF}_3$ ,  $\text{YF}_3$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{PbF}_2$ . Для просветления деталей из германия в области спектра 8..14 мкм выбрано покрытие, состоящее из  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Ge}$  и  $\text{YF}_3$ .

Практически для всех исследованных покрытий наблюдалось увеличение микротвердости, что обусловлено уплотняющим воздействием ионного пучка. Соответственно отмечается и увеличение показателей преломления слоев, полученных методом ИА (на 0,03..0,1 в диапазоне 8..14 мкм). При этом не зафиксировано какого-либо изменения поглощения света в ИК области спектра в пленках, полученных с ИА, по сравнению со слоями, нанесенными без ионного сопровождения.

Микротвердость фторидных пленок в результате применения ИА увеличивается, причем также наблюдается зависимость микротвердости от технологических параметров процесса.

Аналогичные по качеству, но менее выраженные зависимости механических характеристик пленок от технологических факторов, наблюдались у фторидов свинца и иттрия. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Адгезионная прочность определялась методом царапания алмазным наконечником со сферической рабочей частью диаметром 60 мкм и выражалась через работу, затрачиваемую на отслоение покрытия с единицы площади поверхности. Микротвердость покрытий измерялась стандартизированным методом вдавливания бицилиндрического

алмазного наконечника, при этом измерялись размеры восстановленного отпечатка, оставленного индентором под нагрузкой 2 г.

Износостойкость оценивалась по результатам истирания образцов в наклонно-вращающемся барабане с песком. За меру износостойкости принималось минимальное количество оборотов барабана вызывающее повреждение поверхности покрытия, фиксируемое с помощью микроскопа.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики прочности просветляющих покрытий, полученных традиционным способом и с использованием ионного ассистирования

Конструкция покрытия	Подложка	Адгезия, Дж/см <sup>2</sup>	Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>	Износостойкость, тыс. об
PbF <sub>2</sub> – s	ПО-4	2-4	60	6
PbF <sub>2</sub> – s *	ПО-4	4-8	90	8
BiF <sub>3</sub> – s	ПО-4	3-6	100	10
BiF <sub>3</sub> – s *	ПО-4	8-12	250	10
BiF <sub>3</sub> –s–YF <sub>3</sub> – s–YF <sub>3</sub> –s– YF <sub>3</sub> –s	ПО-4	1-3	200	3-5
BiF <sub>3</sub> – ZnS– YF <sub>3</sub> – ZnS– YF <sub>3</sub> – ZnS– YF <sub>3</sub> *	ПО-4	1-4	240	7-9
ZnS– Ge– ZnS–YF <sub>3</sub> – ZnS–YF <sub>3</sub>	Ge	0,3-0,7	420	5
ZnS– Ge– ZnS–YF <sub>3</sub> – ZnS–YF <sub>3</sub> *	Ge	0,5-1,2	480	7-8

Примечание: s – тонкий слой YO<sub>3</sub>, не влияющий на спектральные характеристики покрытия; \* – покрытие нанесено с ионным ассистированием.

Исследованные просветляющие покрытия обеспечивают среднее отражение в диапазоне 8–14 мкм не более 1,5 % и среднее пропускание не менее 93 %, при этом в диапазоне 8–11 мкм среднее пропускание составляет не менее 96 %. Механическая прочность просветляющих покрытий

соответствует стандартизированной «нулевой» группе прочности, адгезионная прочность  $A = 0,5 \text{ Дж/см}^2$ , микротвердость – не менее  $250 \text{ кгс/см}^2$ . Покрытия выдерживают воздействие температур в диапазоне  $-196 \dots +300 \text{ }^\circ\text{C}$  без изменения адгезионной прочности и являются влагостойкими.

Полученные результаты показывают, что ИА является эффективным технологическим методом, позволяющим улучшать эксплуатационные характеристики большинства оптических покрытий и обеспечивающим расширение возможностей тонкопленочной технологии.

УДК 621.5

Соловей И.А.

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА КАУФМАНА**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Бабук В.В.*

Ионные источники – устройства для получения направленных потоков ионов. Ионные источники применяются в ускорителях, масс-спектрометрах, ионных микроскопах, установках разделения изотопов, ионных ракетных двигателях.

Существует несколько способов генерации ионных пучков, однако наиболее перспективный способ основан на извлечении ионов из плазмы.

Основными конструктивными элементами плазменных источников ионов являются: разрядная камера; катодный узел; ионно-оптическая система формирования пучка; магнитная система (в источниках с магнитным полем) система подачи рабочего вещества; вакуумная система; система электропитания; система контроля и управления.

Технические возможности ионно-лучевой установки во многом определяются типом ионного источника.

Назначением каждого источника является эффективное сообщение нейтральным атомам и молекулам вещества

такого количества энергии, какого было бы достаточно для отрыва внешних электронов.

Область применения и условия эксплуатации ионного источника накладывают определенные ограничения на конструкцию и параметры источника. Разработка и совершенствование конструкции плазменного ионного источника направлены на решение следующих задач: возбуждение разряда и обеспечение заданной концентрации заряженных частиц в газоразрядной камере, извлечение (экстракция) ионов из плазменного эмиттера, формирование ионного пучка с требуемыми энергетическими и оптическими характеристиками.

Ионный поток можно охарактеризовать следующими основными параметрами: общим током пучка; однородностью ионного потока; распределением ионов по энергиям относительно среднего значения; стабильностью тока; расходимостью пучка.

В источнике Кауфмана разряд локализуется между стенками анодного цилиндра, горячим катодом и системой экстракции. Осцилляция электронов в продольном магнитном поле и электрическом поле, образованном системой электродов, приводит к увеличению эффективности ионизации рабочего газа. Отличительной особенностью конструкции источника является наличие двух- или трехэлектродной многоапертурной ионно-оптической системы (ИОС).

Схема многолучевого источника с осцилляцией электронов (источник Кауфмана) представлена на рисунке 1.

Ионный источник Кауфмана по сравнению с другими имеет ряд существенных преимуществ: низкое напряжение разряда, благодаря чему ионный пучок содержит небольшое количество примесей (10-6%) и имеет малый энергетический разброс; механизм поддержания стационарного разряда позволяет применять многолучевое извлечение ионного пучка и работать с однородными потоками большого диаметра; осцилляция электронов позво-

ляет использовать низкое давление в разрядной камере, что снижает потери пучка и уменьшает загрязнение мишени; источник имеет высокий газовый к.п.д. (80 %) и высокий энергетический к.п.д.

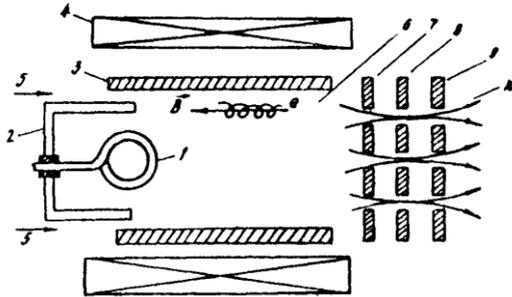


Рисунок 1 – Ионный источник Кауфмана:

1 – термокато́д, 2 – экран като́да, 3 – цилиндрический ано́д, 4 – соленоид, 5 – ввод рабочего газа, 6 – плазма, 7 – эмиссионный электрод, 8 – ускоряющий электрод, 9 – замедляющий электрод, 10 – ионный пучок

Типичные параметры технологического источника Кауфмана: ток ионов ( $\text{Ar}^+$ ) 10 мА, напряжение разряда 20 В, напряжение на ускоряющем электроре 20кВ.

Однако этот источник имеет ряд недостатков конструкции: использование термоката́да ограничивает срок службы источника и не позволяет работать с химически активными рабочими веществами, кроме того, плазма в магнитном поле подвержена неустойчивостям, ухудшающим стабильность параметров ионного пучка и его оптические свойства.

Пути́ми улучшения конструкции этого ионного источника, может рассматриваться применение мультикатодной и мультиполюсной систем (рисунок 2). Активность использования эмитированных электронов зависит от конфигурации нити накала и размещения катодного узла в разрядной камере. Более равномерное распределение концентрации заряженных частиц и, следовательно, более однородные ионные потоки могут быть получены в источнике с

несколькими идентичными нитями накала, размещенными около стенок анодного цилиндра.

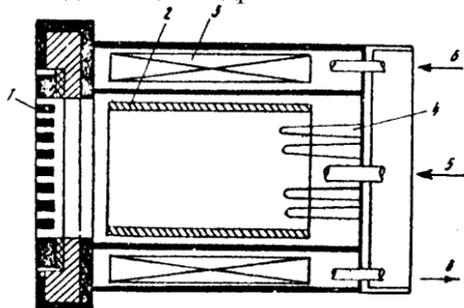


Рисунок 2 – Модернизированный ионный источник Кауфмана с мультикатодной системой:

1 – экстрактор, 2 – анод, 3 – электромагнит, 4 – система катодов (мультикатоды), 5 – напуск рабочего газа, 6 – водяное охлаждение

Ионно-оптическая система модернизированного мультикатодного ионного источника обеспечивает одновременную экстракцию и первичную фокусировку многопучкового потока; ускорение ионов до энергий 100 эВ – 2,0 кэВ; минимальные потери мощности пучка; минимальную эрозию сеток при длительной эксплуатации источника.

Применение ионных процессов позволяет повысить точность изготовления микроструктур и создать высокопроизводительное автоматизированное промышленное оборудование.

УДК 621.088

Станютко Д.О.

## **КОНТРОЛЬ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РЕЗЦА ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Данильчик С.С.*

В процессе вибрационного точения кроме основной подачи  $S_0$  инструменту сообщается колебательное движение с

амплитудой  $A$  (рисунок 1). Величина амплитуды должна быть таковой, чтобы толщина среза в конце каждого цикла колебательного движения инструмента уменьшалась до нуля. Это приводит к дроблению сливной стружки на элементы определенной длины.

Теоретически амплитуда колебаний режущего инструмента определяется из условия

$$\dot{A} = \frac{S_0}{2 \left| \sin \pi \frac{f}{n} \right|}, \text{ мм,}$$

где  $f$  и  $n$  – частота колебательного движения инструмента и частота вращения заготовки, соответственно [1]. Следовательно, расчетная амплитуда зависит от подачи  $S_0$  и отношения  $\frac{f}{n}$ . Для обеспечения устойчивого процесса дробления стружки частота задаваемых колебаний не должна быть кратной частоте вращения заготовки. Эксперименты показали, что наилучшее дробление стружки достигается при соотношении частоты задаваемых вибраций к частоте вращения заготовки:

$$\frac{f}{n} = 0,5; 1,5; 2,5 \dots \frac{2k + 1}{2}.$$

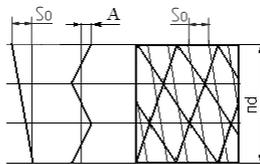


Рисунок 1 – Развертка движения реза при вибрационном точении

На практике амплитуда может отличаться от теоретической. На величину амплитуды влияют свойства обрабатываемого материала, применение смазочно-охлаждающей жидкости, угол в плане  $\phi$ , жесткость станка и режимы резания.

Для исследования зависимости сил резания при вибрационном точении, шероховатости обработанных поверхностей, стойкости режущего инструмента от амплитуды необходимо точно контролировать ее величину. Существуют различные методы измерения характеристик механических колебаний. Для их измерения используются в основном электрические и оптические приборы.

В электрических приборах механические колебания преобразуются в электрические сигналы, которые после усиления поступают на регистрирующую аппаратуру. Широко для измерения виброперемещений применяется тензометрия. Наибольшее применение при тензометрировании натуральных конструкций находят электрические тензометры сопротивления – тензорезисторы. Тензорезисторы наклеиваются на упругий элемент, контактирующий в процессе вибрационного точения с колебательной системой. Принцип действия тензорезисторов основан на изменении электрического сопротивления чувствительной решетки при ее деформировании вместе с конструкцией, воспринимающей колебания. Вследствие деформации изменяется выходное напряжение, по величине которого и оценивают величину амплитуды.

При помощи оптических приборов осуществляется бесконтактное измерение виброперемещений. К ним относятся лазерные приборы. Работа прибора, представленного на рисунке 2, основана на пространственном смещении отраженного луча лазера 2, направленного под углом на колеблющийся объект 1 [2]. Это смещение, пропорциональное отклонению  $x$  объекта, обрабатывается фотоприемником 3 и измерительной системой 4.

Для измерения характеристик низкочастотных колебаний применяются механические приборы. Механические колебания объекта измерения могут восприниматься щупом и передаваться пишущему перу для записи на движущуюся ленту. Механические приборы более просты по

конструкции и не требуют дорогостоящей регистрирующей аппаратуры.

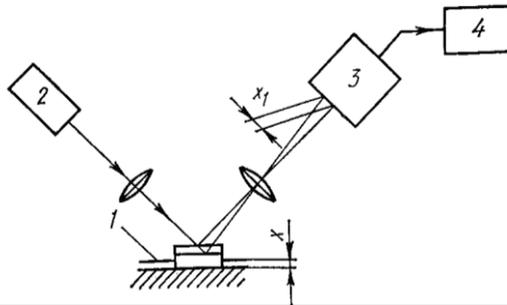


Рисунок 2 – Схема лазерного прибора для измерения виброперемещений

Для быстрого контроля величины амплитуды разработано устройство, приведенное на рисунке 3.

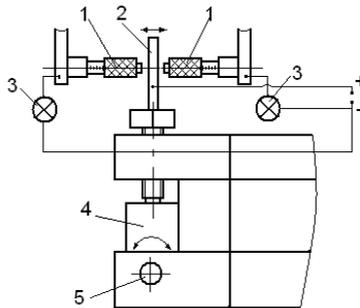


Рисунок 3 – Схема приспособления для измерения амплитуды

Основу устройства составляют микрометрические винты 1, подключенные к источнику постоянного тока. Подвижный элемент 2 устройства для вибрационного течения располагается между этими винтами и также подключен к источнику тока. Инструмент 4 установлен в специальном резцедержателе, которому сообщают возвратно-вращательное движение относительно оси 5. Угол поворота резцедержателя небольшой, поэтому подвижный элемент 2, установленный на резцедержатель, условно совершает воз-

вратно-поступательное движение. Медленно вращая винты добиваемся легкого контакта между винтами и колеблющимся элементом. В момент касания поочередно с одной и другой стороны загораются лампочки 3. Оттарировав предварительно данное устройство величину амплитуды определяют по показаниям микрометрических винтов, цена деления которых составляет 0,01 мм.

Устройство позволяет также устанавливать необходимую амплитуду, ограничив ее величину микрометрическими винтами. Амплитуду в этом случае медленно изменяют до тех пор, пока не произойдет легкий контакт, о чем сообщат лампочки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов, Е.Г. Осциллирующее точение / Е.Г. Коновалов, А.В. Борисенко. – Минск: Из-во Академии наук БССР, 1960. – 32 с.

2. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении: справ. пособие / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Выш. шк., 1985. – 286 с.

УДК 621.5

Тарибо Д.Г.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИОННОГО ИСТОЧНИКА С ЗАКРЫТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ**

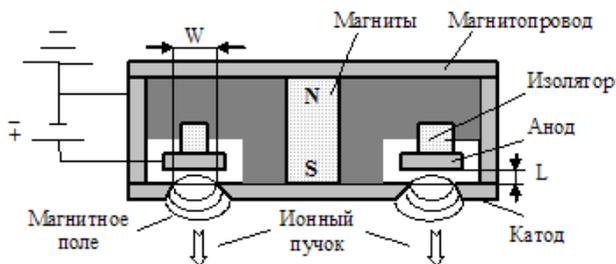
*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Бабук В.В.*

Ионные источники с закрытым (замкнутым) дрейфом электронов предназначены для финишной очистки подложек перед нанесением покрытий и ионного ассистирования процесса нанесения покрытий. С их помощью также можно наносить покрытия методом химического газофазного осаждения. Потребность в таких источниках проявляется во многих технологиях ионной обработки материалов. Зна-

начально эти устройства были разработаны в качестве двигателей для космических аппаратов, но оказались востребованными и в технологиях модификации, т.к. формируемые ими ионные пучки являются эффективным инструментом воздействия на материалы.

Ионные источники с замкнутым дрейфом электронов можно разделить на две основные группы. Первая, это ионные источники с протяженной зоной ускорения, называемые также стационарными плазменными ускорителями или ускорителями с магнитным слоем. Ко второй группе относятся ионные источники с анодным слоем. В вакуумных технологиях применяются почти исключительно ионные источники с анодным слоем. Конструкция ионного источни-



ка приведена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Ионный источник с закрытым дрейфом электронов

Источник имеет магнитную систему из постоянных магнитов, которая создает магнитное поле между внутренним и внешним полюсами магнитопровода. После подачи положительного потенциала на анод между ним и катодом загорается электрический разряд со скрещенными аксиальным электрическим и радиальным магнитным полями. В этом случае электроны дрейфуют в азимутальном направлении по замкнутым траекториям, многократно ионизируя атомы рабочего газа и постепенно диффундируя к аноду. Образовавшиеся ионы ускоряются сильным электрическим полем, создающимся за счет пространственного заряда электронов, и по-

кидают ионный источник через щель ускоряющего канала. Конструктивными особенностями ионного источника с анодным слоем являются проводящие стенки ускоряющего канала, и длина этого канала, меньшая, чем его ширина. В данном ионном источнике не существует процесса, ограничивающего температуру электронов. Поэтому происходит ее увеличение при движении электронов к аноду. Это увеличение температуры приводит к резкому повышению потенциала в области анода. Тонкий слой у анода, в котором происходит образование и ускорение ионов, стал основой названия данного типа ионного источника.

Известно, что однородность параметров ионного пучка улучшается при напуске газа не в камеру, а в газораспределительную магистраль, находящуюся внутри ионного источника, что также дает возможность работать на более низких давлениях и тем самым уменьшить количество газовых включений в пленке. При выборе ширины ускоряющего канала  $W$  (рисунок 1) необходимо учитывать, что чем больше эта величина, тем шире будет проекция ионного пучка на подложке. При  $W = 2; 4; \text{ и } 6$  мм угол расхождения пучка ионов равняется  $\pm 6\%$ ,  $\pm 12\%$  и  $\pm 15\%$ , соответственно. Более широкие пучки имеют меньшую плотность ионного тока при таком же рабочем напряжении и давлении. Для того чтобы избежать распыления стенок ускоряющего канала ионами необходима оптимальная конфигурация магнитного поля в ускоряющем промежутке, достаточное охлаждение источника и правильная юстировка электромагнитной оптики. На рисунке 2 показаны две возможные конструкции электродной системы ионного источника: неправильная (а) и правильная (б).

В неправильной конструкции, только ионы, образовавшиеся около щели в катоде, могут участвовать в формировании пучка, а остальные ионы направляются к катоду и распыляют его. В правильной конструкции область с высокой концентрацией электронов смещена внутрь ускоряю-

щего канала. Ионы, образовавшиеся в этой области, практически не участвуют в распылении катода, поскольку движутся в направлении от него. Поэтому расстояние  $L$  от анода до ближайшего края катода должно быть много меньше ширины  $W$  ускоряющего канала,  $L \ll W$ . Кроме того, ток ионного пучка увеличивается за счет повышения эффективности ионизации в ускоряющем канале и снижения доли ионов, идущих на стенки этого канала. Анод должен быть выполнен с прямоугольной или клиновидной полостью в силу того, что при этом лучше обеспечивается перпендикулярность скрещенных электрического и магнитного полей.

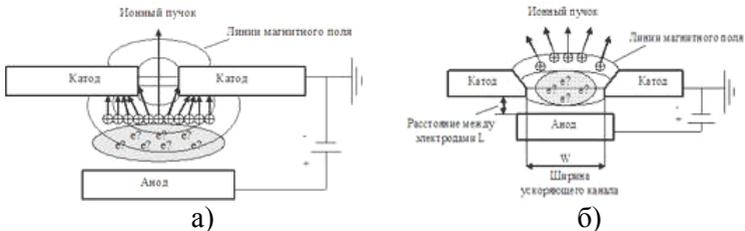


Рисунок 2 – Конструкции электродной системы ионного источника

Известно, что ионный источник с анодным слоем имеет два режима работы: высоковольтный (с коллимированным пучком) и низковольтный (с рассеянным пучком). Режим с коллимированным пучком (основной режим) существует при низких давлениях рабочего газа. В этом режиме разрядный ток увеличивается с увеличением разрядного напряжения. Повышая рабочее давление можно переключить ионный источник в режим с рассеянным пучком и много большим разрядным током, получаемым при почти постоянном напряжении. Это объясняется тем, что в режиме с коллимированным пучком в ускоряющем канале циркулирует Холловский ток и объемный заряд электронов не скомпенсирован ионами, которые быстро уносятся от анода сильным электрическим полем.

Поскольку Холловский ток увеличивается с повышением разрядного напряжения, то это приводит к увеличению чис-

ла ионизирующих столкновений и росту разрядного тока. При повышении давления в ускоряющем канале генерация ионов происходит быстрее удаления их из области ионизации. В этом режиме (с рассеянным пучком) ионный ток не ограничен пространственным зарядом и может достигать значений в 10 раз больших чем в режиме с коллимированным пучком. Однако при этом теряется контроль таких параметров ионного пучка как энергия ионов и направленность.

К недостатку ионных источников с анодным слоем можно отнести отсутствие независимого контроля тока и энергии ионов. Повышая рабочее давление для увеличения ионного тока мы увеличиваем тем самым количество столкновений ионов с нейтральными атомами. Частые столкновения приводят к перезарядке энергетичных ионов и нейтральных атомов. Образовавшиеся низкоэнергетичные ионы теперь находятся далеко от анода и, поэтому, не могут ускориться до полного анодного потенциала. Это приводит к расширению энергетического спектра ионов. Считается, что средняя энергия ионов в ионном источнике с анодным слоем равняется примерно половине анодного напряжения. Характеристики ионного источника с анодным слоем дают возможность использовать его во многих технологических операциях, таких как очистка и активация поверхностей подложек, ионное ассистирование PVD процессам и даже применяться непосредственно для нанесения покрытий.

УДК 621.5

Тихонович Ю.А.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Бабук В.В.*

Ионно-лучевая обработка материалов осуществляется пучком ускоренных заряженных частиц, сформированных в автономных источниках ионов. Рабочее вещество подается в автономный источник ионов, в котором происходит его

ионизация, ускорение ионов до требуемой энергии и формирование пучка ионов. Ускоренные ионы попадают в технологическую камеру без столкновений с остаточным газом и взаимодействуют с поверхностью обрабатываемого объекта, вызывая либо распыление материала (ионы аргона), либо образование летучих соединений (ионы химически активных веществ), либо осаждение материала (углеводороды).

При распространении пучка ионов в промежутке источник ионов – обрабатываемый объект образует пучковую плазму, состоящая из ускоренных ионов и медленных электронов, возникающих при ионизации остаточного газа и в результате взаимодействия пучка ионов с обрабатываемым объектом. Режим работы источника определяют не только параметры ионного пучка, но и степень его компенсации, характеристики вторичной плазмы, свойства пучковой плазмы и характер ее взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

На обрабатываемой поверхности происходят следующие процессы: нейтрализация ионов пучка с образованием газового потока, удаление материала в результате физического распыления или химического взаимодействия ионов с материалом подложки, эмиссия электронов с поверхности при ионной бомбардировке, поступление потока электронов из пучковой плазмы или с катода нейтрализации, расположенного вблизи источника ионов.

Для реализации ионно-лучевых технологий разработан ряд оригинальных источников ионов с холодным катодом для травления материалов и нанесения пленок – «Холодок-1», «Холодок-2», Радикал М-200.

Во всех источниках используется единый физический принцип формирования пучка ионов, заключающийся в создании внутри ускоряющего промежутка скрещенных электрического и магнитного полей, удерживающих электроны, ионизирующие

рабочее вещество. Разработанные источники ионов по сравнению с зарубежными аналогами, например, с источниками

Кауфмана, источниками с седловидным полем, СВЧ источниками обладают следующими достоинствами:

- позволяют работать практически с любыми химически активными газами, благодаря использованию холодного катода;
- обеспечивают получение в 2-3 раза больших плотностей ионного тока при той же энергии ионов;
- позволяют формировать пучки ионов различной формы и конфигурации;
- обеспечивают однородную обработку неподвижных поверхностей большой площади;
- имеют большой срок службы и простую конструкцию.

Технологические процессы, осуществляемые с помощью разработанных источников ионов:

#### 1. Очистка, активация и полировка поверхностей объектов

Очистка поверхности в вакууме может осуществляться различными методами: тлеющим разрядом, ВЧ разрядом, подачей постоянного и ВЧ потенциала на подложку, находящуюся в газоразрядной плазме.

Химические методы очистки не всегда позволяют получить поверхность, свободную от органических растворителей, химических реагентов, пленок сложного состава, не взаимодействующих с растворителями.

Так как состав загрязнений, как правило, неизвестен, распыление ионами аргона является наиболее эффективным методом удаления сверхтонких поверхностных слоев и позволяет проводить очистку подложки, недостижимую в случае обработки жидкостными методами. Для удаления органических загрязнений очистку поверхности целесообразно проводить ионами кислорода, образующими с органическими соединениями летучие продукты взаимодействия.

Нанесение пленок на предварительно очищенную поверхность приводит к существенному улучшению качества и надежности изготавливаемых изделий за счет

улучшения адгезии пленок к подложке, увеличения сплошности пленок при малых толщинах, уменьшения влияния окружающей среды на качество покрытий. Обработка поверхности пучком ионов не только очищает ее от загрязнений, но и активирует ее или растущую пленку, если процесс обработки пучком ионов проводится одновременно с нанесением пленки. При этом на поверхности образуются свободные связи, которые при нанесении пленки становятся искусственными центрами зародышеобразования. При активации поверхности стекла, например, во время нанесения пленок алюминия, меди, хрома или других металлов, сплошные пленки образуются даже при толщине несколько нм. Процесс активации эффективен, если применять его непосредственно перед нанесением или в процессе нанесения пленок.

## 2. Нанесение пленок

Тонкие пленки различных материалов можно наносить на подложку, распыляя материал мишени пучком ионов инертных газов.

Основные достоинства этого метода нанесения пленок по сравнению с методом ионно-плазменного распыления состоят в следующем:

- возможность нанесения пленок материалов сложного состава с сохранением компонентного состава мишени;
- малое рабочее давление в технологической камере, ограниченное лишь быстротой откачки вакуумной системы, а не условиями поддержания разряда;
- отсутствие электрических полей в области подложки, что особенно важно при нанесении диэлектрических пленок на подложки из проводящих материалов;
- возможность управления зарядами в осаждаемой диэлектрической пленке с помощью электронов, эмиттируемых катодом нейтрализации.

Источники ионов с холодным катодом типа «Холодок», позволяют в отличие от известных методов бомбардировать распыляемые мишени высокоэнергетичными ионами прак-

тически любых газообразных веществ, включая химически активные соединения.

Источник ионов «Холодок-1» создает радиально сходящийся пучок ионов, направленный под таким углом к поверхности мишени, при котором обеспечивается получение максимального коэффициента распыления материала. Источник позволяет наносить пленки металлов, диэлектриков, полупроводников, сплавов, а также сложных композиционных материалов, включая высокотемпературные сверхпроводники. Для нанесения пленок на поверхности большой площади был разработан источник с радиально расходящимся пучком ионов («Холодок-2»). Источник «Холодок-2» позволяет наносить пленки с неравномерностью – 5% на подложки диаметром – 200мм.

Источник ионов Радикал М-200 позволяет осаждать материал непосредственно из пучка ионов и отличается от других источников возможностью управления энергией осаждаемых частиц и направленностью осаждения материала (под углом к поверхности). Рабочее вещество, например, углеродород подается в источник, ионизируется, образовавшиеся ионы ускоряются до требуемой энергии и осаждаются на подложке, образуя алмазоподобную пленку (АПП). Поскольку ионы ускоряются электрическим полем внутри источника, то их энергия может легко варьироваться в широких пределах от десятков эВ до нескольких тысяч эВ, тогда как в процессах распыления материалов энергия осаждаемых атомов является неизменной и составляет в среднем (5–15)эВ, а при испарении материала не превышает обычно 0,2эВ.

Этот метод предложен сравнительно недавно и используется в основном для получения АПП. Достоинством этого метода является возможность управления энергией ионов в широких пределах, что позволяет изменять свойства и структуру осаждаемых углеродных пленок, а также возможность управления углом падения ионов, что существенно, например, при осаждении пленок на стенки глу-

боких канавок. Из пучков ионов можно осадить не только АП, но также и окислы, нитриды и карбиды.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция «Новые материалы и технологии»

1.	<i>Авдейчук Е.С.</i> Использование тензометрии для исследования процесса вибрационного точения ....	3
2.	<i>Аникина А.А.</i> Автомобильные шины .....	7
3.	<i>Ардынович А.А., Журавлева М.В.</i> Модификация эпоксидной смолы полиамидокислотой .....	11
4.	<i>Басаранович А.В.</i> Спекание дисперсных сред из эвтектических композиций на основе гранита ...	16
5.	<i>Басков О.В.</i> Технологическая схема получения проницаемых изделий из керамических материалов	20
6.	<i>Богач Н.Л.</i> Основные характеристики и виды вакуумных оптических покрытий .....	25
7.	<i>Боровская Т.В.</i> Алгоритм проектирование с помощью САПР T-FLEX CAD .....	28
8.	<i>Гусакова О.В.</i> Использование в учебном процессе результатов исследований in-situ фазовых превращений в быстрозатвердевших фольгах сплавов олова .....	33
9.	<i>Данильчик П.С.</i> Траектория движения инструмента при точении с наложением на процесс резания асимметричных колебаний .....	38
10.	<i>Евтухов К.С.</i> Анализ задач идеальной пластичности для случая вдавливания .....	42
11.	<i>Ефимов А.М., Линник А.В.</i> Упрочнение поверхностей инструментов и деталей машин с использованием энергии магнитного и ультразвукового полей .....	50
12.	<i>Заблоцкая О.С.</i> Мультислойные покрытия на стекле	53
13.	<i>Зинкович Д.И.</i> Микродуговое оксидирование .....	56
14.	<i>Зуенок А.В., Пастушенко Е.А.</i> Графит для получения композиционных материалов .....	60
15.	<i>Зуенок Д.В.</i> Энергосберегающее стекло .....	63

16. Зуёнок Д.В., Нарушко Е.О. Использование современных средств защиты от фрикционного, абразивного, эрозионного, вибрационного и коррозионного износа машин, механизмов .....	67
17. Какарека А.С. Вольтамперометрическое исследование коррозионной устойчивости алюминия с покрытиями Ni–P и Ni – W – P в среде хлорида натрия .....	71
18. Кандыба Ю.М., Журавлева М.В. Полиэтилентерефталат, обладающий ионообменными свойствами .....	75
19. Кирикович М.К. Технология детонационное напыление. Описание и возможности применения ..	81
20. Леонтьев А.А. Алмазоподобные покрытия .....	86
21. Линник А.В., Ефимов А.М. Магнитные свойства частиц в рабочей зоне при магнитно-электрическом упрочнении с наложением ультразвуковых колебаний .....	89
22. Ляпин К.Н. Методика измерения величины собственного газовыделения материалов в вакууме	93
23. Мартысевич Н.О. Вакуумные ловушки .....	96
24. Мисник И.В. Методика определения износостойкости TiN вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из стекла .....	99
25. Муравейко А.Н. Особенности нанесения вакуумных оптических покрытий на крупногабаритные плоские оптические детали .....	102
26. Нагорная Е.В., Зыгмантович В.М. Использование лозы .....	106
27. Нарушко Е.О. Защитные покрытия от высокотемпературной газовой коррозии лопаток осевого компрессора в авиастроении .....	110

28	<i>Павленова В.А.</i> Эффективная ионная обработка оптических материалов в вакууме с использованием высокочастотного сеточного электрода	115
29	<i>Петюшик Т.Е.</i> Методика планирования эксперимента при разработке низкотемпературной наноструктурной керамики на основе ПАП-2 и SBA-15	119
30	<i>Плигина А.А.</i> Оперативный аналитический контроль содержания ионов тяжелых металлов в технологических средах	125
31	<i>Рябцев Р.Л.</i> Особенности финишной магнито-реологической обработки диэлектрических материалов	130
32	<i>Сергеева А.Г.</i> Влияние ионного ассистирования на эксплуатационные характеристики оптических покрытий	134
33	<i>Соловей И.А.</i> Модернизация ионного источника Кауфмана	138
34	<i>Станютко Д.О.</i> Контроль амплитуды колебательного движения резца при вибрационном точении	141
35	<i>Тарибо Д.Г.</i> Исследование режимов работы ионного источника с закрытым дрейфом электронов	145
36	<i>Тихонович Ю.А.</i> Применение источников ионов с холодным катодом	149

Научное издание

Инженерно-педагогическое  
образование в XXI веке

МАТЕРИАЛЫ  
VII Республиканской  
научно-практической  
конференции молодых ученых и студентов БНТУ

В 3 частях

Часть 2

---

Подписано в печать 14.04.2011.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 10,62. Уч.-изд. л. 7,18. Тираж 50. Заказ 329.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.